MÜHENDİSLİK ALANINDA TEKNOLOJİK GELİŞMELER



EDİTÖRLER
Prof. Dr. Hülya KALAYCIOĞLU
Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA

MÜHENDİSLİK ALANINDA TEKNOLOJİK GELİŞMELER

EDİTÖRLER
PROF. DR. HÜLYA KALAYCIOĞLU
DR. ÖĞR. ÜYESİ SENAİ YALÇINKAYA

MÜHENDİSLİK ALANINDA TEKNOLOJİK GELİŞMELER

KİTAP EDİTÖRLERİ
Prof. Dr. Hülya KALAYCIOĞLU
Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA

Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları: 45/2020
ARALIK-2020

Yayıncı Sertifika No: 36934
E-ISBN: 978-605-7594-55-6
Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları

Bu çok bölümlü bilimsel kitabının her türlü yayın hakkı GÜVEN PLUS GRUP DANIŞMANLIK A.Ş. YAYINLARI'na aittir. Yayınevinin yazılı izni olmadan, kitabın tümünün veya bir kısmının elektronik, mekanik ya da fotokopi yoluyla basımı, yayını, çoğaltımı ve dağıtımı yapılamaz. Kitapta yer alan her bölüm sorumluluğu, görseller, grafikler, direkt alıntılar ve etik/kurum iznine yönelik sorumluluk ilgili yazar(lar)a aittir. Oluşabilecek Herhangi Hukuki bir olumsuzlukta yayınevi başta olmak üzere kitabın hazırlanmasına destek sağlayan kurullar, kitabın düzenlenmesi ve tasarımından sorumlular kurum(lar) ve kitap editörler hiçbir konuda "maddi ve manevi" bir yükümlülük ve hukuki sorumluluğu kabul etmez, hukuki yükümlülük altına alınamaz. Her türlü hukuki yükümlülük ve sorumluluk "maddi ve manevi" yönden ilgili bölüm yazar(lar)ına aittir. Bu yöndeki haklarımızı maddi ve manevi yönden GÜVEN GRUP DANIŞMANLIK "YAYINCILIK"A.Ş. olarak saklı tutarız. Herhangi bir hukuki sorunda/durumda İSTANBUL mahkemeleri yetkilidir. Güven Plus Grup Danışmanlık bünyesinde hazırlanan ve yayınlan bu eser ISO: 10002:2014-14001:2004-9001:2008-18001:2007 belgelerine sahiptir. Bu eser TPE "Türk Patent Enstitüsü" tarafından "Güven Plus Grup A.Ş. 2016/73232" ve "2015/03940" nolu tescil numarası ile markalı bir eserdir. Bu bilimsel/akademik kitap ulusal ve uluslararası nitelikte olup, akademik teşvik kriterlerini ve uluslararası doçentlik kriterlerini karşılamaktadır. GÜVEN PLUS GRUP YAYINCILIK A.Ş'nin uluslararası yayın evi olduğuna ilişkin İstanbul Valiliği İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü İstanbul Basma Yazı ve Resimleri Derleme Müdürlüğü tarafından Sayı: 37666426-207.01[207.02.02]-E.62175 21.01.2019 tarihli resmi yazısı ile teyit edilebilir. Çok bölümlü/yazarlı olan bu kitap T.C. Kültür Bakanlığı Milli Kütüphaneler tarafından ve 18 Farklı Dünya Ülkesiyle Anlaşmalı olan Milli Kütüphanenin E-Erişim sistemi tarafından da taranmaktadır. Bu kitap maddi bir değer ile alınıp satılamaz. Kitap bölüm yazarlarından, destekleyenlerden, kitapta emeği geçenlerden Güven Plus Grup A.Ş. Yayıncılık herhangi bir maddi bir gelir elde etmemiş ve talepte bulunmamıştır. Bu bilimsel çok bölümlü kitapta yer alan bölümlerden alıntı yapmak ve ilgili bölüme ya da tamamına atıf yapılmak koşulu ile kaynak gösterilmek üzere bilimsel ya da ilgili araştırmacılar tarafından kullanılabilir. ***BU ELEKTRONİK PDF FORMATINDAKİ KİTAP ÜCRET KARŞILIĞINDA ALINIP SATILAMAZ. KİTABIN HER TÜRLÜ HAKLARI YAYINEVİNE AİTTİR. BU KİTAPTA TOPLAM 26 FARKLI BAŞLIKTA BÖLÜM VE YAZAR(LAR) BULUNMAKTADIR.***

Metin ve Dil Editörü
Prof. Dr. Asuman Seda SARACALOĞLU
Prof. Dr. Hülya KALAYCIOĞLU
Prof. Dr. Mustafa TALAS
Doç. Dr. Gökşen ARAS
Dr. Öğr. Üye. M. Hayrullah AKYILDIZ
Dr. Öğr. Üye. Senai YALÇINKAYA

Kapak Tasarımı
Prof. Dr. Pelin AVŞAR KARABAŞ

Sayfa Düzeni
Burhan MADEN

Baskı-Cilt
GÜVEN PLUS GRUP DANIŞMANLIK A.Ş. YAYINLARI®
Kayaşehir Mah. Başakşehir Emlak Konutları, Evliya Çelebi Cad. 1/A D Blok K4 D29 Başakşehir İstanbul
Tel: +902128014061- 62 Fax:+902128014063 Mobile:+9053331447861

KİTAP/DERGİ/KONGRE İMTİYAZ SAHİBİ
GÜVEN PLUS GRUP DANIŞMANLIK A.Ş. YAYINLARI®
Kayaşehir Mah. Başakşehir Emlak Konutları, Evliya Çelebi Cad. 1/A D Blok K4 D29 Başakşehir İstanbul
Tel: +902128014061-62-63 - +905331447861 info@guvenplus.com.tr, www.guvenplus.com.tr

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ **7**

BÖLÜM 1
ARAÇ ÖN KAPUT MENTEŞESİ TORK ÖLÇÜMÜ VE KALİTE KONTROL BANKOSU TASARIMI **9**

ARŞ. GÖR. VEDAT YEĞİN, PROF. DR. DURMUŞ KARAYEL

BÖLÜM 2
FLOWFORMING PROSESİNİN AISI 5140 ÇELİK MALZEMEYE UYGULANARAK MİKRO-YAPI VE MUKAVEMET AÇISINDAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ **53**

ACAR CAN KOCABIÇAK, DR. ÖĞR. ÜYESİ SENAİ YALÇINKAYA

BÖLÜM 3
FOTOLİTOGRAFİ TEKNİĞİ İLE MANYETİK MİKRO AYGITLARIN ÜRETİMİ **76**

DOÇ. DR. CİHAT BOYRAZ

BÖLÜM 4
TİTANYUM VE SÜPER ALAŞIMLARDA SOĞUTMA YÖNTEMLERİNİN ETKİLERİ **102**

ARŞ. GÖR. BAHATTİN YILMAZ, PROF. DR. ABDULKADİR GÜLLÜ

BÖLÜM 5
UÇAK KOLTUĞUNUN YAPISAL ANALİZİ VE TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU **121**

SERHAT ERDEN, DR. ÖĞR. ÜYESİ SENAİ YALÇINKAYA

BÖLÜM 6
CP-Tİ METALLERİNİN ERGİMELİ KAYNAK UYGULAMALARININ İNCELENMESİ **151**

DOÇ. DR. MEMDUH KURTULMUŞ, EZGİ DOĞAN

BÖLÜM 7
VİNÇ SİSTEMLERİNDE KULLANILAN KANCALARIN TASARIMI, İMALATI VE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ **169**

ÖMER ŞENGÜL, DR. ÖĞR. ÜYESİ MENDERES KAM

BÖLÜM 8
KAPALI OTOPARKLARDA JET FANLI HAVALANDIRMA SİSTEMLERİ .. **188**

DOÇ. DR. AYHAN ONAT, SİNEM SULTANSU

BÖLÜM 9
HCCI MOTORLARDA YANMA VE EMİSYONLAR 219

ÖĞR. GÖR. GÜVEN DEMİRTAŞ, DR. ÖĞR. ÜYESİ MUSTAFA KEMAL BALKİ,
DR. ÖĞR. ÜYESİ SİNAN ERDOĞAN, DOÇ. DR. AYHAN ONAT,
PROF. DR. CENK SAYIN

BÖLÜM 10
PETROL BORULARINDA KOROZYON ETKİSİNİN İNCELENMESİ 256

KAMAL EDDİN ISMAEIL, DR. ÖĞR. ÜYESİ SENAİ YALÇINKAYA

BÖLÜM 11
SICAK PRESLEME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ B_4C PARÇACIK TAKVİYELİ MAGNEZYUM MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMENİN RADYOAKTİF ÖZELLİKLERİNİN TEORİK OLARAK İNCELENMESİ..... 287

DOÇ. DR. UĞUR GÖKMEN, ÖZLEM YILMAZ, PROF. DR. SEMA BİLGE OCAK

BÖLÜM 12
SAĞLIKTA KABLOSUZ VÜCUT ALANI SENSÖR AĞI SİSTEMİ..... 310

PERİHAN DİKİLİ

BÖLÜM 13
3B YAZICILAR VE 3B METAL YAZICILARDA BASKI HATALARININ İNCELENMESİ

ALPER ÖNER, DR. ÖĞR. ÜYESİ SENAİ YALÇINKAYA

BÖLÜM 14
BAZALT TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ 368

FATİH ŞAHİN, PROF. DR. YUSUF ŞAHİN,
DR. ÖĞR. ÜYESİ SENAİ YALÇINKAYA

BÖLÜM 15
HSS, TIN VE TIALN KAPLAMALI MATKAP TAKIMLARI KULLANILARAK AISI D2 ÇELİĞİ ÜZERİNE DELİK DELME İŞLEMLERİ UYGULAMASI..... 384

ACAR CAN KOCABIÇAK, DR. ÖGR. ÜYESİ SENAİ YALÇINKAYA

BÖLÜM 16
DİŞLİ ÇARKLAR VE UYGULAMALARI 408

DOÇ. DR. HÜSEYN MİRZAYEV

BÖLÜM 17
DÜZ DİŞLİ ÇARKLARDA KAPLAMANIN YÜZEY AŞINMASI VE YORULMAYA ETKİSİNİN İNCELENMESİ..... 435

ABDULL GHAFOOR SHAIB, DR. ÖĞR. ÜYESİ SENAİ YALÇINKAYA

BÖLÜM 18
GEMİ GÖVDE SACLARINDA; SAW VE FCAW KAYNAK UYGULAMALARI VE ETKİLERİNİN FARKLI TEST YÖNTEMLERİYLE İNCELENMESİ 466

SERAP ÖZHAN DOĞAN, ONUR KOŞAR, BURAK GALIP ANIK

BÖLÜM 19
BİSİKLET TASARIMININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE YAPISAL ANALİZİNİN OPTİMİZASYONU 490

KENAN KOÇYİĞİT, DR. ÖĞR. ÜYESİ SENAİ YALÇINKAYA

BÖLÜM 20
ÇATI TİPİ KLİMALARDA EKOTASARIM KRİTERLERİ VE SEZONSAL VERİMLİLİK 527

DOÇ. DR. AYHAN ONAT, MEHMET ONUR OKUDAN

BÖLÜM 21
ÇÖP ŞUTU SİSTEMİNİN KULLANIMI VE GÜNCEL TASARIMI 560

KÜRŞAT TANRIVER, DR. ÖĞR. ÜYESİ. SENAI YALÇINKAYA

BÖLÜM 22
KOMPOZİTLERDE KULLANILAN TAKVİYE ELEMANLARININ BAZI UYGULAMA ALANLARI 588

PROF. DR. YUSUF ŞAHİN

BÖLÜM 23
METAL MALZEMELERDE ÇATLAK TESPİTİ VE ONARIM YÖNTEMLERİ 626

ALPER ÖNER, DR. ÖĞR. ÜYESİ SENAİ YALÇINKAYA, EMRE PETEKKAYA

BÖLÜM 24
KOMPOZİT MALZEMELERDE YAYGIN KULLANILAN TAKVİYE ELEMANLARI VE ÖZELLİKLERİ 680

PROF. DR. YUSUF ŞAHİN

BÖLÜM 25
KURŞUNLU VE KURŞUNSUZ PİRİNÇ ALAŞIMLARINDA İŞLENEBİLİRLİK YAKLAŞIMI 714

SERAP ÖZHAN DOĞAN

BÖLÜM 26
MARMARAY DEMİRYOLU HATTINDA RAY KUSURLARININ ULTRASONİK YÖNTEMLE İNCELENMESİ VE RAY KUSURLARININ YOĞUNLAŞTIĞI HAT KISIMLARININ TESPİTİ 740

MAK. YÜK. MÜH. OSMAN KILIÇ, DR. ÖĞR. ÜYESİ SENAİ YALÇINKAYA

ÖNSÖZ

Dünyamızda doğa, sağlık, sosyal vb. alanlarda birçok olumsuzluk yaşanırken; bunların ve diğer problemlerin çözümüne yönelik olarak genel anlamda endüstride, teknolojik gelişmeler zorunluluk halini almaktadır. Kalite rekabeti, konfor arzusu, korku ve endişenin de tetiklediği teknolojik gelişmeler, takipte zorlanılacak derecede ve çok sayıda yüzleştiğimiz bir gerçek olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bağlamda yapılan akademik çalışmalar; kimi zaman açık erişimli siteler, kimi zaman da kongre, panel, süreli yayınlar ve bilimsel kitaplar şeklinde muhataplarıyla buluşturulmaktadır.

Biz de, birbirinden kıymetli akademisyenlerin araştırmalarını kapsayan, yirmi altı farklı bölümden oluşan "Mühendislik Alanında Teknolojik Gelişmeler" adını verdiğimiz bu akademik kitap çalışması ile çorbada tuzumuz olsun istedik. Bu kitabı; yayınlarının önemli bir bölümünü akademik kitaplardan oluşan, Ulusal ve Uluslararası alanda nitelikli faaliyetleriyle oldukça saygınlık kazanmış olan "Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları" aracılığı ile siz değerli bilim insanları ve endüstri çalışanlarının hizmetine sunuyoruz.

Bu kitap, birçok mühendislik konuları ve deneysel çalışmalar ile uygulama yapılmış akademik konulardan meydana gelmiştir. Kitapta; flowforming proseslerinden araç, uçak koltuğunun yapısal analizine, vinç sistemlerinin kullanılmasından dişli çarklara, 3D metal yazıcılara, bazalt takviyeli kompozit malzemelere, gemi gövde saclarından Marmaray Demiryolu hattında ortaya çıkan problemlerin çözümüne kadar birçok önemli konuda değerli araştırma ve deneysel çalışmaları bulacaksınız.

Mühendislik teknolojilerinin birçok ilgi çekici konularına değinilen bölümlerin yer aldığı kitabın, çok sayıda araştırmacının akademik çalışmalarına ışık tutacağına, Yükseköğretim Kurumu kataloglarında, kamu kütüphanelerinde ve kişisel arşivlerde oldukça değerli bir yer bulacağına inanıyoruz.

Uzun zaman alan ve büyük bir titizlikle yapılan çalışmaların sonucu olarak ortaya çıkan bu önemli eserin gerçekleşmesinde emeği geçen saygıdeğer editörlerimize, yazarlarımıza, hakemlerimize ve kitabımızı edinen siz sevgili okurlarımıza teşekkürlerimizi sunarız. Aralık 2020.

Prof. Dr. Hülya KALAYCIOĞLU Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA

In our world, while there are many negativities in the areas of nature, health, social, etc.; technological developments are becoming a necessity in the industry in general for the solution of these and other problems. Technological developments, triggered by quality competition, desire for comfort, fear and anxiety, emerge as a fact that we face in many and difficult to follow. Academic studies conducted in this context; It is brought together with its interlocutors, sometimes in the form of open-access sites, and sometimes in the form of congresses, panels, periodicals and scientific books.

We wanted to have a finger in the pie with this academic book study called "Technological Advances in Engineering", which consists of twenty-six different chapters and covers the researches of valuable academicians. This book; we present it to you, valuable scientists and industry employees through "Güven Plus Grup Inc. Publications" which a major part of its publications consisting of academic books, has gained a great reputation with its qualified activities in the national and international arena.

This book consists of many engineering subjects and experimental studies and applied academic subjects. In the book; You will find valuable research and experimental studies on many important subjects, from flowforming processes to structural analysis of vehicles and aircraft seats, from the use of crane systems to gear wheels, 3D metal printers, basalt reinforced composite materials, from ship hull sheets to solving problems that arise on the Marmaray Railway line.

We believe that the book, which includes chapters dealing with many interesting topics of engineering technologies, will shed light on the academic studies of many researchers, and will find a valuable place in the catalogs of the Higher Education Institution, public libraries and personal archives.

We would like to express our gratitude to our esteemed editors, writers, referees and you, our dear readers, who have contributed to the realization of this important work, which emerged as a result of the long-lasting and meticulous work. December 2020.

Prof. Dr. Hülya KALAYCIOĞLU Assist. Prof. Senai YALÇINKAYA

BÖLÜM 1
ARAÇ ÖN KAPUT MENTEŞESİ TORK ÖLÇÜMÜ VE KALİTE KONTROL BANKOSU TASARIMI

Arş. Gör. Vedat YEĞİN[1], Prof. Dr. Durmuş KARAYEL[2]
[1]Makine Mühendisliği Bölümü, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay / TÜRKİYE
[2]Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya / TÜRKİYE

Öz: Otomotiv sektöründe, kullanıcıların gittikçe artan yüksek performans ve konfor beklentileri, başta otomotiv üreticilerini, dolaylı olarak da yan sanayiyi yeni sistemler ve üretim teknikleri arayışına zorlamaktadır. Bu konfor beklentilerine paralel olarak, günümüzde taşıtlarda mevcut menteşeli hareketli kısımların açılıp kapanma tork değerlerinin de belirli bir aralıkta olması istenmektedir. Bunun doğal bir sonucu olarak, otomobil üreticileri yan sanayiden temin ettikleri menteşelerin öngörülen tork değerlerinde üretilmesini ve bu tür parçalar için öngörülen test ve ölçüm raporlarının tork ölçüm sonuçlarını da içermesini talep etmektedirler. Yapılan çalışmanın amacı araç ön kaput menteşesinin belirli tork aralıklarında (0,2 – 2,5 Nm) olup olmadığının ölçümü için kullanılan bir sistemin tasarlanmasıdır. Bu tez çalışması, otomasyona dayalı kapsamlı bir montaj projesinin parçası olduğundan, tork ölçüm sisteminin de bu ana sisteme uyumlu çalışması istenmektedir. Ayrıca, bu çalışmanın bir başka amacı da proje çıktısı menteşenin kritik kısımlarının boyut ve geometrik ölçülerinin kontrol edilmesidir. Geliştirilen bu sistem ile otomotiv firması tarafından menteşenin açılıp kapanması için gerekli olan tork değerleri belirlenecektir. Bu torkun hali hazırda mevcut sistemlerle geliştirilen montaj sistemine uyumlu olarak ölçülmesi çok zordur. Tasarlanan ve prototipi yapılan sistem ile söz konusu ölçüm kolaylıkla yapılabilecektir. Geliştirilen sistemde servo motor, Tork Sensörü, pnömatik piston, kaplin ve yataklar kullanılmıştır. Bu sistemdeki Verilerin bilgisayara aktarılması ve sistemin bilgisayar kontrollü hale getirilmesi amacıyla DAQ (Data Acquisition) kartından yararlanılmıştır. Bu işlemlerin gerçekleştirilmesi için LABVIEW programında bir arayüz tasarlanmıştır. Arayüz sayesinde servo motorun hassas bir şekilde kontrolü yapılmaktadır. DAQ kartı vasıtası ile sensörden alınan veriler arayüz' e aktarılıp

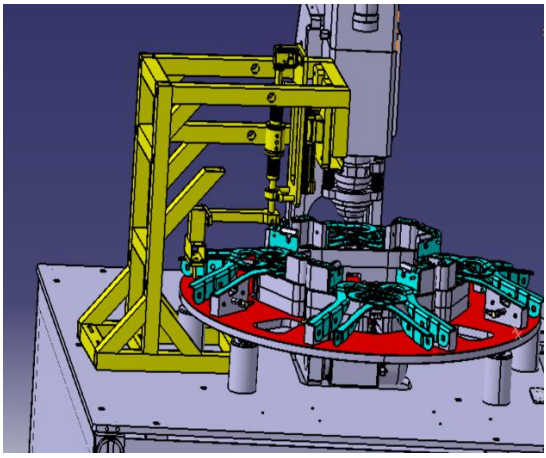
tork değerlerinin istenilen aralıkta olup olmadığı ölçülerek operatörün buna göre onay veya ret vermesi sağlanmaktadır. Tork ölçümü yapıldıktan sonra kalite kontrol işleminin de yapılması gerekmektedir. Kalite kontrol işlemi, tork ölçümü gibi parçanın geçer onayı alması için gerekli olan basamaklardan birisidir. Bu basamakta parçanın ana gövdesi ve döner kol üzerinde belirlenecek olan kritik noktaların kontrolü yapılarak parçanın istenen ölçülerde olup olmadığı algılanacak ve boyutsal ve geometrik toleransların dışına çıkılması halinde parçaya program tarafından ret verilecektir. Yapılan bu çalışmanın bir çıktısı olarak tasarlanan ve prototip imalatı gerçekleştirilen bu tork ölçüm sisteminin sektörde önemli bir boşluğu dolduracağı ve yaygın bir kullanım alanı bulacağı ümit edilmektedir.

GİRİŞ

Büyüme, refah, istihdam ve inovasyonun itici güçlerinden biri olan otomotiv endüstrisi, ülkemiz için de en önemli sektörlerden biridir. Son 7 yıldır üst üste ihracatta ilk sırayı alması ve yaklaşık 400 bin kişilik bir istihdam sağlaması bu durumun açık bir göstergesidir. Otomotiv endüstrisi Cumhuriyetimizin 100. yıl dönümü için ön görülen 2023 stratejik planında da öncü sektörlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Diğer taraftan otomotiv sektörü ihracatının %43'ünü yan sanayi sektörünün oluşturması ve yan sanayi ihracatının %69'unun ise Avrupa Birliği ülkelerine yapılıyor olması çarpıcı bir durumdur. Otomotiv yan sanayii, teknolojinin en hızlı geliştiği sanayi kollarından biridir. Dolayısıyla ön görülen hedeflere ulaşabilmemiz için sektördeki hızlı değişim sürecine ayak uydurabilmek ve rekabet düzeyimizi korumak zorundayız. Bu da yan sanayi sektörümüzün Ar-Ge çalışmalarına önem vermesine bağlıdır.

Diğer taraftan taşıt üretiminde kullanılan imalat yöntemleri içerisinde talaşsız şekillendirme ve özellikle de saç metal parçaların üretimi önemli bir yer tutmaktadır. Bu üretim yönteminde karşılaşılan problemler genelde tecrübeye dayalı olarak deneme yanılma ile çözümlenmeye çalışılmaktadır. Oysa bilgisayar ve otomasyon teknolojilerindeki gelişmeler söz konusu problemlerin üstesinden gelmemizde önemli katkılar sağlayabilecektir. Sektördeki üretim maliyetleri, kalite beklentisi ve verimliliğe dayanan rekabet şartları dikkate alındığında bu durum bir tercih sebebi değil esasen zorunluluktur. Diğer sektörlerde olduğu gibi otomotiv sektöründe de ürünlerin çalışma performansı ve konfor yönündeki müşteri talepleri gün geçtikçe artmaktadır. Dolayısıyla kıyasıya bir rekabetin yaşandığı otomotiv sektöründe bu talepleri karşılamak için yoğun bir çalışma içindedirler. Bu kapsamda aracı oluşturan alt sistem ve hatta her bir uzuv bir Ar-Ge konusu olarak ele alınmakta ve üzerinde çalışılmaktadır.

San-Tez projesi ile yapılmış olan, yeni sistem menteşelerin otomatik olarak montajı, açılıp-kapanma tork ölçümü, montajın kalite kontrolü ile elde edilen verilerin transferi ve değerlendirilmesi işlevlerini yerine getirecektir. Projenin tasarımı aşağıda gösterildiği şekilde yapılmıştır.



Şekil 1. Tork Ölçüm Sisteminin Döner Tablaya Montajlı Hali (b)

Ürünün montajında ana parçalara burç sabit olarak takılmakta ve burcun içerisinden geçirilen perçinin başsız kısmı belli bir kuvvet altında belli bir süre ovalanarak ezilip şekillendirilerek montaj işlemi gerçekleşmektedir. Buradaki montaj sadece parçaların bir birine hareketli olarak bağlanması olarak algılanmamalıdır. Araç cinsi ve araç üzerindeki kullanım amacına göre menteşelerden farklı özellikler talep edilmektedir. Proje konumuz olan otomotiv ön kaput menteşesi için; pozisyonlama hassasiyeti, ergonomik etkiler, çevresel ve kullanım hatalarına karşı arıza durumu ve tork gereksinimi istenilen özelliklerin başlıcalarıdır. Bundan dolayı montaj sonrası ortaya çıkan hareketli mekanizmanın şekil-konum ve alıştırma toleransları önemlidir. Daha da önemlisi son zamanlarda gündeme gelen, menteşenin belli bir aralıkta sabit torkla açılıp kapanmasıdır. Bu tork; malzeme ve boyutlara göre montaj esnasındaki ovalama baskı kuvveti, ovalama hızı ile ovalama süresine bağlı olarak değişmektedir. İstenilen tork için uygun montaj şartlarının ayarlanması çözüm bekleyen bir optimizasyon problemidir.

Mekanizmayı oluşturan parçaların montaj sonrası bir birine göre konumları önemli olmakla beraber bunlar montaj bankosu üzerine yerleştirilen sensörler yardımıyla algılanıp kolaylıkla ölçülebilir. Ancak tork ölçümü için yeni bir alt sistemin tasarlanması ve üretilmesi gerekmektedir. Yapılan literatür taramasında bu iş için özel olarak tasarlanmış herhangi bir ölçüm sistemine rastlanamamıştır. Ancak ticari olarak satışa sunulmuş genel amaçlı değişik kuvvet ve tork sensörleri vardır.

Dolayısıyla ön kaput menteşesinin montaj sistemiyle entegre çalışan bir tork ölçüm cihazının özel olarak tasarlanması ve imalatı gerekmektedir. Bu durum, ana sisteme uyumlu bir mekanik yapının tasarlanması, uygun özellikte sensör ve elektronik donanımların temini ile ölçüm sisteminin montajı ve konfigürasyonunu gerektirmektedir.

Proje konusu, değişik montaj kademeleri, muayene, ölçüm ve kontrol gibi birçok farklı prosesin birbirine bağlı olarak ardışık bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlayan bir sistemin geliştirilmesidir. Dolayısıyla sistem birçok montaj ve test istasyonlarına sahiptir. Bu istasyonların birbiriyle bütünleşik olarak hassas ve senkronize çalışması gerekmektedir. Bu da temel olarak özgün bir sistem mimarisi ile uygun bir algoritmanın hazırlanması, programın yazılması, haberleşme protokollerinin oluşturulması ile gerekli donanımların belirlenerek ana sisteme entegrasyonunun gerçekleştirilmesine bağlıdır.

Ayrıca menteşe mekanizmasını oluşturan parçaların geometrik toleransları da sistemin performansını etkilemektedir. Halen manuel olarak geometrik toleranslar için ürünün kalite kontrolü gerçekleştirilmektedir. Fakat günümüz elektronik ve bilgisayar teknolojisi kullanılarak bu kalite kontrol sisteminin de güncelleştirilmesi mümkündür. Böylece hem ölçüm güvenirliliği ve hem de sürecin hızlanması sağlanacaktır.

Montaj sonrası ortaya çıkan menteşenin istenilen sabit tork değerini belirlenen tolerans aralıklarında sağlayıp sağlamadığının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı tork ölçümü için yeni bir alt sistemin tasarlanması ve üretilmesine ihtiyaç vardır.

Yaptığımız çalışma ‘Otomotiv Sektörü için Menteşe Tork Ölçümü ve Kalite Kontrol Bankosu Tasarımı ve Prototip İmalatı’ olup bu sistemden beklenen özellikler pozisyonlama hassasiyeti, ergonomik etkiler, çevresel ve kullanım hatalarına karşı arıza durumu ve belli bir aralıkta sabit tork gereksinimidir. Bundan dolayı montaj sonrası ortaya çıkan hareketli mekanizmanın şekil-konum ve alıştırma toleransları önemlidir. Daha da önemlisi son zamanlarda gündeme gelen, menteşenin belli bir aralıkta sabit torkla açılıp kapanmasıdır.

Tork ölçümünün yanında şekil ve konum ölçümlerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Şekil ve konum kontrolü, montajlanmış menteşenin mekanik ölçümlerini, delik konumlarını ve çaplarını ayrıca menteşe parçalarının paralellik ölçümlerini içermektedir. Şekil, konum ve tork ölçümü parçanın kalite kontrolden geçer onayı alması için gerekli olan basamaklardır. Bu basamakta parçanın ana gövdesi ve döner kol üzerinde belirlenecek olan kritik noktalardan ölçü kontrolü

yapılarak parçanın istenen ölçülerde olup olmadığı algılanacak ve istenmeyen değerler okunursa parçaya program tarafından ret verilecektir. Bu kontrollerin yapılabilmesi için proje kapsamında yapılan 2. döner tabla üzerinde ana gövdenin bağlanacağı fikstür ve döner tabla üzerinde kritik noktalara fiber optik mesafe ölçüm yerleştirilmiştir. Fiber optik mesafe ölçüm sensörlerinden elde edilen veriler, döner tabla gövdesi üzerine yerleştirilmiş olan ana kontrol birimine gönderilmektedir. Ana kontrol birimi, tork ölçüm sonucunu ve şekil-konum ölçümü sonuçlarını beraber değerlendirerek parça için onay veya ret durumuna karar vererek operatör paneli üzerinden bilgilendirme yapmaktadır.

Esasen günümüzde farklı sektörler için değişik tork ölçüm sistemleri geliştirilmiştir. Bu tork ölçüm sistemleri genelde aynı amaca yönelmesine karşılık her bir sektör için önemli yapısal farklılıklar içermektedir. Dolayısıyla, her bir sektör için yapılacak tasarım ayrı bir araştırma çalışmasını gerektirmektedir. Bu nedenle araştırmacılar değişik sektörler için farklı tork ölçüm sistemleri üzerine çalışmışlardır. Tez çalışmamıza öncelikle ilgili literatür gözden geçirilerek bu özgün tasarımın gerçekleştirilmesinde bir kısım literatürden kısmen yararlanılmaya çalışılmıştır. Konu hakkında yapılan literatür araştırması aşağıda özet olarak sunulmaktadır.

K. Kaya ve arkadaşları; Tek akslı bahçe traktörünün farklı ekipmanlarla çalışma koşullarında tork ve çeki kuvvetini ölçmek üzere bir ölçüm düzeneği geliştirmeyi amaçlamışlar ve bu amaçla bir ölçme sistemi tasarlamışlardır. Sistem temel olarak bir torkmetre ve yük hücresinden oluşmakta olup traktörün arkasına monte edilebilecek şekilde bir şaseye sahiptir. Yazarlar geliştirdikleri bu üniversal sistemi kuvvet ve tork ölçümü için traktörün arkasına takılan değişik araç ve gereçler üzerinde test etmişler ve olumlu sonuçlar elde etmişlerdir[1].

V.Niskanen ve J.Ahola tarafından yapılan başka bir çalışmada; Elektrik motorlarındaki torku ve salınımları ölçmek üzere bir sistem geliştirilmiştir. Bu kablosuz tork ölçüm sistemi ölçüm yapılacak sisteme kolay bir şekilde entegre edilecek tarzda tasarlanmıştır. Yapılan sistemin çalışması laboratuvar testleri ile kontrol edilmiş ve istenen sonuçlar elde edilmiştir [2].

Volanlarda çıkış torkunu ölçmek üzere Z.Jibin ve arkadaşları; tarafından bir tork ölçüm sistemi yapılmıştır. Ölçüm sisteminin geliştirilmesinde Sonlu Elemanlar metodu kullanılmıştır[3].

D.Petreuş ve arkadaşları; elektronik bir tork ölçüm sistemi tasarlamayı amaçlamışlardır. Bu amaç doğrultusunda tasarlanan sistem dönen bir verici ve sabit bir alıcı olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Sistemde gerinim ölçer (

strain gauge) kullanılmıştır. Milin üzerine monte edilmiş bir verici bulunmaktadır. Kullanılan strain gauge tork ile ilgili bilgileri işler ve dönen transformatör yardımıyla bir alıcıya gönderir. Böylelikle ölçülmek istenen tork tasarlanan bu sistemle kontrol edilmiş olur. Çalışmanın sonucunda tasarım denklemleri, simülasyonu ve deneysel sonuçlara da yer verilmiştir [4].

Günümüzde yüksek hız, düşük ağırlık, yüksek verim talep edilmektedir. Bu tarz çalışma şartlarında ani değişiklikler sonucu dayanım açısından kritik durumlar oluşabilmektedir. Dolayısıyla bu çalışma şartlarında sistem torkunun çalışma boyunca ölçülmesi arzu edilmektedir. Bundan dolayı konuyla alakalı araştırmacılar çalışmalarını bu tür çalışma şartlarında tork ölçümü üzerine yoğunlaştırmışlardır. Sonuç olarak farklı özellik ve yapıda çeşitli tork ölçüm sistemleri geliştirilmiştir[5,6].

Özellikle uzun şaftlarla yüksek güç ve moment iletilmesinde tork ölçülmesinin temaslı sistemlerle gerçekleştirilmesi oldukça zordur. Bundan dolayı temassız ölçüm sistemleri geliştirilmiştir [7].

Wendyam F. Traoré; bu çalışmasında yeni bir metot ile senkron bir jeneratörde manyetik direnç Sensörü (giant magnetoresistive sensor) ve ayrık Maxwell gerilme tensörü kullanılarak anlık tork tahmini yapmıştır [8].

Dong Fang ve Xu Zhe; tasarlamış oldukları dinamik tork ölçme sistemini anlatarak dinamik tork ölçümünde göz önüne alınacak hususlara dikkat çekmişlerdir [9].

Georg Wegener ve Thomas Bruns endüstride kullanılan tork ölçme yöntemlerinden ayrıntılı olarak bahsettikleri çalışmalarında özellikle dönme hareketine sahip sistemlerde tork ölçümü üzerinde durmuşlardır. Bu tür sistemlerde tork ölçümünün zorlukları üzerine vurgu yaparak bunlar için kullanılan ölçüm sistemlerinin karakteristiklerini ele almışlardır. Ayrıca bu konuda yapılan uygulama çalışmalarını sunmuşlardır [10].

Alan S. Morris ve Reza Langari; tork ölçümünü yük hücresinin özel bir formunu kullanarak yapmışlardır. Ayrıca yapılan çalışmada tork sensörlerinin kalibrasyonu hakkında geniş bilgi sunmuşlardır [11].

M. Köster ve M. Thommes; ekstrüzyon işleminde vidalar üzerine gelen torkun ölçülmesi ile ilgili yaptıkları çalışmayı sunmuşlardır [12]. Mikro teknoloji alanında kullanılan millerin torkunun ölçülmesi de ayrı bir önem arz etmektedir. Peter Sue ve arkadaşları 200 μm çapında 10^{-4} Nm' lik tork ölçmek üzere bir sistem geliştirmeyi amaçlamışlardır. Geliştirilen tork ölçüm sistemi strain gauge tabanlı

olup Strain gauge ‘in bir çubuk üzerine yapıştırılmasıyla elde edilmiştir. Geliştirdikleri ölçüm sistemiyle hassas cihazlarda sürtünme torkunu oldukça yüksek bir doğrulukla ölçmeyi başarmışlardır [13].

Li Sun ve arkadaşları; enerji üretim tesislerinde türbinlerin torkunu ölçmek üzere özel bir tork ölçüm sistemi geliştirmişlerdir. Sistem optik esaslı olup temassız olarak ölçüm yapmaktadır[14].

Jan Zakrzewski; mevcut tork ölçme sistemlerinin hassasiyetlerini yetersiz bularak bunları geliştirmeyi amaçlamıştır. Bu amaçla mevcut bazı tork ölçüm sistemleri ile uyumlu çalışabilecek yazılım geliştirmiş ve böylelikle ölçüm hassasiyetini arttırmayı başarmıştır [15].

M.Verazic ve arkadaşları; otomotiv endüstrisi için torku doğrudan tekerlek üzerinden ölçebilecek bir ölçüm sistemi geliştirmişlerdir. Oldukça basit bir yapıya sahip olan bu sistemin maliyeti emsallerine göre çok düşüktür [16].

L. Baghli ve arkadaşları; mikro elektromekanik sistem ivmesi ve yüksek frekanslı RF vericisine dayalı kablosuz anlık tork ölçüm sistemi üzerinde çalışmışlardır. Makinenin döner milleri üzerindeki anlık tork ve hız ölçümleri için bir sistem geliştirmişlerdir. Sistemi tahrik etmek için kullanılan asenkron motorun kontrolü için çeşitli kontrol algoritmalarını yürüten bir DSP (dijital sinyal işleme) kartı kullanmışlardır. Sistem üzerinde asenkron motorun akım gerilim ilişkilerinden tork dalgalanmalarını elde etmişler ve böyle bir sistemde kablosuz ölçümün mümkün olduğunu göstermişlerdir [17].

Tristan M. Ericson ve arkadaşları; yaptıkları çalışmada, güç yoğunluğunu arttırmak için kullanılan planet dişlilerde oluşan gücü ölçmek için tork ölçümüne ihtiyaç duyulmuştur. Planet dişlilerde oluşan torku ölçmek için dişlilerden çıkan şafta loadcell , dişlilerin olduğu kısma ise tork sensörü bağlanarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elden edilen sonuçlara bakılarak farklı dişliler kullanılarak uygulanan kuvvetler ile çıkan kuvvetler arasında ki fark irdelenmiştir [18].

Qiaokang Liang ve arkadaşları; yaptıkları çalışmada piyasada bulunan tek bir yönden gelen kuvvetleri ölçen bir sensör değil de, 6 eksenli E-tipi farklı bir sensör imal etmektir. Ansys yardımıyla Tasarımı yapılan tork sensörünün üzerine yük uygulandığında oluşan eğim, sehim ve deformasyonlar incelenmiştir. Ayrıca sensörün kalibrasyonu ise yapay sinir ağları metodu kullanılarak kalibrasyon işlemi %0,17 hassasiyetle yapılmıştır [19].

Georg Wegener ve arkadaşları, dinamik çalışma koşulları altında oluşan tork ölçümlerinin izlenebilirliğini sağlamak için iki yöntem uygulamışlardır. İlk yöntem döner tork dönüştürücü kullanarak, ikinci yöntem ise bir dinamometre

monte ederek izlenebilirlik sağlanmıştır. Tork dönüştürücüler tarafından elde edilen değerler referans tork değeri ile karşılaştırılmış ve istenen sonuçlar elde edilmiştir [20].

M. Chandra ve arkadaşları; çalışmalarında hizalama kullanılarak tork ölçümleri tespit etmek için alternatif bir yöntem sunmuşlardır. Aynı zamanda açısal kayma tork sinyalleri ve paralel hizalama sonrasında ki oluşan tork sinyalleri farklı spektral özelliklere sahip olacağı görülmektedir. Tork sinyallerinin dalgacık spektrumu süreklidir ve tork bileşeni istikrarlı ve dolayısıyla ölçüm için yeterli olduğu kanısına varmışlardır [21].

Sarmad Shams ve arkadaşları; bu çalışmalarında kompakt, hafif ve monolotik tork sensörü geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri bu sensörünün kalınlığı sensör aralığı azaltılmadan mevcut sensörler ile karşılaştırıldığında 11 mm kadar indirgenir. Geliştirdikleri bu sensör 40 Nm'yi hassas bir şekilde ölçebilmektedir. Geliştirilen sensörün simülasyonları Ansys ile yapılmış ve simülasyon sonucunda sensörün yüksek hassasiyette olduğu görülmüştür [22].

Frank Umbach ve arkadaşları; yaptıkları çalışmalarında temassız tork ölçümü için mikromekanik sensör üzerindeki çalışmaların mevcut durumu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Sensör bir manyeto prensibini kullanır ve burada silikon imal edilir. Ölçüm yapılacak olan mekanizma üzerine bu sensör yerleştirilerek temassız tork ölçme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Ölçülen tork değerleri referans değerler ile karşılaştırılarak kalibrasyon işlemleri yapılmış ve istenen sonuçlara ulaşılmıştır [23].

Yazarlar bu çalışmalarında tork sensörü kullanmadan DC motorların torkunu tahmin edebilecek bir yöntem üzerinde çalışmışlardır. Bu yöntem online gri bulanık PID ayar adlı adaptif kontrol tekniği kullanarak modelleme yöntemine dayanmaktadır. Burada, PID algoritmasına dayalı OTF PID (online tuning fuzzy) kontrolör motor hızı motor torkunu tahmin etmektir [24].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, geliştirilen tork ölçüm sistemlerinden bazıları yapı olarak tez konusu torkmetreye benzemesine karşılık, yapılan literatür araştırması kapsamında aynı işlevi yerine getirebilecek bir ölçüm sistemine rastlanılamamıştır. Dolayısıyla yapı ve çalışma prensibi bakımından mevcut sistemler kısmen örnek alınmış ve torkmetrenin tasarımında tork ölçümü yapılacak menteşeye uygun özgün yeni bir sistem geliştirilmiştir.

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmakta olup, giriş bölümünde; çalışmanın gerekçesi, çalışmaya zemin oluşturan literatür araştırmasının özeti ve yapılan ça-

lışma kısaca anlatılmaktadır. Çalışmanın ikinci bölümünde ise, tasarlanan sistemin mekanik ve kontrol kısmının tasarımı ve sitemin donanımın da kullanılan malzemelerin tanıtımı yapılmaktadır. Üçüncü bölümde, tasarlanan sistemin prototipinin imalatı ve montajı, geliştirilen bilgisayar kontrollü sistemin yapısı ve çalışma prensibi açıklanmaktadır. Dördüncü bölümde, yapılan sistemin testleri ve doğrulanması verilmektedir. Beşinci bölümde ise yapılan tez çalışması ile ilgili sonuçlar ve öneriler yer almaktadır.

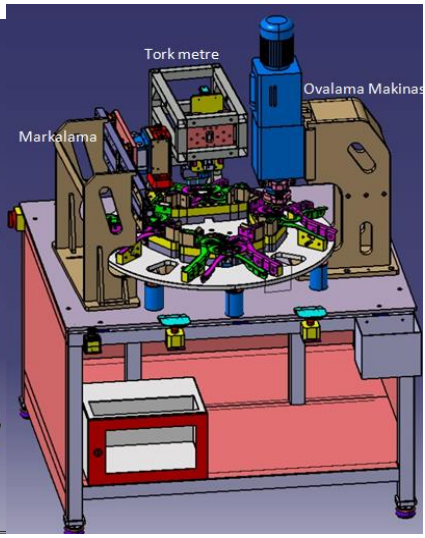
SİSTEMİN TASARIMI

Tork ölçümü ve sistem tasarımı

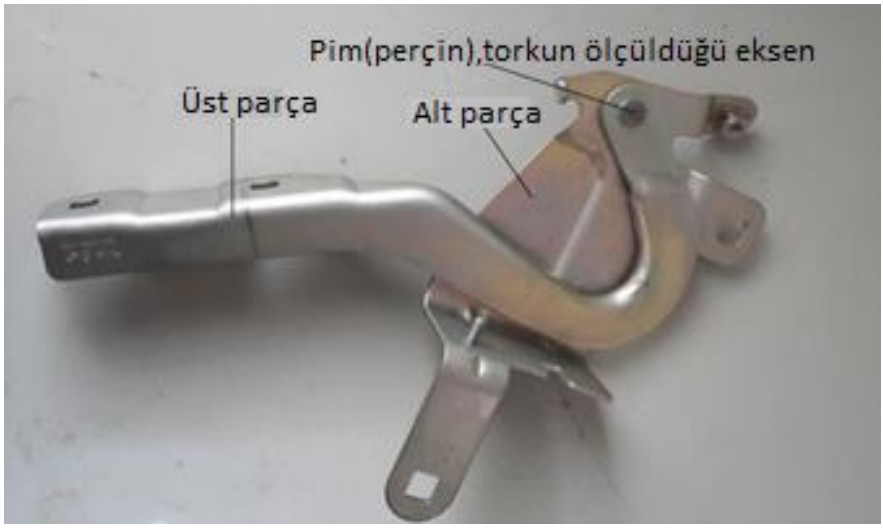
Tork; açısal, yer değişimi veya uzama sensörleri vasıtasıyla mildeki burulmanın ölçülmesiyle bulunur. Bu gayeyle, özel torkmetreler, flanşlar veya yatak haricinde direkt şafta bağlanarak kullanılabilirler. Diğer bir yöntem ise, uygulanan yüke göre milin burulmasını temel almaktır. Uygulanan yük sonucu oluşan sinyalin gönderimi şaftın dönüp dönmediğine bağlıdır. Eğer şaft dönüyorsa mil üzerindeki dönen sensörler sinyallerini elektronik sinyal işleme kartıyla veya herhangi bir bağlantı olmadan temassız bir şekilde gönderir.

Mil burulma ölçümleri 2 yöntemle gerçekleştirilir. Birinci ölçüm yöntemi mil eksenine 45° eğimle yerleştirilen gerinim ölçer yardımıyla yapmak. İkinci ölçüm yöntemi ise bobinlerden geçen voltajı ölçerek geçirgenlikteki değişimi ölçmektir. Her iki ölçüm yöntemiyle de doğrudan mile ve özel torkmetrelere bağlı olarak uygulanabilir. Tork ölçümüyle alakalı ilave yöntemlere kuvvetin akış yönüne doğru yerleştirilen yüzey rezonatörü ve piezoelektrik sensörlerinin kullanımı bunlara örnek olarak verilebilir [25]. Çalışmada ele alınan Tork Ölçüm Sistemi, Menteşe Montaj Bankosu Mekatronik Sistem Tasarımı ve Prototip İmalatı isimli kapsamlı bir projenin kalite kontrol modülüne (iş istasyonuna) ait bir alt sistemdir. Söz konusu montaj bankosu Şekil 2 ve Şekil 3’ de ve torku ölçülen menteşe ise Şekil 4’ de gösterilmiştir.



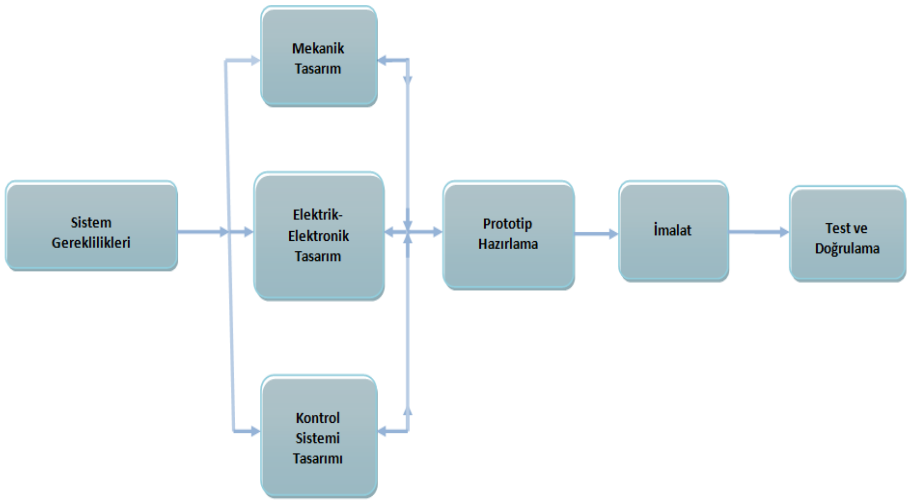


Şekil 2. Menteşe Montaj Bankosu (a), Şekil 3. Menteşe Montaj Bankosu (b)



Şekil 4. Torku Ölçülen Menteşe

Bu yaklaşımın uygulanmasıyla alakalı iş akışını blok diyagram halinde gösteren sistem mimarisi Şekil 5' de gösterilmiştir.



Şekil 5. Sistem Mimarisi – Mekatronik Sistem Yaklaşımı

MEKANİK TASARIM

Yeni sistemin mekanik tasarımına başlanmadan önce tork ölçümü için hali hazırda kullanılmakta olan sistemin incelenmesinin faydalı olacağı düşünülmüş ve mevcut sistem temel fonksiyonlar açısından gözden geçirilmiştir. Mevcut tork ölçüm sisteminde, her parti ürün için 30 adet menteşe seçilmektedir. Bu menteşelerin her biri ayrı ayrı ölçülüp listelenmektedir. Bu ölçümler kaydedilip hepsinin ortalaması alınmaktadır. Eğer ölçüm sonucu istenen aralıklarda ise o parti ürünün tamamı testi geçmektedir. Bu şekilde her parti içindeki menteşelerin tamamının uygun olup olmadığına karar verilmektedir.

Tablo 1. Menteşeler Üzerinden Ölçülen Değerler

	Menteşe sayısı				
	1	2	3	4	5
1. Çalışma torku (Nm)	1,90	1,96	2,10	2,00	1,80
	Menteşe sayısı				
	6	7	8	9	10
2. Çalışma torku (Nm)	1,78	1,50	1,84	1,72	1,98
	Menteşe sayısı				
	11	12	13	14	15
3. Çalışma torku (Nm)	1,96	2,06	2,10	1,58	1,95

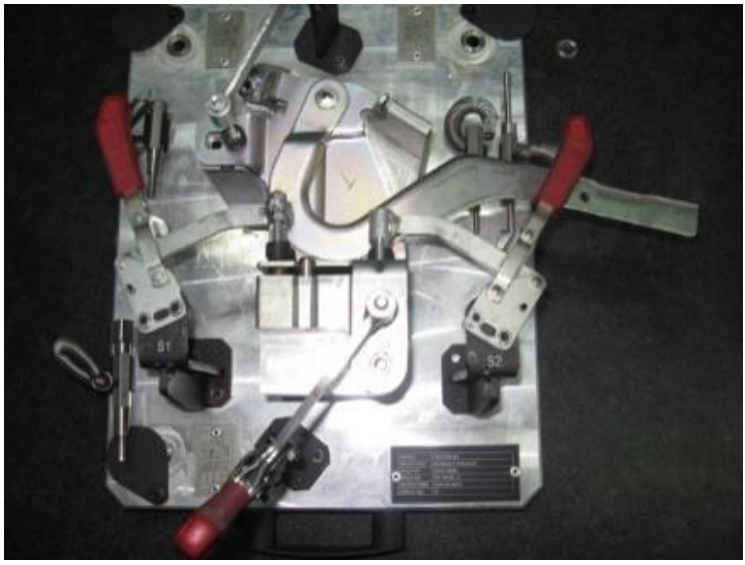
Ortalama
1,88

	Menteşe sayısı				
	1	2	3	4	5
4. Çalışma torku (Nm)	2,00	1,78	1,97	2,23	2,16
	Menteşe sayısı				
	6	7	8	9	10
5. Çalışma torku (Nm)	1,75	1,64	1,72	1,82	1,78
	Menteşe sayısı				
	11	12	13	14	15
6. Çalışma torku (Nm)	1,86	2,32	2,28	2,10	1,84

Ortalama
1,95

Mevcut sistem ile yapılan tork ölçümü aşağıda gösterildiği şekilde yapılmaktadır.

1- Menteşe fikstüre bağlanır,



Şekil 6. Menteşe Fikstür Bağlantısı (a)

2- İleri geri hareket ettirilir ,





Şekil 7. Menteşe Fikstür Bağlantısı (B)

3- Kuvvetin değeri kontrol edilir ,



Şekil 8. Menteşe Tork ölçümü

4- Matematiksel işlemler yapılarak uygulanan torkun değeri aşağıdaki gibi hesaplanır ,



Şekil 9. Tatbik Noktasının Ölçülmesi

Tork = kuvvet x Mesafe = 5.40 (N) x 0.26 (m) =1.40 Nm

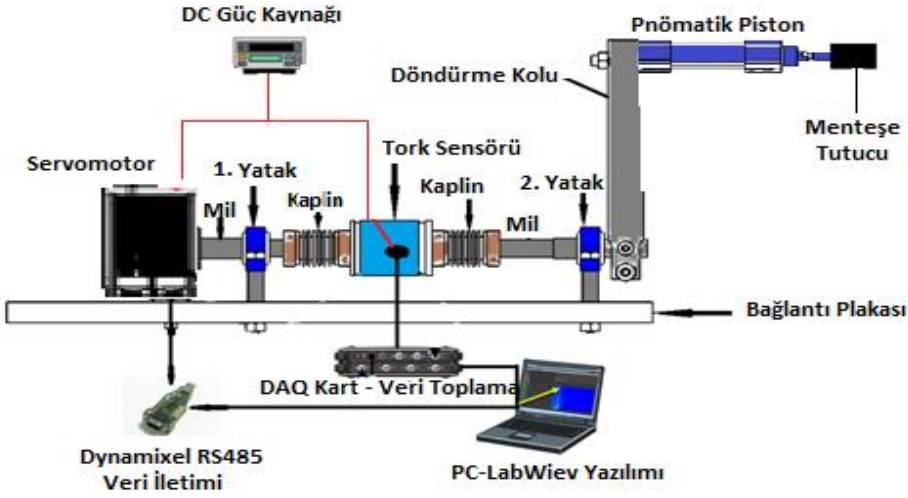
5- Sonunda menteşenin kendi ağırlığı altında açılıp kapanması kontrol edilir ve işlem tamamlanır,

Bütün bu işlemlerin sonunda ölçülen menteşe istenen tork aralığında ise ONAY verilir. Eğer menteşe istenen tork aralıklarında değil ise RET verilir. Ay-

rıntılı olarak yapılan açıklamadan anlaşılacağı üzere mevcut klasik ölçüm sisteminde üretilen bütün menteşelerin tork ölçümü yapılmayıp sadece örnekleme yöntemiyle alınan numunelerin kontrolü yapılmaktadır. Bu durum çoğu zaman geneli yansıtmamakta ve oldukça uzun zaman almaktadır.

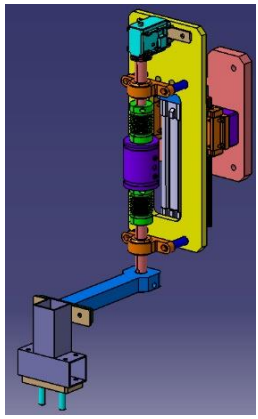
Ayrıntılı Tasarım

Tasarımı yapılan ve prototipi üretilen tork ölçüm düzeneği aşağıda şekil 10 ve şekil 11'de gösterilmektedir.



Şekil 10. Geliştirilen Tork Ölçüm Sistemi

Geliştirilen bu sistem, 1 adet servo motor, 1 adet Tork Sensörü, kontrol ünitesi (Bilgisayar), DAQ kartı, LabVİEW Arayüzü, 2 adet kaplin, 1 adet pnömatik piston, 2 adet yatak, bağlantı elemanları ve millerden oluşmaktadır. Sisteme ait standart elemanlar hazır alınmış, üretimi gereken diğer elemanlar ise Sakarya Üniversitesi'ne ait atölye ve laboratuvarlar kullanılarak imal edilmiştir. Bu bileşik tertibatın sistematik ve hassas bir şekilde çalışması için sensör ve servo motordan alınan veriler DAQ kart vasıtasıyla LabVİEW ile tasarlanan ara yüze gönderilmiş ve burada servo motorun istenen açı değerleri (0 - 720) arasında hareket ettirilmesi sağlanmıştır.



Şekil 11. Tork Ölçüm Sistemi Tasarım Resmi

Sensörden alınan verilerle ölçülen menteşenin istenen değerler arasında olup olmadığı kontrol edilmekte ve ölçülen malzemenin tork değeri firma tarafından belirlenen aralıklarda ise ‘onay’ değilse ‘ret’ verilerek böylelikle istenen işlem tamamlanmış olmaktadır. Sonraki kısımlarda, farklı başlıklar altında, hazır elemanların teknik özellikleri verilerek kısaca tanıtımı yapılmıştır.

Servo motor

Servo motor, bir mekanizmada son kontrol elemanı olarak görev yapan motordur. Genellikle güç sağlayan motorlar belirli bir hızda dönmeye göre tasarlanırken servo motorlar çok geniş bir hız komutunu yerine getirecek şekilde tasarlanır. Servo motorlar kullanıcının komutlarını yerine getiren motorlardır. Komutlar, pozisyon ve hız komutları veya hız ve pozisyonun birleşimi olabilir. Bizim kullandığımız MX 64R serisi, PID kontrolü, 360 derece pozisyon kontrolü ve yüksek hızlı iletişim gibi hassas kontrol gerektiren gelişmiş uygulamalar için geliştirilen bir modeldir. MX-64R serisi RS-485 iletişimini destekler. Servo motorun, çalışma esnasında ki sıcaklığı, çalışma torku ve istenen açı değerlerinde çalışması gibi birçok özelliği geliştirilen bir yazılım ile manuel olarak kontrol edilebilmektedir. Biz bu çıktılar vasıtasıyla LabVİEW arayüzüne istediğimiz terminalde ki verileri alarak görmek istediğimiz skalayı entegre edebilmekteyiz. Bu yüzden MX R64 model servo motorun kullanılması uygun bulunmuştur.

Tork sensörü



Şekil 12. Şaft Tipi Tork Sensörü

Seçmiş olduğumuz 8645 serisi tork sensörünün hassasiyeti %1 olup, ölçüm Aralığı 0 - 17.5Nm'dir. Bunun anlamı her ölçümde 0.175Nm'lik hassasiyetimizin olmasıdır. Bu tork sensörünü seçmemizin amacı firma tarafından bize aktarılan menteşe standartlarının sınırlarıdır. Menteşenin çalışma sınırları 0 – 2,5Nm aralığındadır. Bu çalışma sınırları için 0 – 7,5Nm aralığındaki tork sensörü kâfi gelmektedir. Fakat menteşe üretimden çıktıktan sonra oluşan çapaklardan dolayı ilk açılıp kapanma torku (takat torku) 10Nm civarındadır. Sensörün zarar görmemesi açısından 8645 serisi '0 - 17,5' Nm aralıklı tork sensörü tercih edilmiştir.

Çalışma prensibi

8645 serisi sensörde uygulanan torku elektrik gerilimine dönüştüren yeni EMD (Elektromanyetik diyafram) teknolojisi kullanılmaktadır. Nikel içerikli çelik mile sabit bir manyetik patern uygulanır. Tork, manyetik alanla birlikte bu paterni değiştirir. Sonuç olarak sensör statorun EMD elektronik devresi tarafından işlenmesi için torka bağlı bir ölçüm sinyali oluşturur. Transfer fonksiyonu sadece milin mıknatıslanmasına bağlı olarak (gerinim ölçer ve kablolama olmaksızın) elde edilir. Böylece sensör üzerindeki özel entegre devre (ASIC) kullanıcıya torkla orantılı elektrik gerilimi oluşturur. 8645 serisi yeni EMD (Gömülü Manyetik Alan) teknolojisi sayesinde, sabit durumdan sürekli yüksek hızlara kadar tüm statik ve dinamik torkları ölçebilmektedir. Güvenilirlik ve hepsinin ötesinde çok düşük maliyetli olması da hâlihazırdaki uygulamaların yanında yeni imkânlar yaratmaktadır.

Kaplin

Makinalarda hareketli bir ekipmandan başka bir ekipmana emniyetli hareket iletimi sağlamak için kullanılan önemli bir makine elemanıdır. Hareketi iletme esnasında makinada oluşan mekanik titreşimleri ortadan kaldırmak için titreşim sönümleyici özelliğine sahip kaplin lastiği kullanılmak zorundadır. Bu malzeme kullanılmadığı takdirde zuhur edecek mekanik titreşimler makinaya ve makine elemanlarına zarar verebilir ve kulağa hoş gelmeyen sesler çıkarabilir. Kaplinler

iki parçalı veya üç parçalı, üreten firmaya göre çok parçalı da olabilirler Sistem içerisinde basit gibi görünen, takıldığı makinaya göre de en ucuz eleman gibi görünen kaplinler; seçiminde, montajında dikkatli davranılmadığında üretimin en pahalı elemanı haline gelir. Monte edildiği makinanın rijit durmasına vesile olur.

Makinalı çalışmaların tümünde (özellikle endüstriyel) üretim hattındaki bir halkanın aksaması tüm sistemi etkileyeceğinden, kaplinlerin seçimi montajı ve kontrolleri son derece önem arz etmektedir. Kaplin seçiminden doğacak hatalar nedeniyle işletmelerde üretim kesintileri meydana gelir. Genel olarak ifade edecek olursak irtibat elemanlarının görevi, tahrik elemanı olan motor veya döndüren ile döndürülen eleman arasında irtibat sağlamak ve bu şekilde hareketi iletimini sağlamaktır.

Yapmış olduğumuz tork ölçüm sistemimizde 2 adet kaplin kullanılmıştır. Bu kaplinler aynı boyut ve toleranslardadır. Aşağıda kullanılan kaplinlerin teknik çizimleri ve boyut toleransları görülmektedir. Aşağıda teknik özellikleri verilen kaplinin seçilmesinin nedeni kullanılan tork sensörü ve servo motorun hassas olması ve bundan dolayı da oluşan eksen kaçıklıkların minimum seviyeye indirilmesi ve çalışma esnasında oluşan titreşimlerin maksimum düzeyde absorbe edilebilmesi için bu kaplinin kullanılması uygun bulunmuştur.

Tablo 2. Kaplinin Teknik Özellikleri

Büyüklük	Birim	Değer
Döndürme Momenti	(Nm)	18
Toplam Uzunluk (A)	(mm)	58
Dış Çap (B)	(mm)	49
Uygun Uzunluk (C)	(mm)	21.5
Sabitleme vidası ISO 4762	(mm)	M5
Sabitleme vidası sıkma momenti	(Nm)	8
Merkezler arasındaki mesafe	(mm)	17
Mesafe (G)	(mm)	6.5
Atalet momenti	(10^{-3} kğm^2)	0.065
Göbek malzemesi	-	Al
Ağırlık	(kğ)	0.16
Burulma momenti	(10^3 Nm/rad)	23
Eksenel	±(mm)	1
Yanal	±(mm)	0.2
Açısal	±(derece)	1

Millerin burulma hesabı ve imalatı

Mil; genellikle iki bölgeden yataklanmış olan ve dişli çark, zincir dişlisi, kavrama göbeği, rotor vb. parçaları üzerinde taşıyan önemli bir makina elemanıdır. Miller, tahrik elemanı vasıtasıyla güç iletimini sağlayan döndürme momentiyle burulmaya, üzerinde taşıdığı parçalardan kaynaklanan yüklerden dolayı da eğilmeye zorlanırlar. Yapım ve yataklama kolaylığı ve mukavemet üstünlüğü bakımından miller genellikle dairesel kesitli yapılırlar.

Şekildeki gibi karşılıklı burulma çiftlerinin etkisi altındaki elemanlar göz önüne alındığında, gerilme ve şekil değiştirmeler kesit biçimine bağlıdır.

Daire ya da halka biçimindeki çubukların burulması mukavemette kullanılan basitleştirilmiş yöntemlerle elde edilebilir. Burulmaya maruz elemanlar birçok mühendislik uygulamasında yer alırlar. En yaygın uygulama alanları olarak güç iletim milleri, buhar türbinleri, elektrik jeneratörleri, araç motorları, rüzgâr türbinleri vs. örnek gösterilebilir.

Tork ölçüm düzeneği tasarlarken motor bağlantı mili, piston kolu ve piston kolu bağlantı mili olmak üzere toplamda 3 adet mil imal edilmiştir.

Pistonun bağlı olduğu içi boş olan bu mil menteşeyi hareket ettirdiği zaman burulmaya zorlanır. Ölçüm sırasında milin dayanabileceği maksimum burulma momenti aşağıda verilen formüller ile hesaplanmaktadır.

Verilenler :

$\tau_{max} = 120\ MPa$ (emniyetli kayma gerilmesi)

T_{max}= 5 Nm (Mile uygulanacak maksimum moment (Tork))

Aşağıda verilen denklem 2.1 ve denklem 2.2 den milin maksimum ne kadar momente dayanabileceği hesaplanmıştır.

$$T = \frac{J.\tau_{max}}{C} \quad \textbf{(2.1)}$$

$$J=\frac{1}{2}\pi({C_2}^4 - {C_1}^4) \quad \textbf{(2.2)}$$

T= Burulma momenti (Tork) (Nmm)

τ = Kayma Gerilmesi

J= Polar Atalet Momenti

C= Yarıçap

$$J=\frac{1}{2}\pi({C_2}^4 - {C_1}^4)$$

$$J=\frac{1}{2}\pi(15^4 - 13^4)$$

$$J=\mathbf{34{,}6*10^3\ mm^4}$$

$$T = \frac{J.\tau_{max}}{C}$$

$$T = \frac{34{,}6*10^3 * 120}{15}, \qquad T = \mathbf{0{,}2768\ KN.m}$$

Milin maksimum dayanabileceği moment 276,8 Nm'dir. Sistemde ölçüm yapacağımız zaman oluşacak maksimum moment değeri de 5 Nm'dir. Bulunan ve varolan değerler dikkate alındığı zaman ölçüm için bu milin kullanılması uygun görülmüştür. Aşağıda mil üzerinde oluşan minimum kayama gerilmesi hesaplanmıştır. (Denklem 2.3)

$$\tau_{min} = \frac{T.C_{min}}{J} = \frac{276{,}8*10^3\ Nmm*13mm}{34{,}6*10^3 Nmm^4} = \frac{104N}{mm^2} = \mathbf{104\ MPa} \quad \textbf{(2.3)}$$

Rulmanlı yatak

Yapılan Tork ölçüm düzeneğinde piyasadan kolay temin edilebilen maliyet bakımından da uygun iki adet UCP 203 serisi rulmanlı yatak kullanılmıştır. Bu yatak türünde 6203 serisi tek sıralı sabit bilyeli rulman kullanılmıştır. Yapılmış olan ölçüm sistemi üzerine radyal ve eksenel yönde çok büyük yüklere maruz kalmayacağından dolayı 6203 serisi rulman tercih edilmiştir. 6203 serisi rulmanda L_h = 8500 saat ömür, n = 63 rpm ve C = 1040 daN için rulmanın taşıyabileceği eşdeğer yük aşağıda gösterildiği gibi hesaplanmıştır. (Denklem 2.4)

L_h=8500 saat

N= 63 rpm

C= 1040 daN (6203 serisi rulman için dinamik yük katsayısı)

$$\mathrm{F} = \mathrm{C}\sqrt[P]{\frac{10^6}{L_h}.60n} = 1040\sqrt[3]{\frac{10^6}{8500}.60.63} = \mathbf{327\ daN} \quad \textbf{(2.4)}$$

Bu rulman sadece radyal yüke maruz kaldığından dolayı **F= F_r= 327 daN'** dur.

UCP 203 serisi rulmanlı yatağın tercih edilmesinin sebebi, bir alt seri olan UCP 202 rulmanlı yatağın hem maliyet açısından yüksek olması hem de yatak içerisinde kullanılan rulmanın iç çapının küçük olması daha küçük çaplı bir mil kullanmayı gerektirmektedir. Buda yatakta kullanılacak olan milin burulmaya karşı olan direncini düşürecektir. Yani ölçüm sırasında oluşan torkun mili daha kolay bir şekilde buracağı ve bu yüzdende bu yatağın kullanımının uygun olmadığı görülmüştür. Bir üst seri olan UCP 204 serisi rulmanlı yatak kullanıldığı durumda ise mil çapının gereksiz bir şekilde büyümesine ve sistemin de bu yüzden ağırlaşmasına neden olacaktır. Kullanılan millerin çaplarının büyümesi kullanılan

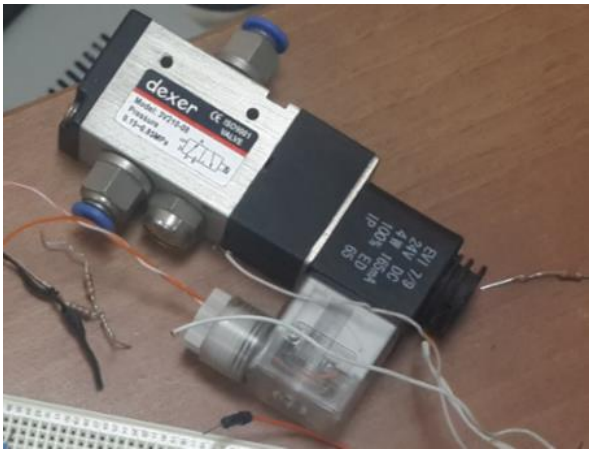
servo motorunda gücünü azaltacağından dolayı da UCP 203 serisi yatak tercih edilmemiştir.

Kalem silindir (İso-Paslanmaz Gövde)

Tork ölçüm düzeneğinde 1 adet tek etkili kalem silindir kullanılmıştır. Kalem silindir piyasadan hazır temin edilmiştir. Tek etkili kalem silindirin tercih edilmesinin sebebi, bu silindirin takılacağı düzenekte sadece tek yönde harekete ihtiyaç duyulduğundan dolayı tek etkili kalem silindir tercih edilmiştir.

Selenoid (Kumandalı) valf

Tork ölçüm sisteminin tamamen bilgisayar kontrollü yapılabilmesi için tek etkili Pnömatik pistonun hareketinin de otomatik olması gerekmektedir. Bundan dolayı Şekil 13'te gösterilen bir elektrik uyarılı valfin kullanılması gerekmektedir. Valfin bilgisayar ile bağlantısının yapılması ve LabVIEW kontrollü olabilmesi içinde DAQ kartı ve valf için yapılan bir devre kullanılmıştır.



Şekil 13. Selenoid (Kumandalı) Valf

Kontrol ünitesi (Bilgisayar)

Günlük hayatta kullanılan birçok makinanın tek başına kontrol edilmesi o makine için üretilmiş kontrol üniteleriyle mümkün olmaktadır. Birçok sesnsör ve cihazdan oluşan makinelerin kontrolünü tek bir yerden sağlamak için bir kontrol ünitesine ve bu ünitede kullanılacak arayüze ihtiyaç duyulmaktadır. İhtiyaç duyulan sistemler için kullanılan arayüzler ya alınan sistemler üzerinden hazır temin edilmekte ya da kullanıcının istediği özelliklere göre kullanıcının kendisi tarafından tasarlaması gerekmektedir. Yapılan çalışmada tasarlanan arayüz ile sistemin kontrolünden çok sistemin izlenmesine ihtiyaç duyulmuş ve arayüzde buna göre tasarlanmıştır. Burada sistemin izlenmesindeki amaç belirli bir ölçümün yapılması

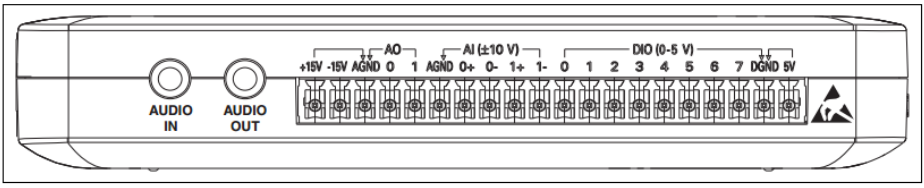
esnasında oluşabilecek hatalardan dolayı ekranda görünen duruma göre sisteme müdahale etmektir.

DC güç kaynağı

Servo motoru, Tork sensörünü ve elektrik kontrollü valfi beslemek için doğru akım kaynakları kullanmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Buda DC güç kaynaklarıyla mümkün olmaktadır. Servo motor için gerekli olan gerilim 10 – 14.8V, Tork sensörü İçin gerekli olan gerilim 9 – 12V, elektrik kontrollü valf için gerekli olan gerilim 24V'tur. Tork Ölçüm Sisteminde Servo Motor için ortalama 12V, Tork Sensörü için ortalama 10V, Elektrik kontrollü valf için sabit 24V' luk bir gerilime ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gerilimleri karşılamak üzere toplamda 3 adet güç kaynağı kullanılmıştır.

DAQ kart

DAQ kart, doğada bulunan verileri toplayıp bilgisayarda işlenebilecek hale çevirebilen elektronik kartlara denir. Gelen analog sinyalleri bilgisayarın anlayabileceği dijital sinyallere çevirirler, ayrıca içlerinde bulundurdukları zamanlayıcı ve sayıcı gibi yapılarla işlemleri kolaylaştırma imkânı da verirler.



Şekil 14. DAQ kartı Bağlantı Pinleri

Tablo 3. DAQ kartı Bağlantı Yerleri ve Tanımlamaları

Sinyal adı	Referans	Yön	Tanım
AUDİO İN	-	Input	**Ses girişi** - steryo konektörü sol ve sağ ses girişi
AUDİO OUT	-	Output	**Ses çıkışı** - steryo konektörü sol ve sağ ses çıkışları

DAQ kart gelen analog sinyalleri dijital sinyallere çevirip bilgisayara aktarma işlemini 3 kısımda gerçekleştirmektedir.

1. Fiziksel özellikler gerilim, akım gibi elektriksel hale getirilir. Bu işlemler sensörler yardımıyla yapılmaktadır. Sensörlere örnek olarak potansiyometre, limit

anahtarları, ısı sensörleri (PTC ve NTC), basınç sensörleri, LDR, fototransistörler ve fotodiyotlar verilebilir.

2. Sensörlerden gelen analog sinyallerin yükseltilip veya alçaltılıp örneklenerek (sürekli bir sinyalin belirli bir aralığının alınması) PC ye gönderilir. Bu işlem DAQ kartı içindeki ADC (Analog Digital Converter – Analog Dijital Çevirici) yardımıyla gerçekleştirilir.

3. Bu kısımda ise bilgisayarda toplanan bu verilerin içinden istenilen özelliklerin çıkarılmasıdır. Burada ise DAQ kartının programlanması devreye girecektir.

Tablo 4. DAQ kartı Bağlantı Yerleri ve Tanımlamaları

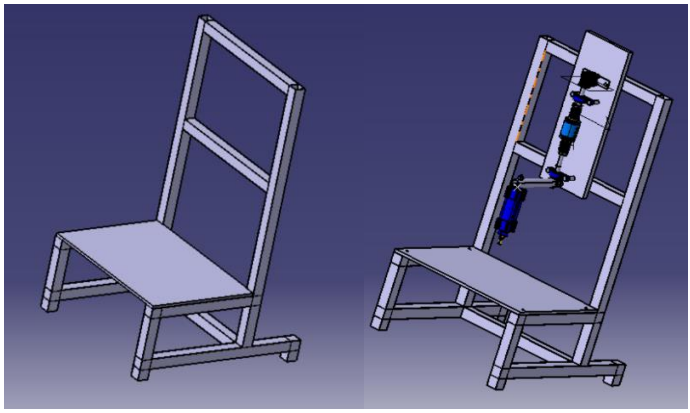
+15V/-15V	AGND	Output	+15V/-15V güç kaynakları
AGND	-	-	**Analog toprak** – AI, AO, +15 V ve -15 V için referans terminaller
AO 0/AO 1	AGND	Output	0 ve 1 için Analog çıkış kanalları
AI 0+/AI 0-; AI 1+/AI 1-;	AGND	Input	0 ve 1 için Analog giriş kanalları
DIO <0…7>	DGND	Input or Output	**Dijital I/O sinyalleri** – genel amaçlı dijital hatlar veya sinyal sayıcılar
DGND	-	-	Dijital toprak – DIO hatları ve +5V kaynağı için referans
5V	DGND	Output	5V güç kaynağı

Piyasada farklı DAQ kartlarının bulunmasına karşılık bu DAQ kartına tork sensörü' nün ve elektrik kontrollü valfin kolaylıkla bağlanıp LabVIEW üzerinden hızlı bir şekilde kontrol edilmesine olanak sağlayan ve sadece bilgisayar USB sinden beslenen bir veri kartı olması hasebiyle bu DAQ kartı tercih edilmiştir.

Sistemin montajı

Takılan milin eksen kaçıklıklarından dolayı servo motora zarar vermemesi için motora çok yakın bir mesafeye rulmanlı yatak monte edilmiştir. Motora bağlı milden sonra tork sensörünün monte edilebilmesi için kaplin kullanılmıştır. Kaplinler gerektiğinde sistemin kolay bir şekilde demonte edilebilmesi, çalışırken oluşan titreşimler ve eksen kaçıklıklarının giderilmesi için kullanılmıştır. Kaplinler

bağlandıktan sonra tork sensörünün hemen sonrasına piston kolunu bağlamak için bir mil bağlanmıştır. Bağlanan bu milin bir rulmanlı yatak vasıtasıyla bir önceki yatak ve servo motorla aynı eksende olması sağlanmıştır. Piston kolunun bağlanacağı milin ucuna eksenine dik bir delik açılarak piston kolu takılıp vida yardımıyla sabitlenmiştir. Belirtilen özelliklere sahip piston takılan kola somun vasıtasıyla sabitlenmiştir. Tasarımın proje konusu otomatik montaj sistemine uyumlu çalışabilecek özelliklerde olmasına azami derecede dikkat edilmiştir. Bu amaçla prototipi yapılan sistemin San-Tez projesinde olduğu gibi bir sistemde çalışabilmesi için Şekil 15'de görüldüğü gibi bir karkas sistemi tasarlanmış ve üretimi yapılmıştır. Entegre sistemde kullanılan fikstürün montajına uygun ve torkmetrenin asıl sistemde olduğu gibi dikey konumda çalışabilmesi için Şekil 15' deki gibi karkasa entegre edilmiştir.



Şekil 15. Karkas Sistemi

Kontrol sisteminin tasarımı

Kontrol sistemi, öğelerinin birbirine etkisi ile sebep sonuç ilişkilerine göre sıralanıp giriş (amaç) ve çıkışlarının (sonuç) bağlandığı, aralardaki bilgi akışının blok diyagramları ile gösterildiği, kontrol edilmek istenen kavramın çıktı, kontrol verilmek için verilen değerin ise girdi olarak isimlendirildiği mekanizmaya kontrol sistemi denir. Çalışmada sistemin kontrolünden çok izlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Burada izlemedeki amaç sistemde oluşabilecek hatalardan dolayı kontrol ünitesinin ekranından görülen anlık değişimleri izlemek, ölçüm esnasında istenen şartlarda ölçüm yapılmıyorsa müdahale etmek ve bu şekilde işlerin aksamaması için gerekli olan müdahaleleri yapmaktır. Yani sadece sistemin kontrolü değil asıl önemli olan sistemin anlık olarak izlenebilmesidir.

Yapılan çalışmada sistemin kontrol edilmesi ve anlık olarak izlenebilmesi için LabVIEW programı ile hazırlanmış arayüzle sistemin hem kontrolü hem de ölçüm esnasında oluşan değişimlerin anlık olarak kontrolü yapılmakta ve gerekirse müdahale edilebilmektedir.

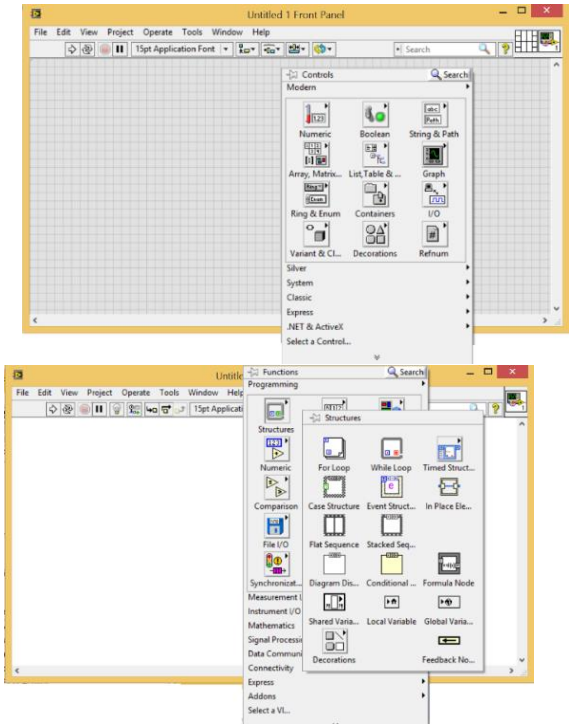
LabVIEW arayüzü

LabVIEW National Instruments firması tarafından üretilen ölçüm, test ve kontrol sistemleri için geliştirilmiş bir grafik programlama ortamıdır. Geleneksel programlama dillerindeki komut veya değişkenlerin satırlarca yazılması yerine, yapılmak istenen işlem için kullanılabilir sanal enstrümanların (VI) blok diyagrama yerleştirilip, veriyi iletecek bağlantılar oldukça kolay bir şekilde yapılmaktadır. Veri işleme ve izlenmesinde kullanılan LabVIEW, içeriğinde bulunan otomasyon ve ölçme devre elemanları fonksiyonlarının ekranda birbirlerine bağlanması şeklinde kullanılır.

Çoğu üretim yerinde sensörler yardımıyla bir şeylerin ölçümü muhakkak yapılmaktadır. Örneğin sıcaklık ölçümünün yapılması; Fırınlarda, buzdolaplarında, seralarda, temiz odalarda, sıcaklık ölçümü yapılması gerekir. Sıcaklıktan öte basınç, kuvvet, konum, gerilim vb. büyüklükleri de ölçmek gerekmektedir. LabVIEW, bu büyüklükleri ölçecek sensörler ile bilgisayarları buluşturmaktadır. LabVIEW sadece bununla da kalmayıp verileri görüntüleyip aynı zamanda analizde yapabilmektedir.

Bir şeyi ölçüp analiz ettikten sonraki adım, genellikle elde ettiğiniz verilere göre bir şeyleri değiştirmektir. Örneğin ölçtüğünüz sıcaklık değerine göre buzdolabını veya fırını açma veya kapatma komutu göndermek gibi. LabVIEW bu işleri çok kolay bir şekilde yapabilmektedir. Bu LabVIEW' in güçlü olduğu yanıdır. LabVIEW ile bu işler doğrudan yapabildiği gibi programlanabilir mantıksal kontrolörler (PLC) ile haberleşerek de yapabilmektedir.

LabVIEW programı, ön panel (kullanıcı ara yüzü) ve blok diyagramdan oluşur. Şekil 16 (a)'da görülen ön panel (Front Panel), LabVIEW' de yapılacak olan uygulama için sisteme manuel olarak değerler girilmesine ve çıkışların görülmesine yardımcı olur. Şekli 16 (b)'deki Blok diyagram ise ön panelin temelini oluşturan ana işlemlerin yapıldığı kısımdır. Ön panelde bir taraftan kontrol sağlanırken, diğer taraftan blok diyagramda sanal enstrümanlar kullanılmaktadır. LabVIEW programının geliştiricisi National Instrument firmasının geliştirdiği donanımlar ile gerçek sistemler çalıştırılabilmektedir.



Şekil 16. (a) Front panel, (b) Blok Diyagram

Yapılan bu çalışmada motor ve tork sensörü parametrelerinin gerçek zamanlı olarak hızlı bir şekilde bilgisayara aktarılmasından ve kullanılan DAQ kartının uyumlu ve sorunsuz olarak çalışmasından dolayı Labview programı tercih edilmiştir. Yapılan çalışmalarda daha ziyade loadcell veya strain gauge kullanılarak ayrık işlemler ile tork ölçümü yapılmaktadır. Bu çalışmayı diğer çalışmalardan ayıran bir başka orijinal tarafta servo motorun verileri ve tork sensöründen alınan verilerin LabVIEW yazılımında gerçek zamanlı olarak kullanılmasıdır. Bu çalışma esas itibariyle, bu bölümde tanıtılan teknik donanım, yazılım ve yöntemler kullanılarak, tork ölçüm deneylerinin gerçek zamanlı olarak bilgisayar destekli olarak yapılabilmesi için LabVIEW kullanıcı ara yüzüyle donatılmış bir sistemin tasarlanmasından ibarettir.

Bilgisayar Kontrollü Tork Ölçüm Sisteminin Gerçeklenmesi

İkici Bölümde tanımlanan ekipmanlar kullanılarak bilgisayar kontrollü tork ölçüm sisteminin tasarımının ve uygulamasının gerçekleştirilmesi bu bölümde anlatılmaktadır. Tork ölçümü için gerekli giriş parametrelerinin sisteme aktarılması, gerektiğinde bunların istenilen şekilde değiştirilmesi, tork sensörü vasıtasıyla sistemden alınan ölçüm değerlerinin kaydedilmesi, görsel hale getirilmesi ya da ya

da bu değerlerin değerlendirilmesi geliştirilen LabVIEW Arayüzü kullanılarak tamamen bilgisayar yardımıyla yapılabilmektedir.

Servo motorun kontrolü

Kullandığımız MX 64R modeli servo motor 360 derecede 4096 piksel hassasiyetinde çalışan bir motordur. Yani 1 piksel de 0,08789 derece hassasiyet gösterir. Buda her bir piksel arttığında 0,08789 derece dönmesine olanak sağlar. AX serisi servo motorlar 1024 piksel hassasiyetindedirler. Bu hassasiyet bizim için yetersiz kaldığı için MX serisi servo motor tercih edilmiştir. Aşağıda MX 64R serisi için teknik özellikler tablosu verilmektedir.

Servo motorun kontrolü LabVIEW Arayüzü kullanılarak yapılmıştır. Yaptığımız çalışmada motor 360 derece tam tur atmamaktadır. Menteşenin yapısı gereği motor 72 derece hareket ettirilmektedir. Motorun sistem üzerindeki konumuna göre 72 derece 1638 – 2459 piksel aralığına denk düşmektedir. Yani motorumuzun başlangıç konumu 1638 piksel de bitiş konumu ise 2459 pikseldir. Tahrik motorumuzun başlangıç konumunu olan 1638 piksel deki hareket başlangıç konumu resmi Şekil 17 gösterilmektedir.

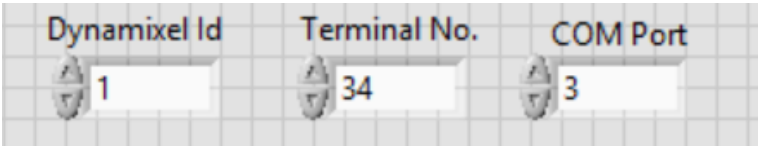


Şekil 17. Hareket Başlangıç konumu

Servo motorun kontrolünün yapılabilmesi için bilgisayar bağlantısı gerekmektedir. Bilgisayar bağlantısının yapılıp servonun kontrol edilebilmesi için USB Dynamixel haberleşme elemanı yardımıyla soket olan kısmının motor soketine,

USB kısmının ise bilgisayara takılarak ve sonrasında servo motora 14,8V'luk bir gerilim verilerek bilgisayar kontrolü yapılabilmektedir.

Motor parametrelerinin sisteme girilmesi Şekil 18'de gösterildiği yapılmaktadır.



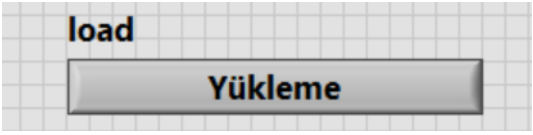
Şekil 18. Motor Parametrelerinin LabVIWE Arayüzüne Girilmesi

Şekil 18'de gösterilen Dynamixel Id motorun kimliği olarak tanımladığımız kısımdır. Sistemde birden fazla motor kullanılsaydı onların her birini ayrı ayrı kontrol edebilmemiz için hepsi için farklı olan Id'leri yazmak zorunda kalacaktık. Bir adet servo kullanıldığı için sadece kullanılan motorun Id sini girmemiz yeterli olmaktadır.

Şekil 18'de gösterilen terminal numarası Servo Motor üreticisi Robotis Firması tarafından geliştirilen RoboPlus programında görülen sekmelerin her birine denir. RoboPlus arayüzünde 1'den 73'e kadar terminaller bulunmaktadır. Motorun hangi özelliğini kullanmak istersek LabVIEW arayüzünü ona göre tasarlayıp RoboPlus Arayüzündeki özelliği bulup karşılığındaki terminal numarasını girmek yeterli olmaktadır.

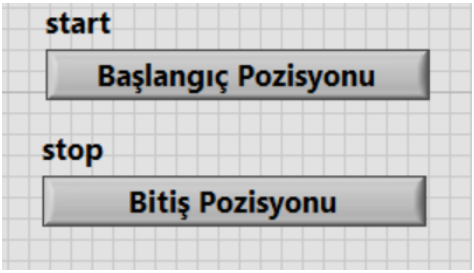
COM Port (USB) bilgisayar üzerindeki USB lerin her birine verilen isimdir. Kullandığımız RS 485' i bilgisayar USB sine taktıktan sonra hangi COM porta (COM1, COM2 Vb.) takıldığına bakmamız gerekmektedir. Bunun içinde bilgisayardan Denetim masası – Sistem ve Güvenlik – Sistem – Aygıt Yönetici bölümüne girerek kaç numaralı COM Porta takıldığına bakmak gerekmektedir. Dynamixeli kullanmak için taktığımız USB'nin numarası 3 tür.

Parametrelerin sisteme girilmesinden sonra yükleme yapılması gerekmektedir. Bu işlem için Şekil 19'de ki gibi bir buton yerleştirilmiştir.



Şekil 19. Yükleme Butonu

Tork ölçümü yapılacak menteşelerin sağ ve sol olmasından dolayı üretilen menteşenin sağ menteşe olması durumunda motor konumunun sağ tarafta sol olması durumunda ise motor konumunun sol tarafta olması gerekmektedir. Bunun içinde başlangıç ve bitiş konumlarına gönderen 2 adet buton kullanılmıştır. Bu butonlar Şekil 20'de gösterildiği gibidir.

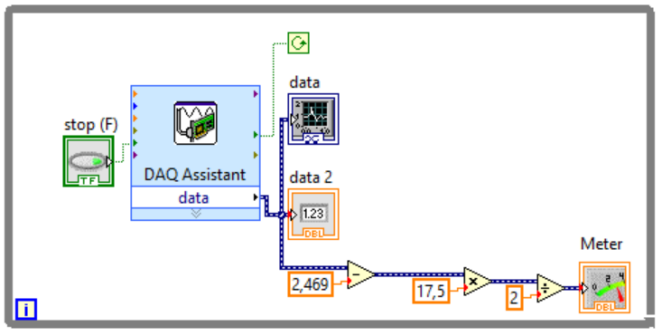


Şekil 20. Başlangıç Bitiş Pozisyonu Butonu

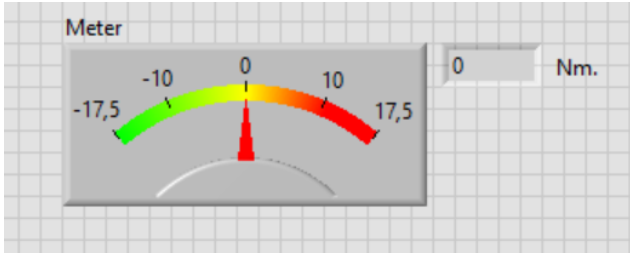
Menteşe imal edildiği zaman hareketli kısımlar arasında belli bir miktar çapak oluşmaktadır. Buda menteşenin ilk açılıp kapandığı zamanki torkunu çok yüksek göstermektedir. Bu yüzden tork ölçümü yapıldığı zaman motor 72 derecede 5 defa hareket ettirildikten sonra ölçüme geçilmektedir. 5 defa hareket ettirmenin her hangi bir kıstası bulunmamakla beraber ölçüm yapacak kişi bu rakamı düşürüp yükseltebilmektedir. Bu nedenle bu değerin istenildiği gibi ayarlanabilmesi için LabVIEW Arayüzüne döngü sayısı isminde bir kontrol paneli yerleştirilmiştir. Ve bu döngüyü başlatmak için bir adet buton yerleştirilmiştir.

Tork sensörünün bağlanması ve verilerin alınması

Tercih edilen tork sensörü 0 – 17,5 Nm aralığında ölçüm yapabilen şaft tipi bir sensördür. Sensör çıkışında sabit 2,5 V luk bir gerilim vardır. Ölçüm sırasında ± 2V' luk bir gerilim oluşur. Bunun anlamı sensörde maksimum 4,5 V minimum 0,5V' luk bir gerilim oluşur. Burada 4,5 V +17,5Nm' ye, 0,5V ise –17,5Nm' ye tekabül etmektedir. Sensörde 1Nm görülebilmesi için 0,114V'luk bir elektrik sinyali oluşur. Sensör çıkışındaki elektrik sinyalleri LabVIEW Arayüzündeki matematiksel işlemler kullanılarak Nm ye çevrilmiştir. Dönüşüm yapılan elektrik sinyallerinin LabVIEW blok diyagram ekran çıktısı Şekil 21'da ve Front Panel ekran çıktısı ise Şekil 22'de görülmektedir.



Şekil 21. Elektriksel Sinyalin Nm'ye Dönüşümü (Blok Diyagram)



Şekil 22. Elektriksel Sinyalin Nm'ye Dönüşümü (Front Panel)

Tork sensörü sisteme 2 adet kaplin yardımıyla bağlanmaktadır. Sensörü kaplinler ile bağlamanın faydası, varsa eksen kaçıklıklarının giderilmesi ve çalışma esnasında oluşan titreşimlerin sensöre zarar vermesini engellemek içindir. Tork sensöründen alınan verilerin görülebilmesi için iki yöntem vardır. Birinci yöntem; tork sensörünü bir dijital göstergeye bağlayıp sensörden anlık olarak alınan elektrik sinyalinin göstergede okunmasıdır.

İkinci yöntem ise bizim kullandığımız yöntem olan bir Arayüz yardımıyla bilgisayar kontrolü ile ekranda okunan değerlerin anlık bir şekilde görülmesi ve istendiği takdirde bu verilen kaydedilerek excel'e aktarılabilmesi sağlanmaktadır. Bu yöntemin diğer önemli bir yanı anlık bir şekilde alınan verilerin grafik yardımıyla da görülebilmesidir. Bu yöntemi kullanabilmek için tasarlamış olduğumuz LabVIEW Arayüzüne tork sensöründen alınan verilerin görselleştirilmesi için bir gösterge paneli ve bir grafik yerleştirilmiştir.

Tork sensöründen alınan elektrik sinyallerinin bilgisayara aktarılması sensör üzerine takılan data kablosunun DAQ kartına bağlanmasıyla yapılabilmektedir.

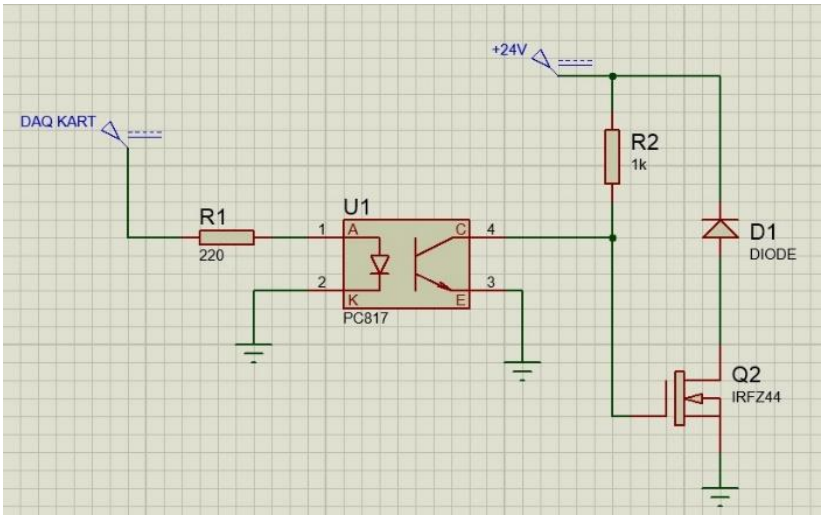
Selenoid (kumandalı) valf

Selenoid kumandalı valfler, Pnömatik ve elektrik enerjisinin avantajlarından faydalanırlar. Bunlar elektro-Pnömatik çeviriciler olarak adlandırılır ve işaret çıkışı için bir Pnömatik valften ve bir elektrikli anahtarlama elemanından (selenoid

bobin) meydana gelir. Selenoid bobine elektrik gerilim uygulanırsa elektromanyetik bir kuvvet oluşur. Bu kuvvet, valf çubuğu ile bağlanmış bobin çekirdeğini hareket ettirir. Selenoid bobine akım gitmez ise manyetik kuvvet ortadan kalkar. Valf kurucu yayı kuvveti sayesinde başlangıç konumuna gelir.

Çalışma Prensibi**;** Selenoid kumandalı yön kontrol valfi sakin konumda P kapalı, 3/2 yön kontrol valfi sakin konumda basınçlı havanın geçişine izin vermez, yani p kapalıdır. Silindir içi A'dan R'ye boşaltım vardır. Selenoid uyarı elektrik hattı ile Pnömatik hat arasında bağlayıcı eleman görevi yapar. Selenoid uyarılı valfin yapısı gövde, bobin, nüve (Valf pimi), nüve yatağı, Sızdırmazlık elemanı, baskı yayından oluşmaktadır.

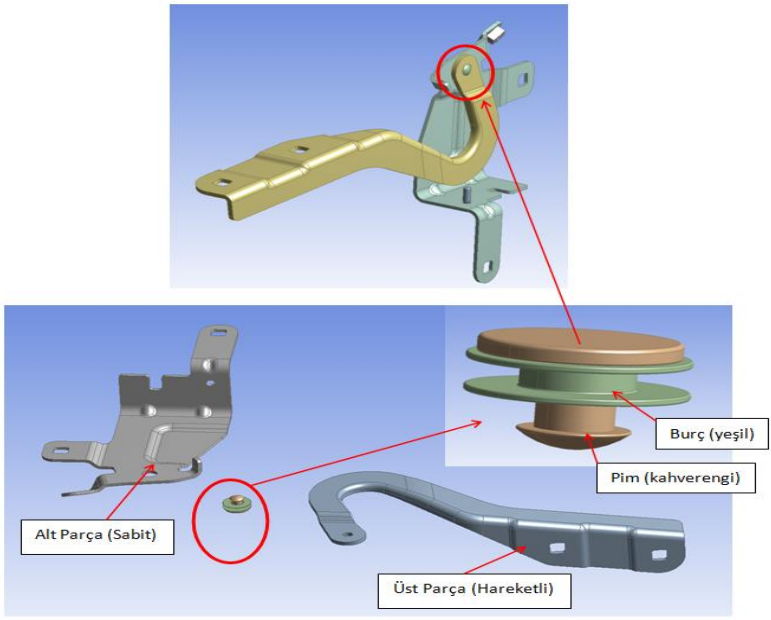
Projede kullanılmak üzere tasarlanan sistemimizin tamamen bilgisayar kontrollü ölçüm yapabilmesi için kullanılan selenoid valf, projedeki döner tabla uygulamasında menteşe tork ölçüm kısmına geldiğinde menteşeyi tutmak için tek etkili pistonu harekete geçirmek için enerji verilerek bobin devreye girer ve piston harekete geçirilir. İşlem bittikten sonra valften enerji kesilir ve piston yay etkisi ile tekrar eski konumuna döner. Böylece herhangi bir temas olmadan ölçüm gerçekleştirilmiş olur. Selenoid valfin bilgisayara bağlanması DAQ kartıyla gerçekleştirilmektedir. Fakat DAQ kartının çıkışındaki akım yetersiz kaldığından selenoid valfi çalıştırmamaktadır. Bu yüzden Şekil 23'daki gibi bir devre kurulmuş ve bu devre vasıtasıyla selenoid valfe yeteri kadar akım gönderilerek valfin devreye girmesi sağlanmaktadır.



Şekil 23. Akım Yükseltme Devresi Proteus Ekran Çıktısı

Ölçümü yapılacak menteşe

Bu tez çalışmasında San-Tez Projesini beraber yürüttüğümüz Toksan firmasının Renault marka otomobil firması için üretilen ön kaput menteşesinin tork ölçümü için bu ölçüm sistemi gerçekleştirilmiştir. Söz konusu ön kaput menteşe iki ana parça, bir burç ve bir pim (perçin)'den oluşan hareketli bir mekanizmadır. İki ana parçayı birbirine bağlamak için öncelikle burç yerleştirilir. Burç 2 kademede 45° ve 90^0 bükülerek alt parçaya (Şekil 24) sabitlenir. Diğer parça üste getirilerek pim yerleştirilir. Pimin ucu belli bir kuvvet altında belli bir süre ovalanır ve ezilir. Böylelikle menteşe montajı yapılmış olur. Montaj esnasında menteşe parçaları arasında çapak oluşumuna karşın, tork ölçümü yapılmadan önce menteşe 5 sefer sağa ve sola hareket ettirilerek varsa çapaklar temizlenmiş olur. Ve böylelikle tork ölçümü yapılırken çapaklardan etkilenmeden menteşenin asıl olan moment değeri ölçülmüş olur.



Şekil 24. Tork Ölçümü Yapılan Menteşenin Ayrıntılı Gösterimi

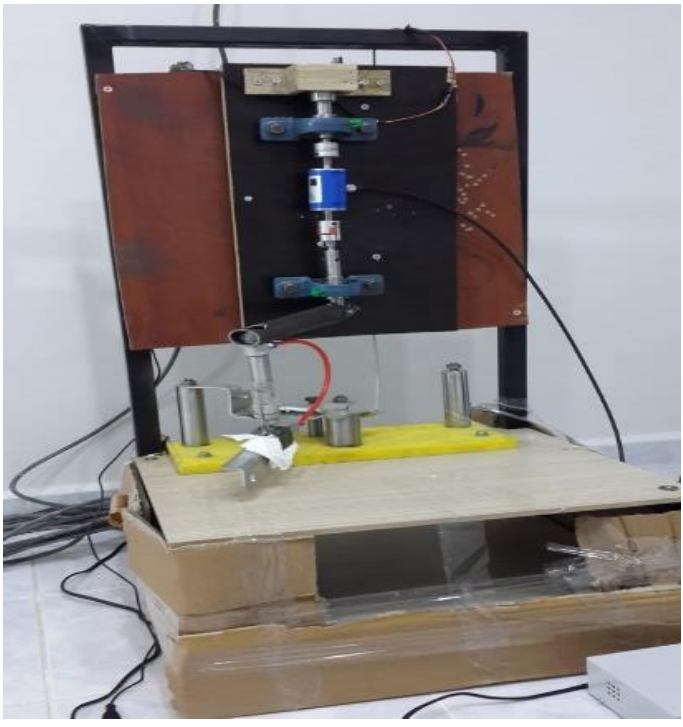
Tork ölçüm sistemi ile menteşenin torkunun ölçülebilmesi için menteşenin bir yere sabitlenmesi gerekmektedir. Bu yüzden Toksan da San-Tez projesi kapsamında tasarlanan döner tablalı mekatronik sistem üzerindeki menteşe fikstürlerine benzer bir fikstür üretilmiştir. Üretilen fikstüre hem sağ menteşe hem de sol menteşe monte edilerek ikisinin de ölçümü yapılabilmektedir. Üretilen fikstür ve menteşe bağlantısı Şekil 25' te gösterildiği gibidir.



Şekil 25. Sağ Sol Menteşe Bağlantılı Fikstür

Tork ölçüm düzeneğinin kurulumu

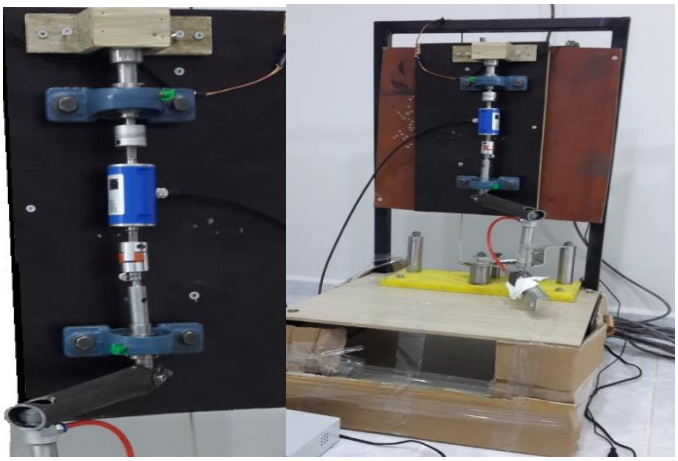
Şekil 25'te gösterilen menteşenin torkunun ölçülebilmesi içinin tasarlanan tork ölçüm sistemi Şekil 26'da gösterilmektedir.



Şekil 26. Tork Ölçüm Sistemi

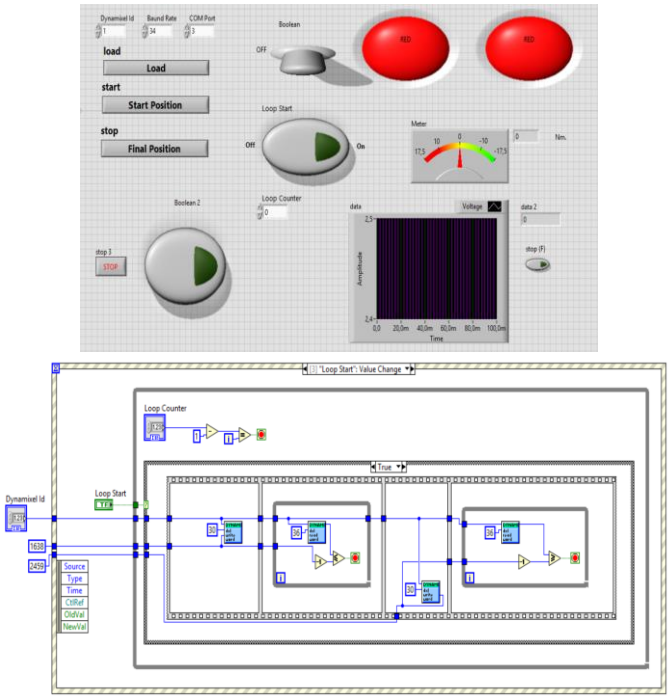
Öncelikle servo motor üzerindeki flanş için üretilmiş olan mil flanşa M2,5*16 cıvata kullanılarak bağlantı yapılmıştır. Bir plaka üzerine rulmanlı yataklar aynı

eksende olacak şekilde monte edilmiştir. Servo motora bağlantılı olan mil 1. Yatağa oturtulduktan sonra kaplin vasıtasıyla tork sensörünün bir tarafı milin ucuna bağlanmıştır. Sensörün diğer ucu bağlamak için piston kolunun bağlandığı mil 2. Yatağa yerleştirilmiş ve kaplin vasıtasıyla tork sensörüne bağlanmıştır. Sonrasında piston kolu ve buna bağlı olarak piston bağlanmıştır. Monte edilen Şekil 27 (a)'deki sistem projede olduğu tork sensörünün dikey konumda çalışması için üretilmiş olan 90° dikey konumdaki karkasa (Şekil 27 (b)) monte edilmiştir.



Şekil 27. (a)Tork Ölçüm Sistemi, (b) Tork Düzeneğinin Karkasa Dikey Konumda Montajı

Tork ölçüm sisteminin kontrolünü sağlayacak olan yazılım kısım kısım tasarlanmıştır. Ancak yapılacak olan tork ölçüm işlemi, motor kontrolü ve elektrik kontrollü valfin kontrolünün tek bir arayüz tarafından gerçeklenmesi gerekmektedir. Bu sebeple anlatılan ölçme ve kontrol işlemlerinin hepsi bir ara yüzde birleştirilmiştir. Şekil 28 (a)'da tork ölçüm düzeneğinin kontrolünü sağlayan arayüz görülmektedir. Şekil 28 (b)'de tork ölçüm düzeneğinin kontrolünü sağlamak ve sensörden alınan verilerin bilgisayara aktarılmasını ve kaydedilmesini sağlayan programın blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 28. (a) Tork Ölçüm Düzeneği Arayüz Programı, (b) Tork Ölçüm Düzeneği İçin Tasarlanmış Arayüz Programı Blok Diyagramı

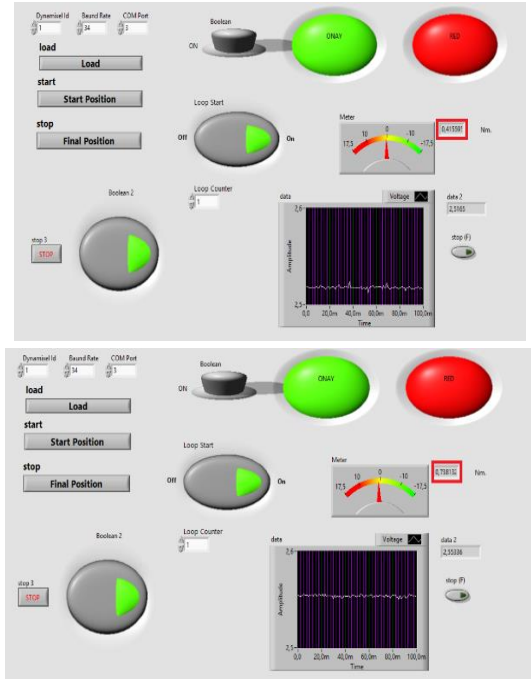
Şekil 28'de görülen LabVIEW programında tasarlanmış olan arayüz aracılığıyla tork sensöründen alınan sinyaller anlık olarak Nm ye çevrilerek görülmektedir. Aynı zamanda arayüz servo motorun anlık olarak kontrolüne olanak sağlamakta ve selenoid valfin kontrolü de bu şekilde arayüz ile yapılmaktadır. Menteşe üretildikten sonra menteşenin alt ve üst parçaları arasında oluşan çapakların temizlenmesi için servo motorun ilk 5 hareketinin çapak temizleme için yapılması ve son hareketinde tork ölçüm için yapılması arayüz ile gerçek zamanlı olarak yapılabilmektedir. İstenildiği taktirde yaptırılan hareket miktarı arttırılıp azaltılabilmektedir. Bunun yanında istenilirse arayüze termometre yerleştirilip servo motorun fazla ısınmadan dolaya oluşacak arızalara karşı anlık olarak sıcaklık kontrolü de yapılabilmektedir. Kullanıcı istediği zaman görülen ölçüm sonuçlarını bilgisayara kaydedebilmektedir. Arayüzde görülen ölçüm sonuçları bilgisayarda Microsoft Excel'e istenildiği konuma kaydedilebilmektedir.

SİSTEMİN TESTLERİ ve DOĞRULANMASI

Tork ölçüm sisteminin test edilmesi

LabVIEW programında tasarlanan arayüzde servo motorun Dynamixel ID numarası, terminal numarası ve COM Port numarası yazıldıktan sonra bu motor parametrelerinin sisteme tanıtılması için 'Yükle' butonuna basılarak sisteme yüklenmesi gerekmektedir. Daha sonra menteşenin kaç sefer sağ ve sol hareket yapacağı Şekil 28'de görülen döngü sayısı bölümüne girilir. Döngü sayısı girildikten sonra döngüyü başlatmak için Şekil 28'deki butona basılarak servo motorun 5 sefer sağ ve sol hareketi yapması sağlanır.

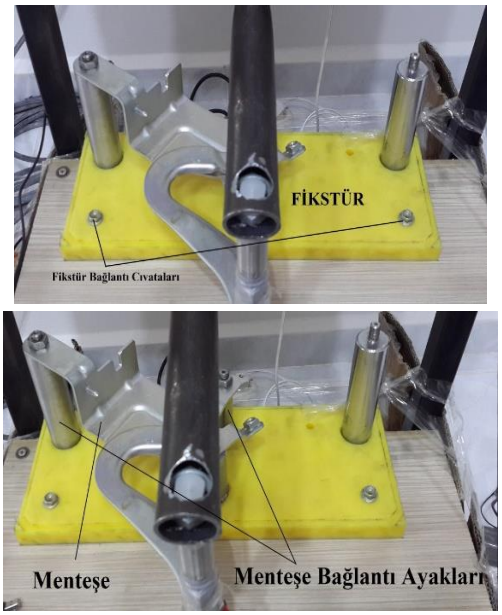
Servo motorun menteşeyi sağa ve sola döndürürken aynı zamanda da tork sensöründen verilerinde alınması gerekmektedir. Döndürme işlemi yapılırken tork sensöründen anlık bir şekilde elektrik sinyali alınabilmektedir. Arayüz çalıştırıldığı zaman Şekil 29' daki gibi sensörden elektrik sinyali alınabilmektedir.



Şekil 29. Tork Sensörüne Yüke Uygulandığında Oluşan Sinyal ve Kuvvet Karşılığı

Sensör ve servo motorun kontrolü yapıldıktan sonra sistemin test edilmesi gerekmektedir. Sistemin test edilebilmesi için fikstürün karkasa sabitlenmesi gerekmektedir. Aksi taktirde servo motorun sağa ve sola hareketinden dolayı fikstür yerinden oynayıp menteşenin pim merkezi ile servo motora kadar uzanan milin merkezi arasında kaçıklık meydana gelecektir. Bunların merkezlenmesi ise karkas

üzerinden ölçümler yapılarak bulunmuş ve fikstürün yeri işaretlenip somunlu cıvatalarla sabitlenmiştir (Şekil 30).



Şekil 30. Fikstür Bağlantı Şekli

Sabitlenen fikstür üzerine menteşe bağlanarak ölçüm işlemine başlanır. Menteşe, üzerindeki delikler vasıtasıyla, özel olarak yapılmış fikstür üzerine aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi oturtulur. Fikstüre menteşe bağlandıktan sonra ölçüm gerçekleştirilmek üzere başla butonuna basılır. Menteşenin sağa ve sola 5 defa hareket etmesinden sonra son hareketindeki tork değeri okunur. Okunan tork değeri istenen aralıkta ise işleme devam edilir. Ölçülen değer istenen aralıkta değilse ölçülen menteşe geri dönüşüm kutusuna atılır. Aşağıdaki şekillerde farklı menteşeler üzerinden ölçüm yapılırken okunan tork değerleri görülmektedir. Ölçüm yapılan menteşelerden okunan değerler 0,415 – 0,738 – 1,240Nm'dir. Bu değerler ölçüm aralığımız olan 0,2 – 2,5 Nm. aralığını karşıladığı için menteşelere onay verilerek işlemlere devam edilmektedir.

Yukardaki şekillerde görüldüğü gibi tork aralığımız 0,2 – 2,5 Nm aralığında olduğu görülmektedir. Ölçülen değerler uygun aralıkta olduğu için işlemlere devam edilir. Menteşe montajı sırasında oluşan hatalardan dolayı ölçülen tork değeri aşağıda gösterildiği gibi istenen aralıklarda değilse menteşe ıskartaya ayrılır. Aşağıda ölçümü yapılan menteşe için ölçülen tork değeri 0,172 Nm.'dir. Ölçülen değer 0,2 – 2,5 Nm. aralığında olmadığı için menteşe ret verilerek menteşe ıskartaya ayrılır.

SİSTEMİN DOĞRULANMASI

Tork ölçüm sistemi üzerinden ölçüm yapıldıktan sonra okunan değerlerin gerçekten menteşe üzerinde var olan tork değerlerimi yoksa yanlış değerler mi olduğunun doğrulanması gerekmektedir. Doğrulama işlemi yapmak için load cell ve buna bağlı olarak bir dijital gösterge kullanılmıştır.

Load cell farklı alanlarda kullanıldığı için hangi alan için kullanılıyorsa yeniden kalibrasyona ihtiyaç duyulmaktadır. Kalibrasyon işlemi 20kğ'lık yüklerle şekilde gösterildiği gibi yapılmıştır.



Şekil 31. Load Cell Kalibrasyon İşlemi

Kalibrasyon işlemi tamamlandıktan sonra menteşelerin load cell ile ölçümü yapılmıştır. Menteşe ölçümünü yapmak için menteşenin uzun kolu üzerinde bir çizgi çizilir. Çizilen bu çizgi ile menteşenin pimi arasındaki mesafe ölçülür.



Şekil 32. Menteşe Üzerine Yükün Uygulanacağı Nokta(a), Menteşeye Yük Tatbik Edilmesi (b)

Menteşe üzerindeki işaretli kısma load cell ile bastırılarak ne kadar yük uygulandığında hareket ettiği tespit edilir. Load cell ile menteşeye yük uygulandığında dijital göstergede okunan değer 0,68kğ'dır. Bulunan bu değer aşağıda gösterilen formülde olduğu gibi mesafe ve yerçekimi ivmesi ile çarpılarak Nm. cinsinden değeri tespit edilmiş olur.

Tork (Nm) = Mesafe(m) * Uygulanan yük (Kğ) * Yerçekimi ivmesi (m/sn^2)

Uygulanan yük = 0,70Kğ

Mesafe = 0,18m

Yerçekimi İvmesi = 9,81 m/sn^2

Tork = (0,18m) * (0,70kğ) * (9,81 m/sn^2), **Tork = 1,23 Nm**

Load cell kullanımı sırasında göstergeden okunan değerler Nm' ye dönüştürülerek sensörden alınan veri ile karşılaştırılmıştır.

Tork ölçüm sistemi ile menteşe üzerinden okunan tork değeri **1,28Nm** olarak okunmaktadır. Load cell ile ölçüm sırasında menteşe üzerinden okunan değer de **1,20Nm** olarak ölçülmektedir. Bu değerler kıyas edildiğinde değerlerin yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir.

Bir başka ölçüm sırasında load cell ilen ölçülen değer ile sensörden alınan değerin karşılaştırılması aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 33. Load Cell Den Okunan Yük

Tork (Nm) = Mesafe(m) * Uygulanan yük (Kğ) * Yerçekimi ivmesi (m/sn^2)

Tork = (0,18m) * (0,76kğ) * (9,81 m/sn^2)

Tork = 1,34 Nm

Başka bir menteşenin load cell ile ölçümü sırasında ölçülen kuvvet ile bununu Nm ye dönüşümünde hesaplanan değer **1,34Nm**'dir. Aşağıda ise tork ölçüm sistemi ile ölçüm sırasında okunan değerin **1,35Nm** olduğu görülmektedir.

Yapmış olduğumuz bu çalışmada sistemin doğrulanması için menteşeler üzerinden load cell ve tork ölçüm düzeneği ile ölçülen tork değerleri yaklaşık olarak

aynı çıkmakta ve değerlerin bu şekilde çıkması da sistemin doğrulanması için gerçekleştirilen ölçümlerin doğruluğunu ispatlamaktadır.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Otomotiv sektöründe kullanılmak üzere araç ön kaput menteşelerinin açılıp kapanma torkunun ölçülebilmesi için bir tork ölçüm sisteminin tasarlanması ve prototipinin üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda tasarlanan parçalar önce bilgisayar ortamında (CATIA) tasarlanmış ve daha sonra hazır olan malzemeler temin edilmiş, talaşlı imalat gerektiren malzemeler ise Sakarya Üniversitesi laboratuvarlarında gerekli talaşlı imalat işlemleri ile üretilmiştir. Sonrasında uygun montaj işlemleri gerçekleştirilerek, menteşelerin torkunu ölçebilecek şekilde prototip imalatı yapılmıştır. Gerekli olan doğrulama testleri yapıldıktan sonra farklı menteşeler ölçülerek ölçüm işlemleri tamamlanmıştır.

Geliştirilen tork ölçüm düzeneği sayesinde ön kaput menteşelerinin manuel olarak yapılan tork ölçümleri tamamen bilgisayar kontrollü olacak şekilde yapılmaktadır. Bu şekilde daha hassas ölçüm yapılarak istenen tork aralığına (0,2 – 2,5 Nm) uygunluğu belirlenecektir.

Yapılan tork ölçüm düzeneğinin mekanik kısımlarında yapılan ufak değişiklikler neticesinde farklı otomobil menteşeleri üzerinde tork ölçümü yapılabilecektir. Bu sayede otomotiv sektöründe farklı mekanizmaların torkunu ölçebilecek yeni bir sistem yapılmış olacaktır.

Klasik yöntemle tork ölçme sisteminde ölçümler belirli miktarda menteşe üzerinde yapılmakta ve ölçülen değerler elle yazılarak sonrasında bilgisayara kaydedilmektedir. Ancak geliştirilen sistem ile servo motorun kontrolü yapılmakta, tork sensöründen alınan verilen anlık olarak görülmekte ve bu veriler yapılan her bir ölçümden sonra excel'e otomatik olarak kaydedilebilmektedir. Bu şekilde üretilen bütün menteşelerin tork ölçümleri hassas bir şekilde ve kısa sürede yapılıp kayıt altına alınabilmektedir.

Menteşe üretimi yapıldığında menteşenin hareketli parçalarının birbirine bağlanması pimin belli bir kuvvetle uç kısmının ovalanarak ezilmesi gerekmektedir. Ovalama esnasındaki giriş parametreleri, perçin üzerine baskı kuvveti, ovalama hızı ve ovalama süresi iken çıkış parametresi ise; mekanizmanın açılıp kapanma torkudur. Sistemin çıkışı tamamen giriş parametrelerine bağlıdır. İleriki çalışmalarda giriş parametreleri ile çıkış parametreleri arasındaki ilişki kurularak istenilen tork aralığı için buna karşılık gelen giriş parametrelerinin belirlenmesinde yapay sinir ağları (YSA) yöntemi kullanılabilecektir. Böylece YSA algoritmasına dayalı

kontrol sistemi istendiğinde farklı ürünlerde farklı tork değerleri için de kullanılabilecektir. YSA tabanlı sistem modeli ve simülasyonu, ilerde bu çalışmanın devamı niteliğinde ayrı bir çalışma olarak düşünülmektedir. Yaptığımız literatür araştırması kapsamında, projenin bu bölümüyle alakalı çalışmanın ilgili bilimsel sahada ilklerden olacağı söylenilebilir. Böylece proje endüstriyel uygulamaya katkısının yanında çalışmanın orijinalliği açısından da akademik sahada da yankı bulacağını ümit etmekteyiz.

KAYNAKÇA

A. Chiba and T. Fukao, "Super high speed electrical machines," 2004. IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1272–1275, 2004.

Alan S. Morris, Reza Langari, "Mass, Force, and Torque Measurement, Measurement and Instrumentation Theory and Application", 2012, Pages 477–496

D.Petreuş, C.Fărcaş, P. Dobra, D. Moga, "Torque Measurement System Design", Technical University of Cluj-Napoca, 26-28 Baritiu Street, Cluj-Napoca, Cluj, 400020, Romania

Dao Thanh Liem, Dinh Quang Truong, Kyoung Kwan Ahn, " School of Mechanical and Automotive Engineering", University of Ulsan, Republic of Korea

DONG Fang, XU Zhe, "Research on Sine Dynamic Torque Measuring System", 2012 International Workshop on Information and Electronics Engineering (IWIEE), doi:10.1016/j.proeng.2012.01.371

Frank Umbach, Heinrich Acker, Johannes von Kluge, Werner Langheinrich, "Contactless measurement of torque", Infineon Technologies AG in 81541 Munich, Germany, Continental Teves AG & Co. OHG, 60488 Frankfurt, Germany, Institut fur Halbleitertechnik, Schlossgartenstrasse 8, 64289 Darmstadt, Germany

Georg Wegener, Thomas Bruns, "Traceability of torque transducers under rotating and dynamic operating conditions", Measurement, doi:101016/j.measurement.2009.08.007

Georg Wegener, Thomas Bruns, " Traceability of torque transducers under rotating and dynamic operating conditions", Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), Germany Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Germany

Isermann, Rolf. 2006. Section 2.2 Sensors, pp. 32-52, of Chapter 2 Hardware, in CIGR Handbook of Agricultural Engineering Volume VI Information

Technology. Edited by CIGR-The International Commission of Agricultural Engineering; Volume Editor, Axel Munack. St. Joseph, Michigan, USA: ASABE. Copyright American Society of Agricultural Engineers.

Jan Zakrzewski, "A New Magnetoelastic Transducer For Torque And Force Measurement", IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Brussels, Belgium, June 4-6, 1996, Chair of Measurement and Control Silesian Technical University, 44-1 01 Gliwice, Poland.

Ji Yeong Lee, Changsoo Han, Sarmad Shams, "Compact and lightweight optical torque sensor for robots with increased range", Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, ERICA Campus, 55, Hanynagdaehakro, Ansan, Gyeonggi-do, Republic of Korea

K.Kaya, B.Akdemir İ.S.Dalmış, "Çapa Traktörleri İçin Tork ve Çeki Kuvveti Ölçüm Düzeneğinin Geliştirilmesi", Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, Cilt/Volume:10 Sayı/Number:1 Yıl/Year: 2013

Karayel, D., & Yegin, V. (2016). Design and prototype manufacturing of a torque measurement system. Acta Phys. Pol. A, 130(1), 272-275.

L. Baghli, J. François Pautex, S. Mezani, "Wireless Instantaneous Torque Measurement, Application to Induction Motors", XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome.

L. Zhao, C. Ham, L. Zheng, T. Wu, K. Sundaram, J. Kapat, and L. Chow, "A highly efficient 200 000 RPM permanent magnet motor system," in Magnetics, IEEE Transactions on, vol. 43, no. 6, Washington, DC, USA, June 2007, pp. 2528–2530.

Li Sun, Hanying Gao, Qingliang Song, Jianhong Nei, "Measurement of Torque Ripple in PM Brushless Motors", Dept. of Electrical Engineering Harbin Institute of Technology Harbin, 150001, 0-7803-7420-7/02/ 2002 IEEE, China.

M. Chandra, Sekhar Reddy, A.S. Sekhar, "Detection and monitoring of coupling misalignment in rotors using torque measurements", Machine Design Section, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai 600036, India

M. Köster, M. Thommes, "In-line dynamic torque measurement in twin-screw extrusion process", Institute of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, Heinrich-Heine-University Duesseldorf, Universitaetsstrasse 1, 40225 Duesseldorf, Germany

M.Verazic, I. Ilic, I. Grasparac, "Vehicle drive Wheel torque measurement fort he purpose of the vehicle traction system simulation model evaluation", June 20-23, 2005, Dubrovnik, Croatia

Peter Sue, Derek Wilson, Lawrence Farr and Andrea Kretschmar, "High Precision Torque Measurement on a Rotating Load Coupling for Power Generation Operations", Engineering Division GE Energy, Greenville, 978-1-4577-1772-7/12/2012 IEEE, South Carolina

Qiaokang Liang, Dan Zhang, Quanjun Song, Yunjian Ge, Huibin Cao, Yu Gea, "Design and fabrication of a six-dimensional wrist force/torque sensor based on E-type membranes compared to cross beams", Faculty of Engineering and Applied Science, University of Ontario Institute of Technology, Oshawa, Ontario, Canada L1H 7K4c

Tristan M. Ericson, Robert G. Parker, "Experimental measurement of the effects of torque on the dynamic behavior and system parameters of planetary gears", Assistant Professor, Department of Physical Sciences, York College of Pennsylvania, York, PA 17403, United States, L. S. Randolph Professor and Head, Department of Mechanical Engineering, Virginia Tech, Blacksburg, VA 24061, United States

V.Niskanen, J.Ahola, "Implementing clamp on wireless torque measurement system for rotating shaft applications (UI)", FI-53851 Lappeenranta, Finland

Wendyam F. Traoré, Roy McCann "Torque Measurements in Synchronous Generators using Giant Magnetoresistive Sensor Arrays via the Maxwell Stress Tensor", University of Arkansas Fayetteville, Arkansas USA

Y.Perriard, Pierre-Daniel Pfister, "Torque Measurement Methods for Very High Speed Synchronous Motors", Ecole Polytechnique F´ed´erale de Lausanne (EPFL), 1015 Lausanne, Switzerland

Z.Jibin, C.Xia, H.Jianhui, X.Yongxiang ,"Design of a novel flywheel reaction torque measurement system based on disturbance observer", Department of Electrical Engineer, Harbin Institute of Technology, Harbin, China

BÖLÜM 2
FLOWFORMING PROSESİNİN AISI 5140 ÇELİK MALZEMEYE UYGULANARAK MİKRO-YAPI VE MUKAVEMET AÇISINDAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Acar Can KOCABIÇAK[1], Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA[2]
[1]Repkon Makina ve Kalıp San. ve Tic. A.Ş. İstanbul, TÜRKİYE
[2]Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, İstanbul, TÜRKİYE

Öz: Flowforming tekniği, plastik şekil verme yöntemi olup çok yüksek hassasiyete sahip silindirik yapıdaki döner simetrik parçaların şekillendirilmesinde kullanılan çok avantajlı ve ileri bir tekniktir. Çalışmamızda flowforming tekniği hakkında bilgiler verilmiş olup re-kristalizasyon (yeniden kristalleştirme) ısıl işlem tavlaması uygulanan AISI 5140 çeliğine flowroming prosesi uygulanarak malzemenin mukavemet ve mikro-yapısındaki değişimler incelenmiştir. Optik mikroskopta incelenen tavlanmış ısıl işlem kondisyonundaki iri ferritik ve perlitik tane sınırlarına sahip malzemenin soğuk deformasyonun etkisiyle tane yapılarının incelip parçanın boyuna doğru yönlendiği gözlenmiştir. Söz konusu tane yönlenmesinin pekleşme etkisiyle akma ve kopma dayanımını arttırdığı fakat süneklilik özelliğini azalttığı belirlenmiştir. Plastik deformasyon sonucu meydana gelen sertlik değişimleri de cidar kalınlığı boyunca mikro sertlik cihazı ile ölçülerek irdelenmiştir. Sertliğin parçanın dış yüzeyinden iç yüzeyine doğru kademeli olarak azaldığı gözlenmiştir. Bu çalışmamızda flowforming prosesinin mekanik ve mikro-yapı özelliklerine kazandırdığı avantajları belirlemek amacıyla AISI 5140 malzemesi flowforming ile şekillendirilerek sonuçları bu kapsamda incelenmiştir.

GİRİŞ

Flowforming tekniği, rotasyonel yönde simetrik parçaların üretilmesine olanak sağlayan bir soğuk şekillendirme yöntemidir. Prosesteki temel mekanizma kısa ve cidar kalınlığı fazla olan başlangıç malzemesinin (preform), şekillendirme röleleri ile et kalınlığı inceltilerek boyunun uzatılması prensibine dayanmaktadır.

Bu teknik ile malzeme şekillendirilirken herhangi bir talaş kaldırma işlemi yapılmamaktadır ve malzeme mukavemet değerlerinde talaşlı imalata göre kayda değer artışlar sağlanmaktadır. Flowforming tekniği "sürekli" soğuk dövme prosesi olarak nitelendirilebilir. Birçok soğuk dövme prosesinde olduğu gibi flowforing ile şekillendirme prosesinin ardından malzeme içyapısında pekleşme etkisi meydana gelmekte ve bu sayede malzemenin mukavemet değerlerinde artış gözlenmektedir (Haghshenas ve Klassen, 2015). Mukavemet artışlarının sağlanmasıyla birlikte geleneksel talaşlı imalat yöntemlerine göre daha hafif parçalar üretmek mümkün hale gelmektedir (Tsivoulas et al. 2015). Flowforming teknolojisi genellikle uzay, havacılık ve savunma sanayi sektörleri başta olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır. Söz konusu teknik jet ve helikopter motor şaftları, roket boruları ve yüksek hassasiyet istenilen özel boruların üretiminde kullanılmaktadır

Flowforming metodu ile malzemelere talaş kaldırma işlemi uygulanmadan nihai formda veya final form geometrisine en yakın ölçülerde parçalar üretilebilmektedir. Söz konusu şekillendirme tekniği kapsamında birçok farklı çapta ve uzunlukta borular oldukça hassas ve dar toleranslarda üretilebilmektedir. Bu avantajlarının yanında flowforming tekniği sayesinde talaş kaldırma işlemlerinde meydana gelen (hurda) malzeme kayıplarının da önüne geçilerek daha az malzeme sarfiyatı ile daha ekonomik üretimler yapmak mümkündür. Flowforming prosesinde başlangıç parçası sağda (preform) ve solda final ürün (flowforming sonrası parça) fotoğrafı Görsel 1'de gösterilmiştir.



Görsel 1. Flowforming Makinası Ve Parça Fotoğrafı

Flowforming tekniğinin başlıca avantajları aşağıda sıralanmıştır (Sivanandini, Dhami, ve Pabla 2012; M. J. Roy ve Maijer 2015; Rhodes ve ark. 2010; Matthew J. Roy, Maijer, ve Zhao 2014; Ghiotti ve ark. 2020):

1. Soğuk deformasyondaki pekleşme etkisi ile şekillendirilen malzemelerin mukavemetinde artış meydana gelir. Malzemenin tane yapısı, hem ince taneli yapı haline getirilirken hem de malzeme boyunca eksenel doğrultuda (uzunlamasına yönde) yönlendirilmiş olur. Malzemenin çekme ve akma mukavemet değerlerinde ortaya çıkan iyileştirmeler sayesinde daha hafif ve daha uzun ömürlü parça tasarımları yapmak mümkündür.

2. Flowforming işlemi bir nevi "sürekli" soğuk dövme metodu olduğu için malzeme içindeki bağ yapıları kesintiye uğramadan şekillendirir. Bu durum mukavemet özelliklerini kayda değer bir şekilde iyileştirme meydana getirmektedir. Yükselen mukavemet değerleri sayesinde çok yüksek sıcaklık, basınç ve aşınma etkisi altında çalışan parçalarda daha uzun ömür kazanımı yaratmaktadır.

3. Final ürün geometrisine yakın veya tam bir form elde edilmektedir. Proses sonrası derin delik delme veya delik içi tornalama ihtiyacı ortadan kaldırılmakla birlikte dış ölçülerde talaşlı imalat ihtiyacı minimum düzeydedir.

4. Parça geometrileri genellikle talaş kaldırmadan (ve/veya minimum düzeyde talaş kaldırarak) üretilebildiği için daha az başlangıç ham malzemesi (preform) kullanımı ile üretim yapmak mümkün olmaktadır.

Flowforming sırasında meydana gelen plastik deformasyon etkilerini anlamak için birçok farklı çalışmada sonlu elemanlar yöntemleriyle proses incelenmiştir. Bu kapsamda Mohebbi ve Akbarzadeh (2010) ABAQUS/Explicit programını kullanarak rijit yapıda bir FE modeli sayesinde flowforming sırasındaki deformasyon mekanizmasını araştırmış ve temel gerilmeleri radyal, eksenel ve teğetsel olmak üzere üç yöne ayırmıştır. Yapılan deformasyon analizleri sonucunda parçanın eksenel yönde gerilemelerinin gözlenmesinin yanında aynı zamanda enine kesitte de yüksek kesme gerilmelerinin meydana geldiği gösterilmiştir.

Xu ve ark. (2001) flowforming sırasında meydana gelen gerilme ve gerilme dağılımını incelemek için sonlu elemanlar modeli oluşturmuş ve hem ileri hem de geri flowforming mekanizmasını araştırmışlardır. Bu çalışmada 3D Plastik rijit malzeme modeli kullanılarak aynı proses parametrelerinde şekillendirme sonrası malzemede meydana gelen stres ve uzama miktarları karşılaştırılmıştır. İki şekillendirme tekniği arasında malzemelerin dislokasyon hareketliliklerinde kayda de-

ğer bir fark gözlenmemiş olup deformasyon alanı, radyal, teğetsel ve eksenel yönlerdeki göre sınıflandırılmıştır. Burada meydana gelen deformasyonlar çap değişimlerine ve genel malzeme matrisinin sapması ile ifade edilmektedir.

M. J. Roy, Klassen, ve Wood (2009) plastik gerilmenin parçanın cidar kalınlığı boyunca dağılımını incelemek amacıyla mikro sertlik ölçümünü kullanmıştır. Flowforming ile şekillendirme işleminden kaynaklanan gerçek gerilimi ve gerilimini belirlemek için AISI 1020 çelik malzemenin et kalınlığı boyunca sertlik dağılımını incelemişlerdir. Yapılan incelemeler sonucunda eşdeğer plastik gerilimi, iş parçasının iç ve dış yüzeylerinde daha yüksek olup iş parçasının merkezinde en düşüktür. İş parçası, son şekillendirme aşaması sırasında, kalınlığın azalmasına bağlı olan yüksek eşdeğer plastik gerilimi gözlenmiştir. Redüksiyon oranı arttıkça röle ile iş parçası arasındaki bölgesel plastik gerilmenin mandrel ara-yüzeyine oranla hızlı arttığı da gözlenmiştir.

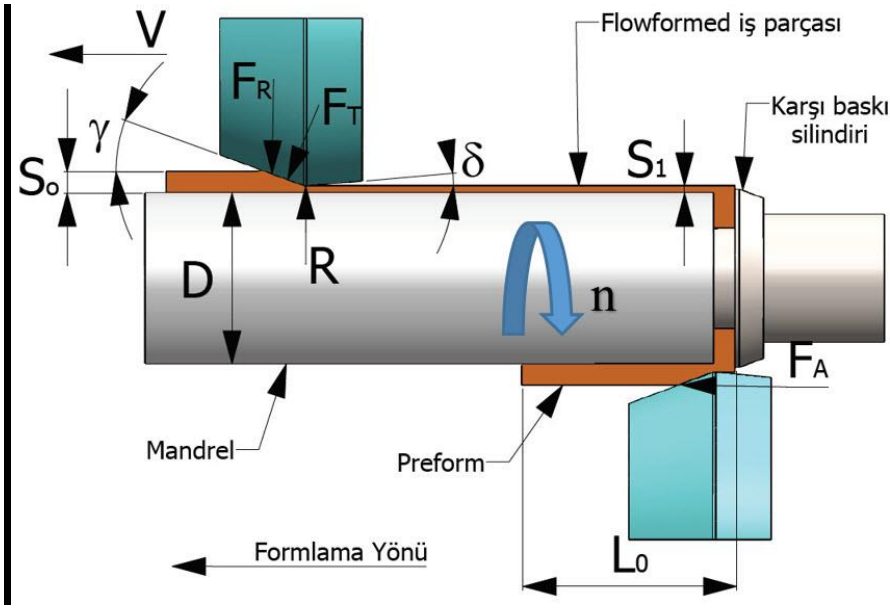
Malzeme kondisyonları kadar proses sırasında kullanılan soğutma suyu cinsi ve miktarı da oldukça kritiktir. Prakash ve Singhal (1995) yaptıkları çalışmalarda kullanılan soğutma suyunun şekillendirme kuvvetlerine önemli bir katkısı olmadığını ancak proses sonrası yüzey pürüzlülüklerine çok ciddi etkisi olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca yüzey düzgün yüzey pürüzlülüğü elde etmek için kullanılan rölenin de geometrisi oldukça önemlidir (Singhal, Das, ve Prakash 1987).

Bu çalışmamızda AISI 5140 malzemesi flowforming ile şekillendirilerek malzemenin mikro-yapı ve mukavemet artışlarındaki değişimin incelenmesi amaçlanmıştır. Proses sırasında soğutma suyu olarak bor yağı kullanılmış olup sürtünmeden kaynaklı ısının minimize edilmesi amaçlanmıştır.

YÖNTEM

Flowforming tekniğin temel olarak amacı kısa ve et kalınlığı fazla olan başlangıç malzemesinin (preform), et kalınlığı inceltilerek boyunun uzatılması prensibine dayanmaktadır. Parçanın bir ucunun fener mili sistemine tutturulması ile birlikte, ana mil motorundan gelen devir ve dönme momenti etkisi iş parçası üzerine aktarılarak, parçanın rölelerin oluşturduğu ezme etkisi altında dönmesi ve bu sayede istenilen formda şekillendirilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu tekniklerin hepsinde başlangıç malzemesi bir ucundan fener mili tahrik sistemine entegre edilmekte (bağlanmaktadır). Parçanın bir ucunun fener mili sistemine tutturulması ile birlikte, ana mil motorundan gelen devir ve dönme momenti etkisi iş parçası üzerine aktarılarak, parçanın rölelerin oluşturduğu ezme etkisi altında dönmesi ve dolayısıyla da istenilen formda şekillendirilmesi prensibine dayanmaktadır.

Flowforming mekanizması ve proses sırasında etki eden parametreler Görsel 2'de gösterilmiştir.



Görsel 2. Flowforming Mekanizması Şematik Gösterimi

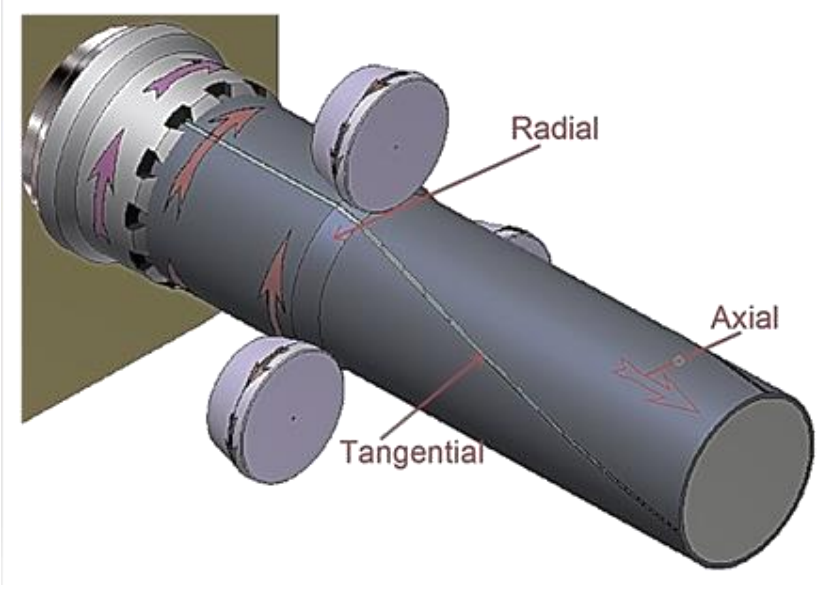
Tablo 1. Flowforming Parametreleri

S_O Başlangıç et kalınlığı (mm)	**γ Röle şekillendirme açısı (derece°)**	**F_A Eksenel kuvvet (N or Kg)**
$S_,$ Final ürün kalınlığı (mm)	δ Röle çıkış açısı angle (derece°)	F_R Radyal kuvvet (N)
L_O Başlangıç parça boyu (mm)	R Röle radyusu (mm)	F_T Teğetsel kuvvet (N)
D İç çap (mm)	V İlerleme oranı (mm/minute)	n Spindle hızı (rpm)

Görsel 2 ve Tablo 1'de de gösterildiği gibi prosesi etkileyen birçok farklı parametre vardır. Bu parametrelerle birlikte preform malzemesinin mekanik ve kimyasal özellikleri de şekillendirme sırasında oldukça önemlidir. Proses sırasında preforma uygulanan redüksiyon oranı ve malzemenin ısıl işlem koşulu oldukça kritiktir. Burada belirlenen parametreler proses tamamlandıktan sonra şekillendirilen parçanın mekanik ve sertlik özelliklerini doğrudan etkilemektedir.

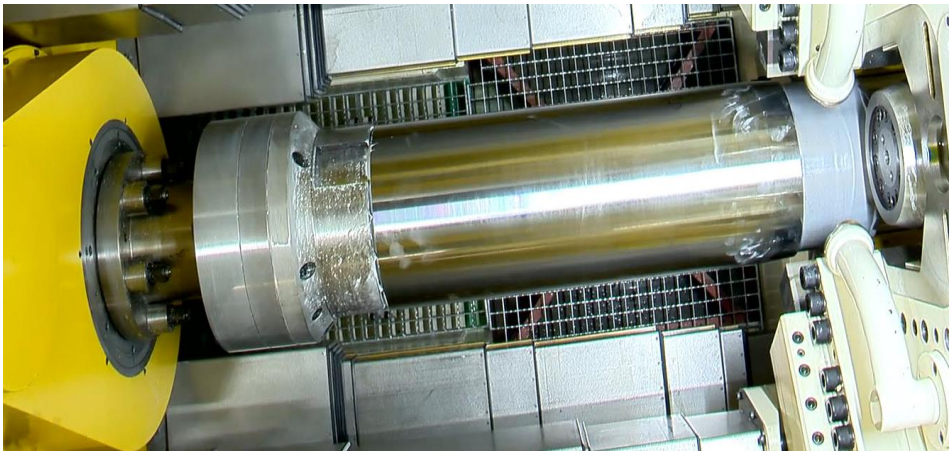
Flowforming yöntemi bir ucu açık, diğer ucu ise kısmen ya da tamamen kapalı boru biçimindeki, silindirik ön formlu malzemelerin şekillendirilmesi için uygulanan bir yöntemdir. Görsel 2'de gösterildiği üzere proses sırasında parçanın tam ya da yarı kapalı ucu karşı baskı sistemi tarafından kalıbın ön yüzeyine doğru sıkıştırılmaktadır. Kalıbın ön yüzü ile parça arasında oluşan sıkıştırma etkisi (sürtünme kuvvetleri) nedeniyle iş parçası kalıp sistemi ile beraber dönmeye zorlanmaktadır.

Flowforming prosesi sırasında şekillendirme röleleri iş parçasının dönme yönünde serbesttir. Malzemenin dış çeperleri şekillendirici röleler tarafından şekillendirilirken, malzemelerin iç yüzeyi de mandrelin (şekillendirme kalıbının) form geometrisini almaktadır. Rölelerin malzeme üzerine ezme kuvveti oluşturması ile şekillendirme işlemi sağlanmaktadır. Rölelerin, malzemeyi kalıp üzerine bastırarak şekillendirmesini sağlamaktadır. Ana iş motoru parçayı dönme yönünde tahrik etmekte, röleler ise radyal baskı kuvveti ile parçayı şekillendirmektedir. Ana fener mili motorundan elde edilen tork rölelerin frenleme etkisi yenerek malzemeyi rölelerin altından geçmeye zorlamakta ve sonuç olarak malzeme et kalınlığı inceltilerek şekillendirilmektedir. Rölelerin göstermiş olduğu frenleme etkisi hem radyal yönde iş parçasına baskı kuvveti yaratmakta hem de malzemenin burularak şekillendirilmesine olanak sağlamaktadır, iş parasına etki eden yönlenmeler Görsel 3'te belirtilmiştir.



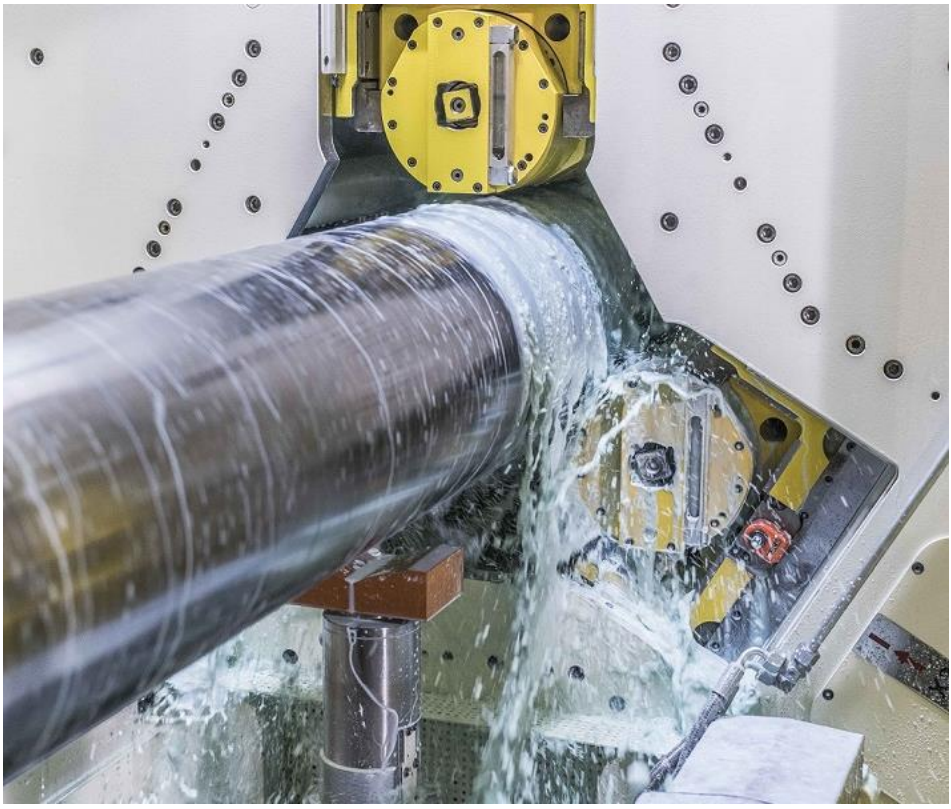
Görsel 3. Şekillendirme Sırasında Etki Eden Kuvvetler

Ana fener mili motorundan elde edilen tork mandreli ve iş parasını döndürmektedir. Ayrıca ana fener mili eksenel yönde hareket ederek iş parçasının şekillendirme rölelerinin altından ilerlemesini sağlamaktadır. Ana fener milinin ve iş parçasının fotoğrafı Görsel 4'te belirtilmiştir.



Görsel 4. Ana Fener Mili Ve İş Parçası

Proses sırasında röle, iş parçası ve mandrel arasındaki sürtünmeyi minimize etmek için bor yağı kullanılmaktadır. Ayrıca şekillendirme sonrası malzemenin cinsine ve proses parametrelerine göre yaklaşık 0,6 Ra (µm) ve daha pürüzsüz yüzey pürüzlülükleri elde edilebilmektedir. Proses sırasında makinada şekillendirilen parça fotoğrafı Görsel 5'te ve proses sonrası elde edilen ürün fotoğrafı da Görsel 6'da verilmiştir.



Görsel 5. Flowforrning Prosesi



Görsel 6. Flowforming Sonrası Üretilen Parça

Araştırma modeli ve deneysel uygulama

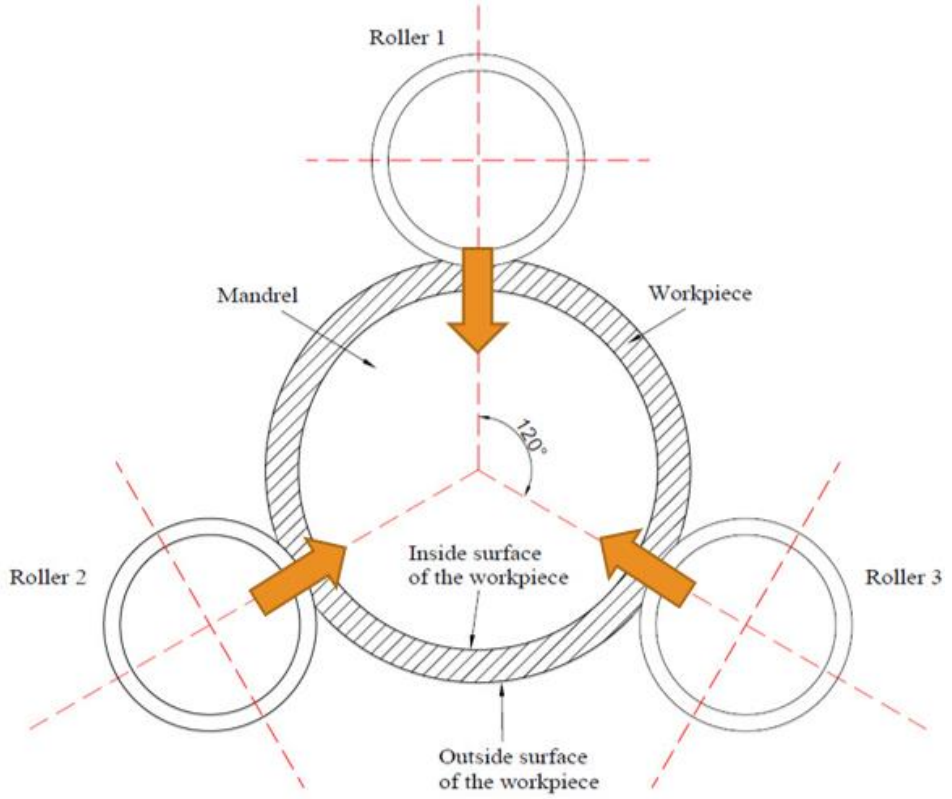
Şekillendirme röleleri Görsel 7 de de belirtildiği gibi iş parçasının dış yüzeyinden baskı kuvveti olarak şekillendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu bölgedeki kuvvet aktarımından ötürü iş parçasının cidar kalınlığı boyunca farklı sertlik dağılımına neden olması beklenmektedir.

Deneysel çalışmamız kapsamında re-kristalizasyon (yeniden kristalleştirme) ısıl işlem tavlaması uygulanarak AISI 5140 çeliğine %50 redüksiyon oranında flowroming prosesi ile şekillendirilmiştir. Flowforming prosesinde cidar kalınlığındaki redüksiyon oranı ve alanı aşağıda belirtilen denklemler ile hesaplanmaktadır (Marini et al. 2016; Prakash ve Singhal 1995; Singhal, Das, ve Prakash 1987).

$$R = \left[\frac{(S_0 - S_1)}{S_0}\right] \times 100 \quad (1)$$

$$Ra = \left[\frac{A_o - A_1}{A_0}\right] \times 100 \quad (2)$$

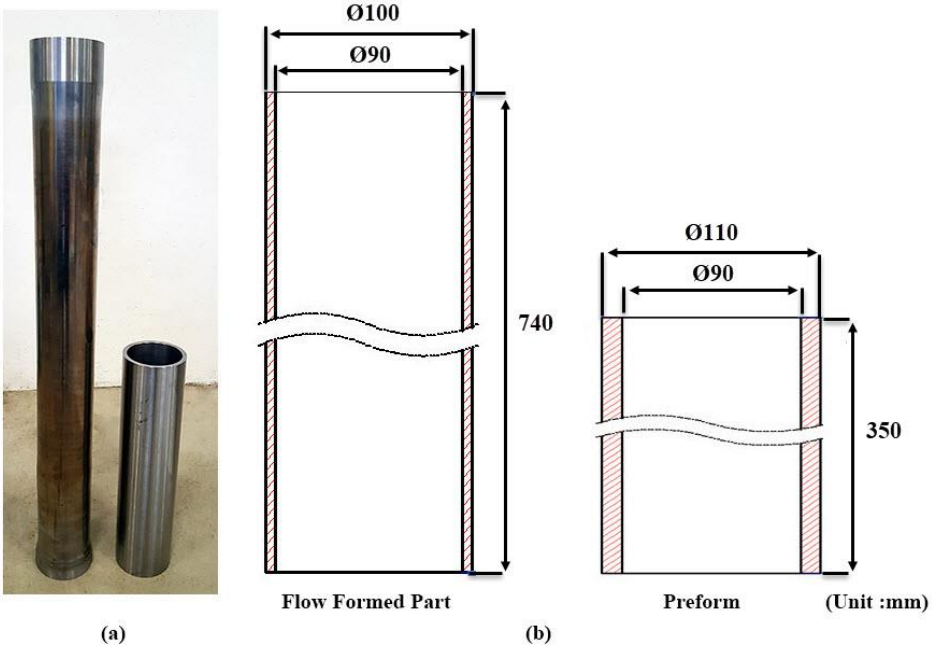
Şekillendirme işlemi sonrasında malzemenin mekanik ve mikro-yapı değişimleri belirtilmiştir. Yeniden kristalleştirme ısıl işlem tavlaması uygulanmış çelik malzemelerin dislokasyon yoğunluğu en uygun seviyelere (yaklaşık 10^4) ulaşmasından ötürü plastik deformasyona en uygun kondisyondur (Srinivasulu, Komaraiah, ve Rao 2012; Şchiopu ve Luca 2016; Nagarajan ve ark. 1981; Gungor ve ark. 2005).



Görsel 7. Rölelerin Konumu

Şekillendirme röleleri iş parçasının dış çapından merkeze doğru radyal yönde kuvvet uygulayarak malzemenin cidar kalınlığının inceltilmesini sağlamaktadır. İş parçasının röle ile temas bölgesi dış yüzey, mandrel ile temas bölgesi iç yüzey olarak tanımlamaktadır.

Deneysel çalışmamız kapsamında Ø90 mm iç çapında, 10 mm et kalınlığında ve 350 mm boyundaki preform malzeme %50 redüksiyon ile şekillendirilerek parçanın uzaması sağlanmıştır. Proses sonrası elde edilen parçanın boyu 740 mm olup et kalınlığı 5 mm olmuştur. Parçanın iç çapında herhangi bir değişiklik olmamıştır. Ürünlerin fotoğrafları Görsel 8 (a) ve ölçüleri Görsel 8 (b) de gösterilmiştir.



Görsel 8. (a) Flowforming ve Preformun Fotoğrafı, (B) Parça Ölçüleri

AISI 5140 malzemesinin ASTM A29 / A29M standardına göre kimyasal bileşimi Tablo 2'de gösterilmektedir. Malzeme yüksek yüke, düşük darbeye ve iyi aşınma direncine sahiptir, bu sebeple AISI 5140 malzeme genel olarak gemi ve otomobil parçalarında kullanılmaktadır (Nie, Chen, and Wu 2020). İçerisinde barındırdığı Cr ve Mn sayesinde dayanımı ve sertleşebilme özelliği yüksektir. Cr karbür yapıcı bir element olması sebebiyle yüksek sıcaklığa karşı dayanım sağlamaktadır. İçerdiği Cr sayesinde korozyon dayanımı da yüksektir. Bu sebeple gemilerde olduğu gibi yüksek korozyonun olduğu bölgelerde kullanılması tercih edilmektedir. Sahip olduğu Mn alaşımı ile malzemenin tokluğu ve darbelere karşı şok emiciliği artmaktadır.

Tablo 2. ASTM A29/A29M Standardına Göre AISI 5140 Malzemenin Kimyasal Özellikleri

Element	**C**	**Cr**	**Si**	**Mn**	**P**	**S**
ASTM 29/A29M	0.38–0.43	0.70–0.90	0.15–0.35	0.70–0.90	≤0.035	≤0.040
Ölçülen değer	0.40	0.80	0.20	0.71	0.024	0.009

Araştırma grubu

Çalışmamız kapsamında AISI 5140 çelik malzemesini flowforming ile şekillendirilmesi ve mukavemet artışları ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir. Ana araştırma konusu olarak flowforming prosesinin preform malzeme üzerine etkileri ve rölelerin proses sırasındaki konumlarından ötürü meydana gelen dış çaptan iç çapa doğru sertlik dağılımları belirlenmiştir. Bu kapsamda uygulama çalışması yapılarak preform ile şekillendirilmiş parça karşılaştırılmıştır.

Veri toplama araçları

Deneysel çalışmamız sırasında çelik malzemesinin mikro-yapı ve mekanik testleri yapılmıştır. Bu testlerle birlikte et kalınlığı boyunca sertlik dağılımları incelenmiştir.

Malzemelerin sertliği üzerindeki flowformingin etkilerinin incelenmesi adına Emco Test Durascan-20 cihazı kullanılmıştır. Uygulanan sertlik testleri ile sertlik derinliği (HV0,1) incelenmiştir. Söz konusu sertlik testleri, sertlik dağılımını analiz etmek için flowforming ile üretilmiş malzemenin cidar kalınlığı boyunca uygulanmıştır.

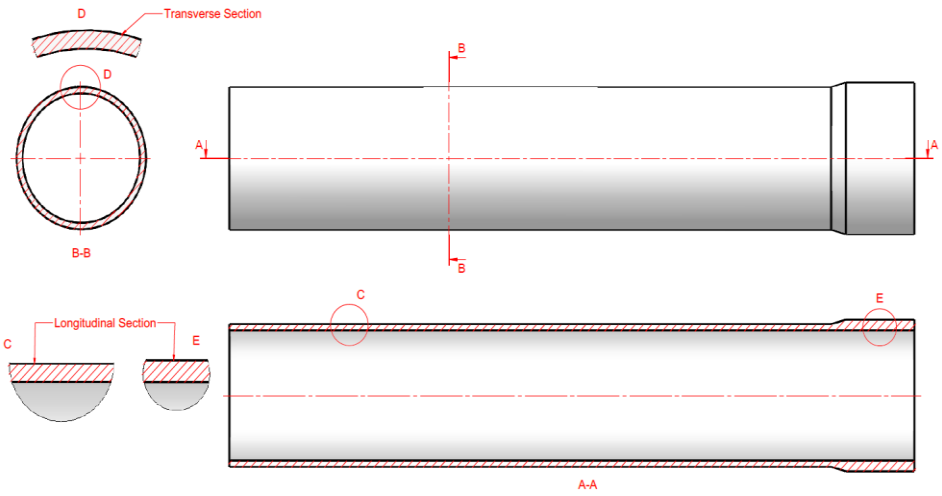
Çekme testleri Instron 3382 çekme cihazı kullanılarak yapılmış olup ASTM E8M standardına göre testler uygulanmıştır. Çekme testleri ile preformun ve plastik deformasyona uğramış olan malzemelerin akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve uzama özellikleri çekme eğrileri kullanılarak saptanmıştır.

Akma gerilmesi bir malzemenin plastik deformasyona başladığı ve aynı zamanda doğrusal olmayan deformasyonun başladığı gerilme noktasını temsil eder. Çekme gerilmesi bir gerilim olarak tanımlanır ve birim alan başına kuvvet olarak ölçülür. Maksimum çekme dayanımı ise bir çekme testinde maksimum mühendislik gerilimi olarak belirlenmiştir. Maksimum çekme dayanımı, boyun verme noktasının başlangıç bölümünü gösterir.

Preformun ve şekillendirilmiş parçanın mikro-yapılarını incelemek amacıyla Olympus CX43 Optik Mikroskop kullanılmıştır. Mikroskop incelemeleri sırasında 200x ve 500x büyüklüklerde mikro-yapı görüntüleri alınmıştır.

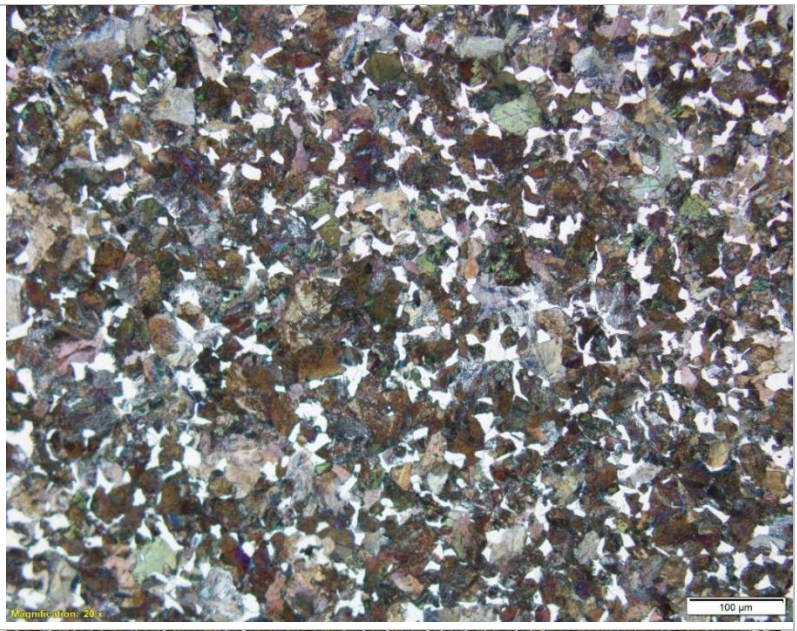
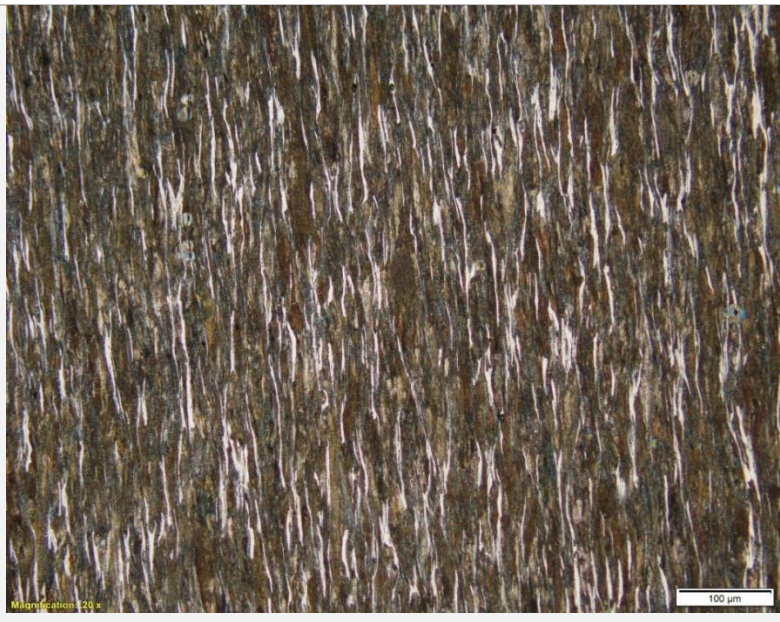
BULGULAR

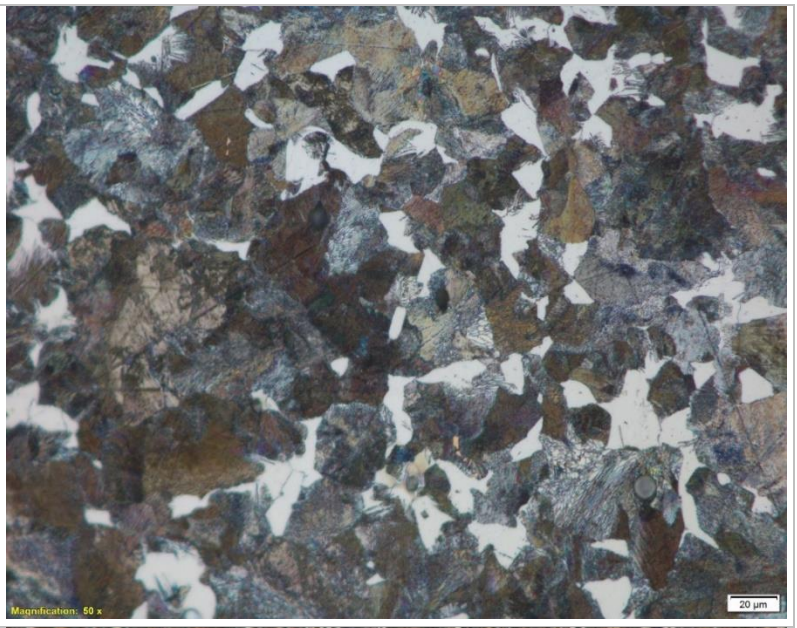
Mikroyapı karakterizasyonunu incelemek için preformun ve flowforming ile şekillendirilmiş parçanın mikro-yapı numunelerinin alındığı bölgeler Görsel 9'da verilmiştir. C ve E ile gösterilen kesitlerden malzemenin mikro-yapı numuneleri alınmıştır. C kesiti ile belirtilen numune flowforming yüzeyinden alınmış olup E ile gösterilen alan is preform parçasıdır.



Görsel 9. Mikroyapı ve Sertlik Testleri İçin Numunelerin Alındığı Bölgeler

Mikroyapı görüntülerinin yanı sıra şekillendirilmiş parçanın et kalınlığı boyunca sertlik dağılımları da incelenmiştir. Bu numuneler ise D ve C bölgelerinden alınarak malzemenin kazandığı sertlikler araştırılmıştır. Görsel 10'da (a ve b 200x büyütme, c ve d 500x büyütme) sırasıyla mikro-yapı görüntüleri verilmiştir. Ferritik (beyaz) ve perlitik (kahverengi) yapı ile karbür / ferritin farkı belirgin olarak gözükmektedir. Görsellerdeki ölçekler referans alınarak preform malzemenin ferritik boyutunun 10 ila 50 µm arasında değişkenlik gösterdiği, perlitik boyutunun yaklaşık 20-80 µm aralığında değiştiği belirlenmiştir. Bu durumun yanı sıra Görsel 10 (b ve d) 'de flowforming etkisiyle tane yapılarının parça uzunluğu boyunca yönlendiği net bir şekilde görülmektedir. Re-kristalizasyon tavlama kondisyonunda olan preformda iri taneler mevcutken soğuk deformasyonun etkisiyle dislokasyonların hareket ettiği ve bütün faz/taneciklerinin parça boyunca uzadığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, Görsel 10 a ve c 'de görülebileceği gibi, tavlanmış durumdaki AISI 5140 çelik malzemede tane yönelimleri de saptanmamıştır. Plastik deformasyon sonucunda yönlenme ile birlikte ferritik ve perlitik fazların uzunluğunun sırasıyla 20-120 µm ve 20-60 µm'ye ulaştığı gözlenmiştir.

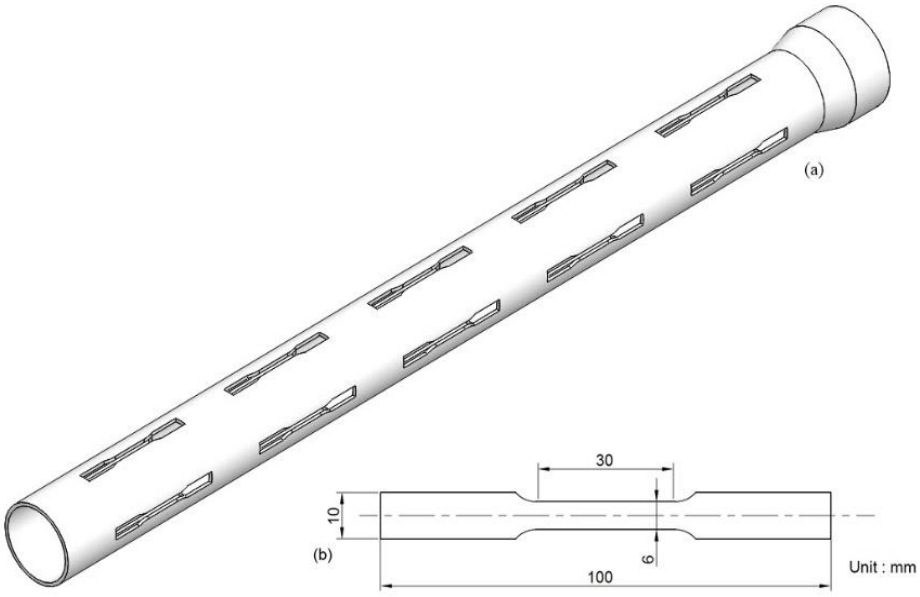
a		
b		

c	
d	

Görsel 10. Preform (A, C) ve Flowforming (B, D) İle Şekillendirilmiş Parçanın Mikro-Yapı Görüntüleri

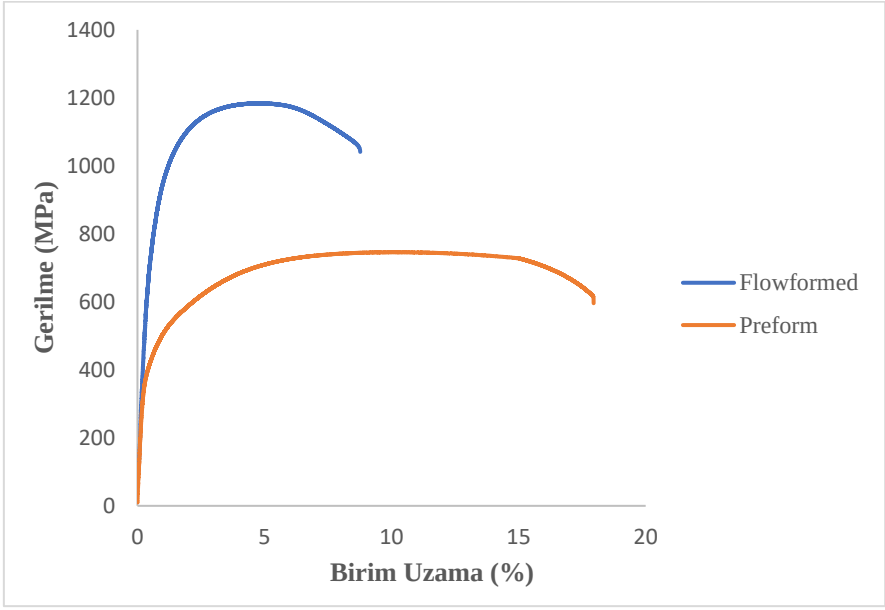
İki malzemenin de çekme testleri yapılarak plastik deformasyonun mekanik özelliklere etkileri de incelenmiştir.

Flowforming uygulanmış boru malzemeden ve preformdan Görsel 11'de gösterildiği gibi uzunlamasına 10 adet çekme numunesi çıkartmıştır. Çekme numunelerinin çıkartılması için su jeti kullanılmıştır. Çekme testleri ASTM E8M standardına göre uygulanıp 1 mm / sn hızla çekme testleri yapılmıştır. Çekme testi sonuçlarından alınan ortalama değerler Görsel 12'deki grafikte gösterilmiştir.



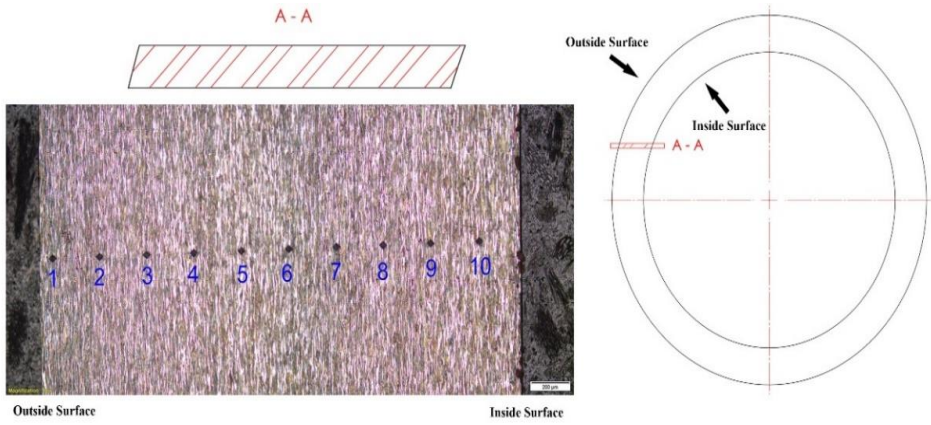
Görsel 11. (A) Çekme Testi İçin Numunenin Kesme Konumu, (B) Test İçin Numune Boyutları

Tavlanmış AISI 5140 numunesinden (preform) elde edilen akma dayanımı yaklaşık 350 Mpa, olup maksimum kopma dayanımı yaklaşık 745 Mpa'dır. Flowforming ile şekillendirilen borunun ise akma dayanımı 900 Mpa ve kopma dayanımı 1190 Mpa mertebelerine yükselmiştir. Preformun uzama miktarı %18'ken soğuk şekillendirilmiş parçanın uzama miktarı %9 olmuştur.

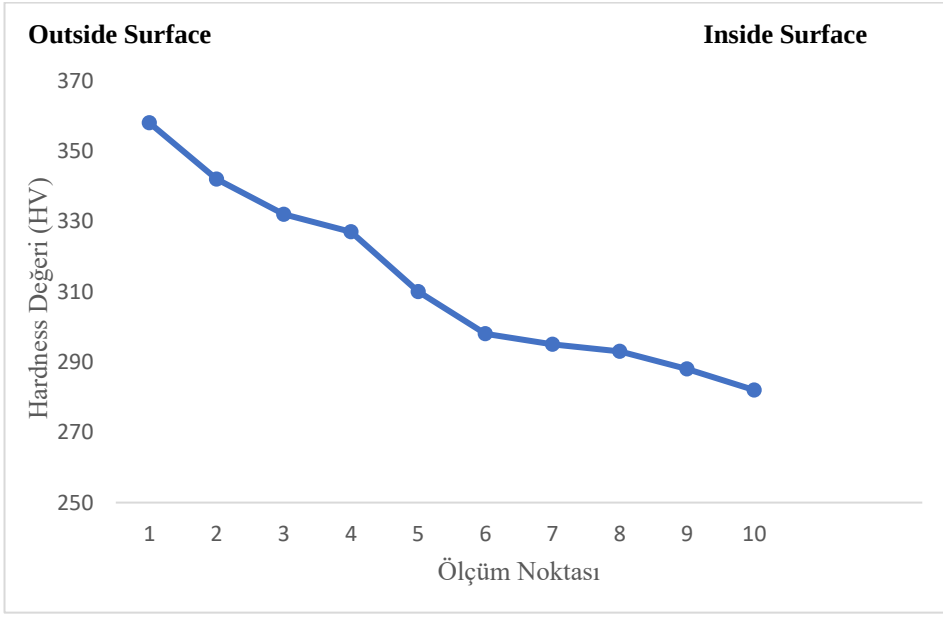


Görsel 12. Çekme Testi Sonuçları

Çekme testlerinin yanında Vickers yöntemi ile sertlik testileri de yapılmıştır. Sertlik testleri cidar kalınlığı boyunca 500 µm (mikron) aralıklarla 10 ayrı noktadan yapılmıştır ve flowforming ile üretilmiş parçanın sertlik derinliği incelenmiştir. Yapılan sertlik testleri Görsel 13'te belirtildiği şekilde parçanın et kalınlığı boyunca alınarak (A-A kesiti) 10 farklı noktadan ölçülmüştür ve ölçüm sonuçları Vickers(HV) olarak gösterilmiştir. Ölçüm noktaları borunun dış yüzeyden iç yüzeyine doğru sırasıyla 1,2,3,…, 10 numaralı noktalardan mikro sertlik cihazı ile ölçülmüştür.



Görsel 13. (A) A-A Kesitinde Sertliklerin Ölçüldüğü Noktalar (1,2,3,…, 10), (B) Flowforming İle Üretilmiş Borunun Enine Kesiti



Görsel 14. Sertlik Testi Ölçüm Sonuçları

Görsel 14'te belirtilen 1 numaralı nokta parçanın en dış yüzeyini belirtirken 10 numaralı nokta ise parçanın en iç yüzeyini ifade etmektedir. Malzemenin mekanik ve sertlik değerleri grafiklerden referans alınarak oluşturulmuş genel durumu Tablo 3'te belirtilmiştir.

Tablo 3. AISI 5140 Malzemenin Preform Ve Flowforming Kondisyonundaki Mekanik Değerler

Kondisyon	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)	Birim Uzama (%)	Ortalama Sertlik (HV)
Tavlanmış (Preform)	350	745	18	250
Flow formed	900	1190	9	320

TARTIŞMA

Yapılan deneysel çalıma kapsamında yeniden kristalleştirme tavlaması uygulanmış AISI 5140 malzemenin plastik deformasyon sonrasında tane yönlenmelerine ve dislokasyon yoğunluğunu arttırmasına bağlı olarak malzemenin mukavemetinde ve sertliğinde artış meydana gelmiştir (Haghshenas, Wood, and Klassen 2012; Maj et al. 2018; Wang et al. 2018). Başka bir ifadeyle, flowforming ile elde edilmiş parça, çok sayıda uzatılmış çelik matris içeren ince "lif benzeri" mikro yapı özelliği gösterir. Yüksek oranda plastik deformasyon prosesleri sonucu olarak, ikincil fazlar yönlendirilebilir. Bu şekilde uzatılarak şekillendirilmiş mikroyapı, dislokasyon yoğunluğunu arttırdığı için malzemenin mekanik ve sertlik özelliklerini doğrudan arttırmaktadır (Karakaş, Kocabıçak, Yalçınkaya ve Şahin 2021). Burada meydana gelen yönlenmeler, flowforming yönteminde olduğu gibi yüksek oranda uygulanan soğuk şekillendirme proseslerinde meydana gelir (Gungor et al. 2005).

Mikro-yapıda meydana gelen yönlenmelerin yanında AISI 5140 gibi çelik malzemelerdeki düşük istiflenme hatası sebebiyle alüminyum malzemelere kıyasla daha yüksek mukavemet artışları sağlamaktadır. Bu sebeple alüminyum malzemelerde soğuk deformasyon sonrası yüksek mukavemet değerlerine ulaşabilmek için sertleştirme ısıl işlemlerinin ve gerekirse ara fazdaki ısıl işlemlerin yapılması gerekmektedir ancak çelik malzemelerde ısıl işlem yapılmasa dahi yüksek mukavemet değerleri elde edilebilir (Kocabıçak et al. 2021).

Sertlik değerlerindeki artış cidar kalınlığı boyunca dış yüzeyden iç yüzeye doğru kademeli olarak azaldığı gözlenmiştir. Bu durumun ana sebebinin et kalınlığı boyunca dış yüzeyden iç yüzeye doğru kuvvet aktarımındaki azalma olarak değerlendirilebilir. Ayrıca şekillendirilen malzemenin et kalınlığı arttıkça daha yüksek sertlik dağılımı olabileceği ve bu sebeple radyal yönde baskı kuvvetlerinin daha yüksek olması beklenmektedir (Marini, Cunningham, ve Corney 2015; Marini ve ark. 2016). Röleler ile iş parçasının arasındaki sürtünme ve sürtünmeye bağlı olarak meydana çıkan ısı miktarının iç yüzeye göre daha yüksek olduğu göz

önüne alındığında bu şekilde sertlik dağılımlarının da meydana gelmesi beklenmektedir (Rajan, Deshpande, ve Narasimhan 2002). Bu bölgede oluşan yüksek soğuma hızları tane boyutunda ve yönlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Sertlik dağılımındaki farklılığın bir diğer sebebi de bu yüzeydeki soğuma hızından kaynaklanabilmektedir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu deneysel çalışmamızda re-kristalizasyon (yeniden kristalleştirme) tavlanması uygulanmış AISI 5140 malzemenin flowforming ile şekillenidirilerek mekanik, sertlik ve mikro-yapı değişimleri incelenmiştir. Yapılan çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda belirtilmiştir.

1. Tavlanmış kondisyondaki AISI 5140 çeliğinin %50 redüksiyon oranı uygulayarak flowforming ile şekillendirmek mümkündür.

2. Preforma kıyasla şekillendirilmiş malzemenin akma mukavemetinde 2,5 kattan fazla iyileşme görülürken kopma dayanımı da yaklaşık %60 oranında artış gözlenmiştir.

3. Malzemenin sertlik değeri de 250 HV'den 320 HV mertebelerine yükselerek yaklaşık %28 artış elde edilmiştir. Malzemenin sertlik derinliği ve dağılımı de incelenerek boru parçanın dış çapından iç çapına doğru sertliğin azaldığı gözlenmiştir.

4. Sertlik dağılımında farklılık gözlenmesine karşılık tane büyüklüklerinin tavlanmış malzemeye göre küçüklüğü ve yönlenmelerin et kalınlığı boyunca homojen bir şekilde oluştuğu gözlenmiştir.

5. Literatür araştırmalarına ve optik mikroskoptan alınanan mikro-yapı görüntülerine dayanarak mukavemet artışındaki en büyük etkenin dislokasyon yoğunluğunun artışı olsa da ilerleyen çalışmalarda Taramalı Elektron Miroskobu (SEM) kullanılarak çekme testi yüzeylerindeki tane küçülmeleri de incelenmelidir. Ayrıca SEM sonrası EDS analizi yapılarak oluşan çökeltiler ve ikinci fazlar incelenmelidir.

6. Hem preform malzemenin hem de flowforming ile şekillendirilmiş parçanın dislokasyon yoğunluklarının incelenmesi için Transmisyon Elektron Mikroskobu (TEM) kullanılarak buradaki değişimlerin disokasyon hareketlerinin incelenmesi önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Repkon Makina ve Kalıp San. ve Tic. A.Ş Araştırma merkezinde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, deneysel çalışmaya destek veren Repkon Makina ve Kalıp San. ve Tic. A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

Ghiotti, Andrea, Michele Brun, Enrico Simonetto, Stefania Bruschi, and Giorgio Muffato. 2020. "ScienceDirect ScienceDirect Insights in Strain and Stress States of Conical Shapes Flow Forming." *Procedia Manufacturing* 47 (2019): 335–41. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.270.

Gungor, Mehmet N., Ibrahim Ucok, Lawrence S. Kramer, Hao Dong, Nicholas R. Martin, and Wm Troy Tack. 2005. "Microstructure and Mechanical Properties of Highly Deformed Ti-6Al-4V." *Materials Science and Engineering A* 410–411 (November): 369–74. https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.141.

Haghshenas, M., and R. J. Klassen. 2015. "Mechanical Characterization of Flow Formed FCC Alloys." *Materials Science and Engineering A* 641 (August): 249–55. https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.06.046.

Haghshenas, M., J. T. Wood, and R. J. Klassen. 2012. "Effect of Strain-Hardening Rate on the Grain-to-Grain Variability of Local Plastic Strain in Spin-Formed Fcc Metals." *Materials Science and Engineering A* 552: 376–83. https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.05.054.

Karakaş, Aptullah, Acar Can Kocabıçak, Senai Yalçınkaya, and Yusuf Şahin. 2021. "Flow Forming Process for Annealed AISI 5140 Alloy Steel Tubes." *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. https://www.springer.com/series/11236.

Kocabıçak, Acar Can, Aptullah Karakaş, Güneş Aydın, and Senai Yalçınkaya. 2021. "Investigation of Flow Forming Process and Heat Treatment Effects on 2024 Aluminium Tubes." *Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer*. https://www.springer.com/series/11236.

Maj, P., P. Błyskun, S. Kut, B. Romelczyk-Baishya, T. Mrugała, B. Adamczyk, and J. Mizera. 2018. "Flow Forming and Heat-Treatment of Inconel 718 Cylinders." *Journal of Materials Processing Technology* 253 (March): 64–71. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.11.010.

Marini, Daniele, David Cunningham, and Jonathan Corney. 2015. "A Review of Flow Forming Processes and Mechanisms." *Key Engineering Materials*

651–653 (July): 750–58. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.651-653.750.

Marini, Daniele, David Cunningham, Paul Xirouchakis, and Jonathan R. Corney. 2016. “Flow Forming: A Review of Research Methodologies, Prediction Models and Their Applications.” *International Journal of Mechanical Engineering and Technology* 7 (5): 285–315.

Mohebbi, M. S., and A. Akbarzadeh. 2010. “Experimental Study and FEM Analysis of Redundant Strains in Flow Forming of Tubes.” *Journal of Materials Processing Technology* 210 (2): 389–95. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.028.

Nagarajan, H. N., H. Kotrappa, C. Mallanna, and V. C. Venkatesh. 1981. “Mechanics of Flow Forming.” *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 30 (1): 159–62. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60915-9.

Nie, Defu, Xuedong Chen, and Qiaoguo Wu. 2020. “Mixed-Mode Fracture Behaviors of AISI 1045 and AISI 5140 Steels in Compressor Crankshafts – Part II: Mode II-III.” *Engineering Failure Analysis* 110 (January): 104407. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104407.

Prakash, Rajnish, and R. P. Singhal. 1995. “Shear Spinning Technology for Manufacture of Long Thin Wall Tubes of Small Bore.” *Journal of Materials Processing Tech.* 54 (1–4): 186–92. https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)01940-5.

Rajan, K. M., P. U. Deshpande, and K. Narasimhan. 2002. “Effect of Heat Treatment of Preform on the Mechanical Properties of Flow Formed AISI 4130 Steel Tubes - A Theoretical and Experimental Assessment.” *Journal of Materials Processing Technology* 125–126: 503–11. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00305-9.

Rhodes, Shawn, Juan Valencia, John Ryan, Steven Stawarz, and Christopher Humiston. 2010. “Flowforming of a Nickel Based Superalloy.” *7th International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives 2010* 1: 487–98. https://doi.org/10.1002/9781118495223.ch37.

Roy, M. J., R. J. Klassen, and J. T. Wood. 2009. “Evolution of Plastic Strain during a Flow Forming Process.” *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2): 1018–25. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.030.

Roy, M. J., and D. M. Maijer. 2015. "Analysis and Modelling of a Rotary Forming Process for Cast Aluminium Alloy A356." *Journal of Materials Processing Technology* 226: 188–204. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.06.036.

Roy, Matthew J., Daan M. Maijer, and Jianbin Zhao. 2014. "Fatigue Characterization of Flowformed A356-T6." *MATEC Web of Conferences* 12: 2–4. https://doi.org/10.1051/matecconf/20141203001.

Şchiopu, Vasile, and Dorin Luca. 2016. "A New Net-Shape Plating Technology for Axisymmetric Metallic Parts Using Rotary Swaging." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 85 (9–12): 2471–82. https://doi.org/10.1007/s00170-015-8089-8.

Singhal, R. P., S. R. Das, and Rajnish Prakash. 1987. "Some Experimental Observations in the Shear Spinning of Long Tubes." *Journal of Mechanical Working Technology* 14 (2): 149–57. https://doi.org/10.1016/0378-3804(87)90057-X.

Sivanandini, M, SS Dhami, and BS Pabla. 2012. "Flow Forming Of Tubes–A Review." *International Journal of Scientific Engineering Research* 3 (5): 1–11.

Srinivasulu, M., M. Komaraiah, and C.S. Krishna Prasada Rao. 2012. "Experimental Studies on the Characteristics of AA6082 Flow Formed Tubes." *Journal of Mechanical Engineering Research* 4 (6): 192–98. https://doi.org/10.5897/JMER11.063.

Tsivoulas, D., J. Quinta da Fonseca, M. Tuffs, and M. Preuss. 2015. "Effects of Flow Forming Parameters on the Development of Residual Stresses in Cr-Mo-V Steel Tubes." *Materials Science and Engineering A* 624 (January): 193–202. https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.11.068.

Wang, X. X., M. Zhan, P. F. Gao, and H. R. Zhang. 2018. "Micromechanical Behaviour of TA15 Alloy Cylindrical Parts Processed by Multi-Pass Flow Forming." *Materials Science and Engineering A*. Vol. 737. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.09.062.

Xu, Y., S. H. Zhang, P. Li, K. Yang, D. B. Shan, and Y. Lu. 2001. "3D Rigid-Plastic FEM Numerical Simulation on Tube Spinning." *Journal of Materials Processing Technology* 113 (1–3): 710–13. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00644-6.

BÖLÜM 3
FOTOLİTOGRAFİ TEKNİĞİ İLE MANYETİK MİKRO AYGITLARIN ÜRETİMİ

Doç. Dr. Cihat BOYRAZ
Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İstanbul / TÜRKİYE

Öz: Litografi kelimesi, Yunancada kelimenin tam anlamıyla taşların üzerine yazmak anlamına gelir. Litografide kullanılan yarı iletkenler için taşlarımız silikon plaka (wafer) ve oluşturulacak desenlerde ışığa duyarlı foto-dirençler ile yazdırılmaktadır. Tümleşik devre (IC) ve karmaşık yapıları inşa etmek için transistör ve bir devrenin milyonlarca transistörünü birbirine bağlayan birçok kablo, litografi ile oluşturulan desen transfer adımları en az 10 kez tekrarlanır, ancak tipik olarak tam bir devre yapmak için bu tekrar sayısı 25 ile 40 kata kadar değişmektedir. Plaka üzerine basılan her desen, önceden oluşturulmuş desenler vasıtası ile seçilen bölgelere baskılanmaktadır. Yarı iletken endüstriside temel teknolojinin üretim süreci için gerekli adımı litografi tekniği ile sağlanmaktadır. Litografi tekniği, minimum yazdırılabilir ya da işlenebilirlik özelliklerine bağlı olarak hem devre hızının, hemde entegrasyon yoğunluğunun düzenlenmesi ile mikro teknolojide önemli bir yere sahiptir. Verim ve plaka verimi büyük ölçüde litografi sürecine bağlı olduğundan, sadece aygıt performans sorunları değil, aynı zamanda bütünleşmiş devre üretiminin ekonomisi de litografi ile ilgilidir. Diğer teknolojiler arasında fotolitografi, belirli, bir maske ile, yarı iletken plaka üzerindeki özellikleri tanımlamak için kullanılmaktadır. Bu teknolojinin avantajları göz önüne alındığında önümüzdeki birkaç nesil için yarı iletken cihaz üretim teknolojisinin değişmesi beklenmemektedir. Optik projeksiyon baskı sistemleri, yüksek işlem hacmi verimi ve yüksek çözünürlük gibi büyük avantajlara sahiptir. Plaka üzerinde, fotolitografi esnasında kullanılan dalga boyundan daha küçük olan minimum özellik boyutları çözümlenebilir. Litografi araçlarının maliyetleri, çip üretim maliyetlerinin %35' ini temsil etmektedir ve önemi hergeçengün artmaktadır. Fotolitografi alanındaki gelişmeler, yarı iletken endüstrisinin sürekli büyümesi için en kritik faktörlerdir. Fotolitografi gibi, Teknoloji-Bilgisayar Destekli Tasarım metodolojileri, patlayıcı geliştirme maliyetlerinin üstesinden gelmek içinde yay-

gın olarak kullanılmaktadır. Maliyet düşürmeye ek olarak, tamamen deneysel geliştirme yaklaşımına kıyasla, hızlı geri dönüş süreleri ile bu sistemleri özellikle çekici kılmaktadır.

Tümleşik Devre (IC) Üretim Temelleri

Yarı iletkenlerin temel özelliklerinden birisi olan iletkenliğin büyüklüğü kolayca değiştirilebilen bir fiziksel özelliktir. Dış etkilerden, ısı, ışık üretim ortamının kirliliğine bağlı olarak kirlilik katkısı ve bir elektrik alanının uygulanması, bir yarı iletkenin elektriksel iletkenliğinde oldukça dramatik değişikliklere neden olabilir. Bir yarı iletken malzemenin katkılı bölgesine bir elektrik alanı uygulandığında, tesir altında kalan kesit bölgesi iyi bir elektrik iletkeninden zayıf bir elektrik iletkenine veya tam tersi şekilde değiştirilebilir. Dijital mantık devreleri oluşturmak için birbirine bağlanabilen transistörler, aslında elektriksel olarak kontrol edilen bir anahtar olarak çalışır. Silikon, şimdiye kadar kullanılan en yaygın yarı iletkenlerden birisidir. Bu yarı iletken maliyet, kararlı bir doğal oksit oluşumu ve deneyim ile oldukça gözlemlenmiş bilinen özellikleri ile teknolojik uygulamalarda önem arz etmektedir. İlk silikon IC 1960 yılında yapılmıştır. Genel olarak, yaklaşık 0,6–0,8 mm kalınlığında ve 80–250 mm çapında tek-kristal bir silikon plaka bir entegre devre üretimi için ideal bir tabaka görevi görür.



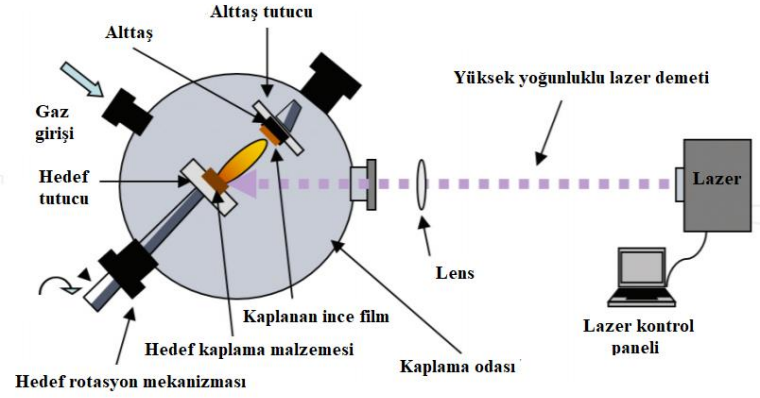
Şekil 1. Fotolitografi ile Baskılanmaya Hazır Tek Kristal Silikon Plakalar

Silikon plakalar tümleşik devrelerden çok daha büyüktür ve bir silikon plakaya birkaç bine kadar tümleşik devre cihazı konulabilir. Silikon palankaların çevresindeki yuvarlakların düz kısımları kristal yönelimleri hakkında kristalografik bilgilerin kodlanmasıdır. Yarıiletken işleme iki ana görevi için yapılır:

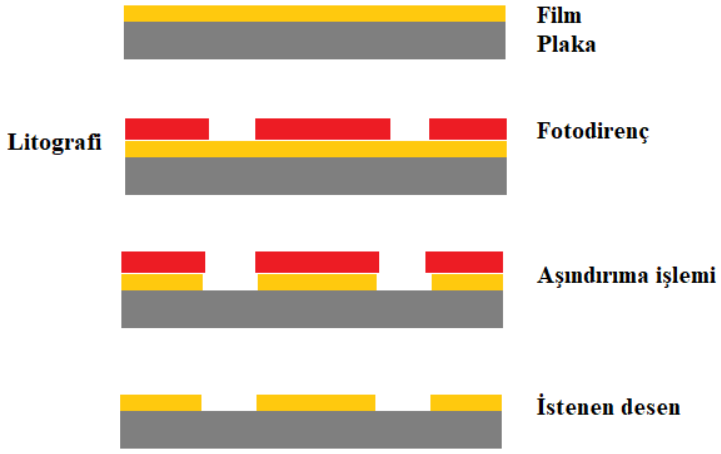
Yerel elektrik alanlarını ve akımlarını manipüle etmek için küçük, birbirine bağlı 3B izolatör ve iletken yapıları ve p – n bağlantıları ve diğer elektrik bileşenleri oluşturmak. Yarıiletken adındanda anlaşılacağı gibi elektriksel iletken ve yalıtkan arasında özellikleri gösteren bir malzemeyi tanımlamamalıdır.

Desenlemeye giriş

3B mikroyapılarının oluşturulma işlemine desenleme adı verilir. Desenleme öncesinde desenleme yapılacak film çeşitli özel kaplama teknikleri ile oluşturulur. Lazer darbeli kaplama (PLD) tekniği bu tekniklerin en önemlilerindendir. Bu teknikte, kaynaktan çıkan ışınlar çeşitli merceklerde odaklanarak vakum odasında bulunan bir kaplama malzemesi olan kimyasal diske çarptırılır. Diskten (target) çıkan kimyasal parçacıklar paketler halinde, genel olarak sıcak tutulan alt taşa yapıştırılıp tek kristal oluşumu sağlanmaya çalışılır. PLD kaplama sisteminin şematik çalışması Şekil 2 ile verilmiştir. Buna göre lazer kutusunda üretilen lazer ışını, lensler yardımı ile vakumlu kaplama odasına gönderilip hedef diskten kimyasal parçacıklar kopartılıp alt taşa kaplanması ile film oluşturma işlemidir. Litografi işlemi bu alttaş-film sistemi üzerine yapılmaktadır.



Şekil 2. PLD Sistemi ile İnce Film Kaplama İşleminin Şematik Gösterimi

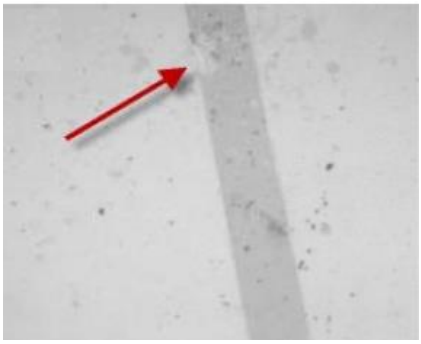


Şekil 3. Alttaşa Kaplı Filmin Fotorezist ve Litografi İşlemleri ile Desen Oluşturma

Genel desenleme işlemi 3 temel aşamadan oluşmaktadır: (1) plaka ya da uygun alttaş üzerine film kaplamak, (2) uygun temizlik işleminden sonra yarıiletkene litografik desenin pozitif imajının oluşturulması, (3) istenmeyen kısımların yüzeyden temizlenmesi için fiziksel yada kimyasal aşındırma işlemleridir. Negatif fotorezist kullanılan durumlarda işlemin ilk aşaması dışındaki süreçler değişebilmektedir. Litografiye uygun film kaplama teknikleri olarak kimyasal buhar biriktirme (CVD), fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve püskürtme yaygın kullanılanlarındandır. Fotolitografi işleminde kullanılan fotorezistlerin amacı, desenlendikten sonra aşınmaya karşı direnmektir, böylece malzeme ışığa maruz kaldığında desen filme aktarılabilir.

Kimyasal ve Mekanik Aşındırma

Aşındırma işlemi malzemenin fotorezist tarafından korunmayan kısmının ayrıştırılması ile sağlanmaktadır. Bu işlem için kimyasal ve mekanik mekanizmalar kullanılmaktadır. Mekanik ayrıştırma işlemi fiziksel ayrıştırma işlemi olarakta bilinmektedir. Kimyasal bir aşındırma işlemi olan ıslak aşındırma, fotodirenci bozmadan bırakırken alttaki filme kimyasal olarak saldıran basit bir aşındırma çözeltisi ile yapılır. Bu aşındırma işlemi yöne bağlı olmadığından (izotropik) ve işlem sırasında filmin altı oyulduğundan uygun zaman diliminden fazla işlem yapıldığında film yapısını bozabilmektedir. Islak aşındırma yapılacak numune seyreltik HCL çözeltisi içine daldırılarak cımbız ile rastgele küçük çalkalama işlemine tabii tutulur. İşlem izotropiktir.



Şekil 4. Plaka Üzerine Oluşturulmuş Fotolitografik Elektrot Deseninin Aşırı Kimyasal Aşındırma Sonucunda Kopması

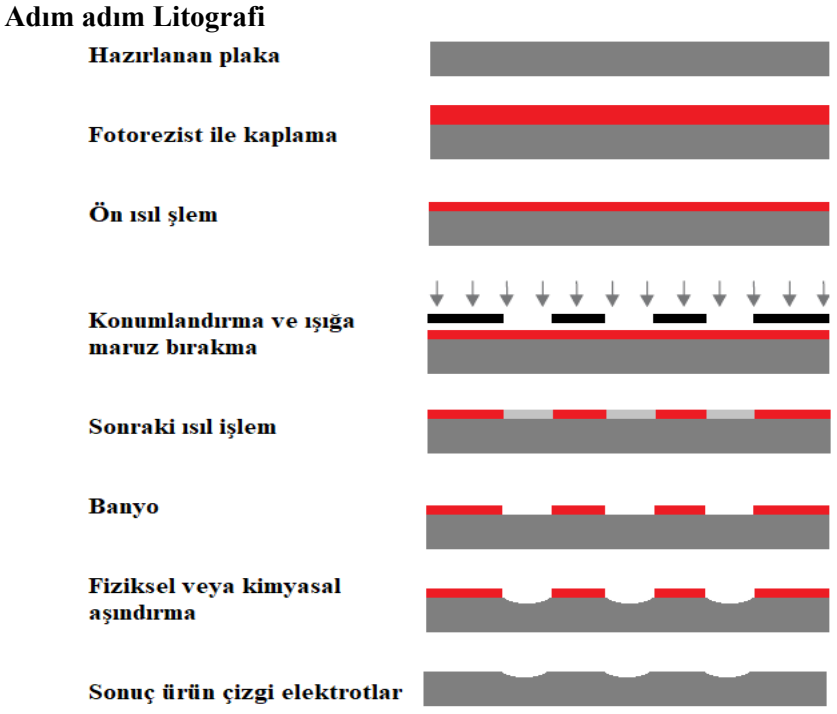
Şekil 4' te $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3/SrTiO_3/La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$ çok katmanlı yapısının ıslak aşındırma sürecinin uzun tutulması ile mikro-elektrotun bozulmaya başlaması kırımızı ok ile verilen bölgede gösterilmektedir.

Aşındırmanın yöne bağlılığı isteniyorsa yani anizotropik bir aşındırma söz konusu ise (çoğu zaman böyledir) aşındırma yönelimi işlem sürecine dahil edilmelidir. Bu durumda ıslak aşındırma işleminde kullanılan sıvı aşındırıcı yerine plazma aşındırma uygulanmaktadır. Uygulanan bir elektrik alanı ile iyonların plakaya doğru hızlanması sağlanır. Böylelikle film plazma ile reaksiyona girerek plakaya çarpan iyonların yön bombardımanı sayesinde istenilen aşındırmaya ulaşılmış olur. Reaktif aşındırma sistemi yönlülük ve seçicilik sağlama özelliklerinin her ikisinide birleştirir. Aşındırma işleminde kullanılacak fotodirencin türünün oldukça büyük etkisi vardır. Aşındırma sırasında desenin bükülmesi ya da fotodirencin alttaşa yapışması gibi mekanik deformasyona sebep olacak olan fotodirencin mekanik özellikleride oldukça önemlidir. Bu bilgiler ile aşındırma işlemi esnasında sonuç deseninin mükemmellik yeterliliği desenin şekli ve büyüklüğü ile ilgili olacaktır.

İyon İmplantasyonu

Bir yarıiletkenin seçilen bölgelerinin katkılanması öncelikle desenleme adımı ile başlar. Desenleme yapabilmek için katkı malzemesinin elektronlarının desen düzerinde fotorezist olmayan yerlere yönelimli olarak aktarılması gerekir. P tipi bir malzeme olan Bor, zengin dış kabuk elektronları sayesinde Silikonun kristal yapısına eklendiğinde mobil boşluklar oluştururlar. Silikona dış yörüngesinde 5 elektronları olan n-türü antimon veya arsenik katkılandığında oldukça çok mobil elektronlar oluşturacaktırlar. P ve n türü bölgelerin ara yüzeylerine p-n eklemi denir ve yarıiletken aygıt teknolojisinin temelidir. Katkı maddesi iyonize edilerek

uygun vakumlu bir ortamda elektrik alan varlığında iyonlara ivmelendirilir. İyonların plaka içerisine nüfus etme derinliği iyonların taşıdığı enerjinin bir fonksiyonudur ve uygulanan plaka ya da alttaşa göre uygun voltaj ile ayarlanabilen bir sistem parametresidir. Silikon plakaya çarpan iyonlar silikonun kristal yapısını bozacak ve kristal yapının geri kazanımı ya da uygun atomik paketlenmenin tekrar sağlanması için implantasyon işlemi sonrasında yüksek sıcaklık tavlama işlemi ile atomların yerlerine yeniden yerleşmeleri sağlanır. İyon implantasyonu esnasında desenin korunması için, uygulanan fotorezistin kalınlığı, iyonların nüfuz etme derinliğinden daha fazla olması gerekir. Yapılan araştırmalarda yapılacak makro-nano aygıtların maruz kalacağı fotorezist kalınlığı araştırma aşamalarının bir bölümünü oluşturmaktadır.



Şekil 5. Litografi İşlemi ile Desen Üretiminin Genel Akış Diyagramı Gösterimi

Optik litografi işlemi temelde ışığa duyarlı bir polimer ve türleri olan fotorezist adı verilen polimerin istenilen yüzey üzerinde 3B görüntülerini oluşturmak için kullanılan bir fotoğraflama işlemidir. Her ne kadar bölüm başlığında makro aygıt denilse de fotolitografi ile nano aygıtlarda geliştirmek mümkündür. Bu teknoloji IBM ve Aselsan gibi önemli teknoloji üretim laboratuvarlarında kullanıl-

maktadır. Genel olarak ideal bir fotorezist ile kaplı tabaka üzerine görüntü oluşturulduğunda alttaşın ya da plakanın üzerinde istenilen şeklin tam bir tasarımı oluşturulmalıdır. Fotorezist kaplanmış olan aygıtın yüzeyinin bir kısmı fotorezist ile kaplı diğer bir kısmında kaplanmamış olarak iki özelliği sağlamalıdır. Bu iki özeliği sağlayan yüzeyin fotorezist ile kaplı olan kısmı aşındırmadan korunacağı için desen transferi bu kısımlara yapılır.

Fotolitografi işlemi yapımı genel olarak temel birkaç adımı içerir. Alt taşı ya da plakayı hazırlama, spin-kaplama ile fotorezist kaplanması, ön ısıl işlem, ışığa maruz bırakma, ısıl işlemli ışığa maruz bırakma, film banyosu ve sonraki ısıl işlem olarak sıralanır. Bu işleme ait akış diyagramı şekil 5' te verilmiştir ve genel olarak akış süreci şekil 5' te verildiği gibi sağlanmaktadır. Bu aşamaların her biri özetle ele alınacaktır.

Baskı alt tabakasının hazırlanması

Alt tabakanın hazırlanması, fotorezist malzemesinin yüzeye yapışmasının arttırılması ve film-fotorezist ikilisinin kontamine olması önlenmesi için bir işlemi sürecidir. Bu aşamada alt tabakanın kontaminasyondan arındırılması için temizleme, su ve istenmeyen yapışma oluşturabilecek maddelerin dehidrasyon ısıl işlemi ile atılması. Alt tabaka kirliliği organik ya da inorganik malzemelerden kaynaklanmaktadır. Bu malzemelerin temizlenmesi olmaksızın desenleme işlemi zayıf yapışma yüzeyi ve kontrol edilemeyen elektrot şeritlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu durumda şeritlerde iletim farklılığı oluşacağından yapılan makro aygıtın doğru çalışmasını etkileyebilir yani, şerit iletim kontrol sorunu oluşturacaktır. Oluşan kirlilik türüne göre temizleme işleminde farklılık göstermektedir. Bu nedenle genel olarak temizleme işlemi temiz odalarda daha yaygın yapılmaktır.

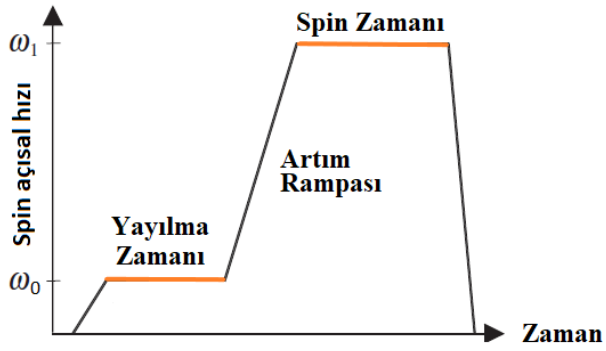


Şekil 6. Mikro Aygıt Aşamalarında Kullanılan GTÜ NASAM Temiz Odası

Laboratuvar uygulamalarında alt tabaka kontaminantları kaldırmak için aseton ile temizlenir. Bu temizlemede birçok yolla yapılabileceği gibi, alt tabaka birkaç saniye kimyasal banyoya sokulur ve çıkarılıp azot gazı ile kimyasal alt tabaka yüzeyinden püskürtülerek temizlenir. Diğer bir metot ise sıvı temizleme kimyasalı alt tabaka üzerine bir miktar dökülerek belirli bir hızda dönen bir sisteme monte edilerek sıvının yüzey üzerinde gezinmesi sağlanır. Fazla suyun atılması için dehidrasyon fırını ile ısıl işleme tabii tutulur. Bu işlem ile ayrıca alt tabakaya yapışmanın arttırılması sağlanmış olur. Dehidrasyon tavlama işleminde genel olarak sıcaklık aralığı 200 °C ile 400 °C aralığındadır süre ise 30-60 dk aralığında alınmaktadır. Bu işleme tabii tutulan alt tabaka tercih olarak kuru bir çevrede mümkün olduğunca hızlı kaplama işlemine alınmalıdır. Nemli ortamda yüzeyden tekrar su adsorbsiyonu başlayacaktır. Bu fırınlama işlemi ayrıca buharlaşabilen organik kontaminantların atılmasında önem taşımaktadır. Dehidrasyon tavlama işlemi bazı silikon, silikondioksit, polisilikon ve silikon nitrat gibi alt tabakaların temizlenmesinde yeterli olmamaktadır. Bu durumlarda suyun atılması için kimyasal yöntemler kullanmak gereklidir.

Fotorezist kaplama ve son ısıl işlem aşaması

Alt tabaka temizlik aşamasından sonra, spin kaplama cihazı ile, kalınlığı iyi kontrol edilmiş, yüzeye düzgün olarak kaplanmış bir fotorezist gereksinimi vardır. Negatif ve positif olarak iki türlü fotorezist vardır. Kaplama işlemi sonrası alt tabaka litografi cihazı ile elektromanyetik radyasyona maruz kaldığında, fotorzistin UV ile temas ettiği her kısmı kimyasal olarak sökülebilecek hale gelecektir ve sonuç ürünü fotomaskedeki desenin bir kopyası olur. Negatif fotorezist, pozitif fotorezistin tam tersi yanıta sahiptir, böylece elektromanyetik radyasyona maruz kalan negatif fotorezistin tüm kısımları developer kimyasalı için çözünmez hale gelir ve kalan fotorezist geliştirme sırasında kaldırılır. Ortaya çıkan desen, foto maskenin tersi olacaktır.



Şekil 7. Spin Kaplama Aleti ile Fotorezist Kaplama Döngüsü

Bu işlem esnasında düşük kusur yoğunluğu, tekdüzelik ve kalınlık kontrolü kaliteli bir fotodirenç kaplamada özel dikkat gerektiren parametrelerdir. Fotodirenç sıvısının alt tabakaya enjekte edildiğindeki rezist statik dağılımı, spin kaplama başladığındaki fotorezist dinamik dağılımı süreleri ve hızları, ayrıca bu hıza bağlı olan ivmelenme düzgün bir kaplama açısından oldukça önemlidir. Bununla birlikte yüzeye enjekte edilen fotorezistin vizkozitesi içerdiği katı madde yüzdesi ve çözücü bileşimi gibi direnç özellikleri, fotorezistin hacmi ve bununla birlikte alt tabaka malzemesinin direnç kalınlığı ve topografik özelliği homojen bir kaplama yüzey elde edilmesinde önemli bir rol oynar.

Genel bir fotorezist spin kaplama döngüsünü Şekil 7'de verilmiştir. Buarada döngü hızları ω_0 ve ω_1 spin kaplama döngüsünde aletin sırasıyla başlangıç açısal frekansı ve son kaplama açısal frekansını vermektedir. Bu işlem sürecinin sonunda alt tabakaya ince çözünebilir bir fotorezist kaplı olacak ve bir sonraki aşama olan sonraki ısıl işleme geçilebilecektir. Eğer $\omega_0 > 0$ ise fotorezistin dinamik dağılımından bahsedilir. Başka bir değişle ω_0 sabit açısal frekansında dönen bir alt tabakaya şırınga ile belirli bir miktar fotorezist enjekte edilme işlemidir. Belirli bir yapışma sağlandıktan sonra, ω_0 açısal frekansı belirli dakikadaki devir sayısı (rpm) artımı ile maksimum ω_1 açısal frekansına ulaştırarak tam düzgünlük dağılımı elde edilinceye kadar bu frekansta döndürme işlemi yapılır. Bu işlem sonunda 1-2 nm kalınlığında fotodirenç tabakası elde edilir. Bölümün devamında konunun bir uygulaması olarak anlatılacağı üzere, $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3/SrTiO_3/La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$ çok katmanlı yapısı için spin kaplama süresi 45 sn ve maksimum ω_1 açısal frekansı 4000 rpm olarak alınmıştır. Bu değerler fotorezist için en uygun kaplama değerleridir. Maksimum spin frekans zamanı tamamlanınca spin kaplama cihazı kapatılarak kendi kendine durma sağlanır.



Şekil 8. Isıl İşlem Sürecinde Kullanılan Bir Portatif Isıtıcı (Hot-Plate)

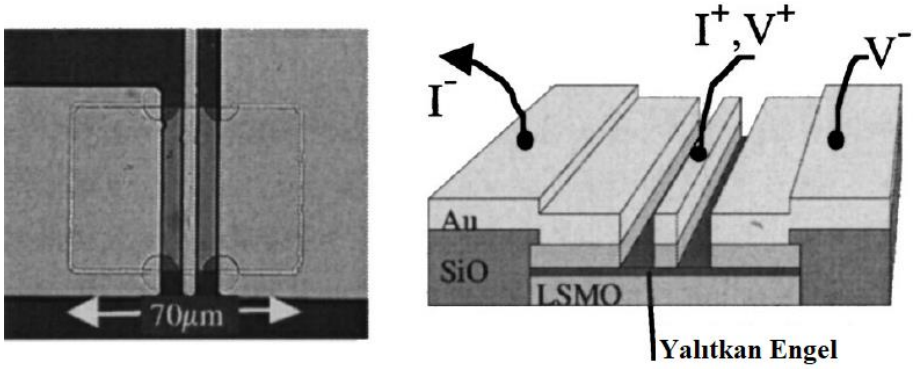
Kaplama sonrası film-fotorezist numunesinin bir kısmında (%40' a kadar) çözücü kimyasal içerecektir. Bu çözücü kimyasalların atılması için spin kaplama işleminden sonra bir ısıl işleme tabii tutulup buharlaştırma sağlanması gerekir. Çözücü kimyasalın atılmasının diğer bir sebebi film-fotorezist numunesinin içindeki çözücü kimyasalın minimize edilip dengelenmesini sağlamaktır. Oda sıcaklığında ısıl işleme tabii tutulmayan fotorezist içindeki çözücü buharlaşacaktır fakat bu atılma homojen bir atılım değildir. Isıl işlem sayesinde çözücünün bir kısmı oda sıcaklığında atılacaktır ve daha yapısal olarak düzgün bir fotodirenç yüzeyi elde edilir. Isıl işlem yapmanın film kalınlığının azaltılması ve filmin daha az yapışkanlık özelliği kazanarak dışardan toz gibi etkilere karşı daha az yapışma özelliği sergilemesi gibi birçok önemli etkisi bilinmektedir. Genellikle ısıl işlem (post-apply bake) film-fotorezist sisteminde %10' a kadar çözücü kimyasal bırakmaktadır. Bu oran çözücü türü, ısıl işlem şartları ve fotorezistin türüne bağlı olarak değişmektedir. Yeterince az miktarda çözücü kalması fotolitografi sürecinde daha düzgün makro-nano aygıt üretiminde daha iyi sonuç vermektedir. Isıl işlemde yüksek sıcaklıklara gidildiğinde (T>65 °C) fotorezist içindeki fotoaktif bileşik bozulmaya başlar ve fotorezist içindeki diğer bir madde olan resin yüksek sıcaklıklarda oksitlenme oluşturur. Buradaki önemli sonuç kullanılacak filme uygun fotorezist ve uygun ısıl işlem şartını sağlamak olacaktır. Laboratuar türü ısıl işlem fırınında numuneyi ıstmak, eski ısıl işlem metotları arasında kullanılanlardan birisidir. Günümüzde farklı metodalar olup Şekil 8' de gösterilen portatif ısıtıcı (hotplate) ya da farklı metodlar kullanılmaktadır. Portatif ısıtıcı temas süresi saniyeler mertebesinde oldukça kısa olmalıdır. Portatif ısıtıcı işlem süresini tavlama fırınlarına göre oldukça kısa sürede yapmaktadır.

Fotolitografik hizalama ve pozlama

Fotolitografik hizalama, aynı koordinatları kullanan bir desen oluşturma yöntemi olup, maske üzerindeki desenin alt tabaka üzerine en az bir konumsal ilişki içinde yerleştirilmiş ve en az iki görüntüsel hizalama işaretine sahip olarak yerleştirilir. Bu işlemde önemli olan alt tabakaya aktarılan desen bölümlerinin hizalanması ve alt tabaka üzerinde desen sürekliliğinin sağlanmasıdır. Kontak ve yakınlık fotolitografi tekniği, fotorezisti ışık altında pozlayarak bir ana foto maske yardımıyla ana deseni oluşturma işlemidir. Kontak litografisi radyasyon dalga boyu civarında yüksek bir çözünürlük sağlar. Fakat bu yöntemde maske hasarı ya da maskede kusur oluşumu sonuç üründe kusurlar oluşturacağından bu yöntemin kullanımı sınırlıdır. Bununla birlikte diğer bir metot olan yakın baskı metodu maske hasarı oldukça azaltılmıştır ve maske ile alt tabaka arasındaki mesafe 20 μm civarındadır fakat bu metotta çözünürlük istenilen mertebede değildir.

Diğer iki metodun negatif yönlerinden sebeple, Projeksiyon (izdüşümsel) litografi tekniği kullanılmaya başlamıştır. Bu yöntemde maske üzerindeki desen alt tabaka üzerine düşürülür. Projeksiyon litografi aygıtlarında *taramalı* ve *adım ve tekrar* sistemleri olarak iki türü vardır. Bu sistemlerde ışık dozu ışığın şiddeti ile saptanır aygıtın ışık yarık genişliği ve alt tabakanın taranma hızı ile ilişkilidir. Bu sistemlerde lensler gibi ışığı kırıcı optikler kullanır ve genellikle yarı-monokromatiktir. Adım ve tarama teknolojili litografi aygıtlarda desenleme günümüzde 200 nm' nin altındadır. Bu özelliği ile nano-aygıt üretimini mümkün kılmaktadır. İyi bir kontrol altında en küçük özelliklerin yazılımı için çözünürlüğün iki temel gereksinim vardır. Maskedeki en küçük bir detayın alt tabakaya iz düşürülmesi ve maskedeki tüm detayların alt tabakaya düşürüldükten sonra fotorezistin deseni çözebilme kapasitesi. Çözünürlüğün teorik bir tahmini için Rayleigh çözünürlük kriteri $R=\lambda/NA$ kullanılabilir. Burada λ görüntü oluşumu sağlayan ışığın dalga boyu ve NA ise iz düşüm merceğinin sayısal açıklığı olarak alınır. Rayleigh kriteri farklı mercek ve ışık sistemleri için farklı formları mevcuttur. Fotolitografi sistemleri genellikle mavi dalga boyu ile ultraviyole arasında dalga boylarında çalışır. Günümüzde işlevine göre farklı dalga boylarında çalışan litografi sistemleride bulunmaktadır. Fotorezistin ışığa marız bırakılmadan önce, maskenin litofrafik desen görüntüsünün alt tabakaya tam olarak ayarlanması gerekir. Fotorezist malzemesinin başka bir özelliğide durağan dalga etkisidir. Monokromatik (tek renkli) ışık alt tabaka üzerine iz düşürüldüğünde, ışık belirli bir açıda fotorezist üzerinde gezinmeye başlar. Bu durumda eğer alt tabakanın yansıtma özelliği varsa, ışık işlemi durumunda yansıyan ışık fotorezist üzerinde gezinmeye başlayacaktır. Bu durumda gelen ve yansıyan ışıklar desen üzerinde istenmeyen oluşumları getireceğinden desen kalitesinin etkilenmesine neden olacaktır. Bu yansıtma etkisin ortadan kaldırılması için belirli ışık etkisiyle desenleme (pozlama) sıcaklıklarda ısıl işlem yapılması gerekir. Böylece durağan dalga durumundan sonra ortaya çıkan desen bozuklukları önemli ölçüde giderilmiş olacaktır. Pozlama işlemi sonrası, desen işleminin daha kolay ortaya çıkarılması için developer kimyasalı-fotorezist ilişkisi desende oluşan çizgiler ve aygıtın iletimi açısından oldukça önemlidir. Fotolitografi deseni fotoresizt üzerine yazıldıktan sonra bu desen alt tabaka üzerine transfer edilecektir. Önceki kısımlar dada tartışıldığı gibi bunu yapmanın aşındırma, iyon implantasyonu gibi metotları vardır. Aşındırma işlemi ıslak kimyasallar ya da kuru plazma ortamında yapılır. Bu aşamaların tamamlanması ile bir örnek mikro aygıt uygulamasına olan $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3/SrTiO_3/La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$ (LSMO) örneğinin bir mikro devre uygulaması yapılacaktır.

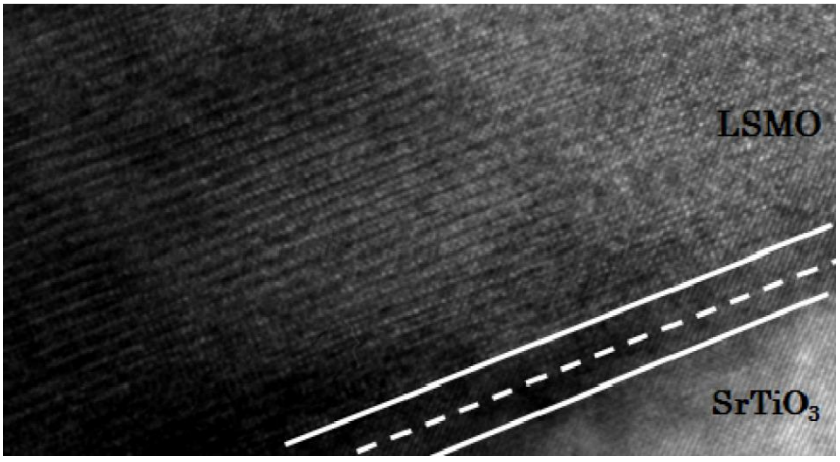
$La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3/SrTiO_3/La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$ makro aygıt tasarımı



Şekil 9. Devrenin Mikroskop Görüntüsü ve Bir LSMO Aygıtının Şematik Görüntüsü

Spin-yörünge etkilerinden dolayı, manyetik yön değiştirme yetenekleriyle manyetik hafıza gibi Spintronik cihazları, düşük güçte ve yüksek hızda çalışan elektronikler olarak bilinmektedir. Elektronikte, kompleks oksijen içeren hetero arayüzeyli (iki katı ya da iki sıvı arasındaki ara yüzey) yapılar günümüzde oldukça ilgi çekmektedir. Bu tür filmlere fotolitografik tasarım yapmak hem atomik seviyede hassasiyet hemde teorik olarak avantajlar sağlamaktadır [7-14]. Bunun temel nedeni yapısal bant dizilimleridir ve tasarım ve mühendislikte oldukça önemlidir. Spintronik (Spin ve elektronik kelimelerinin birleşimi) aygıtlarının fabrikasyonu ince film kaplama tekniklerindeki önemli gelişmeden dolayı mümkün olmaktadır. Şekil 9' da görüldüğü gibi metalik ya da yalıtkan tabaka ile ayrılan iki ferromanyetik tabaka üç katmanlı LSMO yapısı içinde oluşacak elektrik direncindeki önemli değişim, LSMO ferromanyetik filmi içindeki manyetik momentlerin bağıl yönelimine bağlı olarak, manyetik alan varlığında gözlemlenebilmektedir. Yüzeyin metal olması ile bu aygıta dev manyetodireç (GMR), ayırıcı yüzey yalıtkan ise bu aygıta tünel manyeto direnç aygıtı (TMR) denir. $SrTiO_3$ perovskite yapısı, LSMO filmimizde yalıtkan TMR aygıtımızın yalıtkan tabakası olarak kullanılmıştır. Yalıtkan tabaka kalınlığı bu tür aygıtlarda oldukça az seçilir. Bunun sebebi yalıtkan tabakadan elektronların tamamen akışını kesmek değil sadece, belli enerjide olanlarının bu tabakadan tünellenmesini sağlamaktır. Bu bize sadece belli enerjili elektronların geçişini, diğerlerinin geçişinin engellenmesini sağlar. Bu yalıtkan tabakanın alt ve üst kısmındaki manyetik tabakaya ($La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$) bağlı olarak elektronların yönelimleri kontrol edilebilmektedir. Bu bir memory aygıtının temel çalışma prensibidir. Prensip olarak temelde aynı tür davranışı tünel bariyerini manyetik bir malzemeden ($La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$) kapladığımızda elde ederiz. Bu tür aygıtlarda tasarımlarında nihai ürünün yüksek Curie sıcaklığıda önem

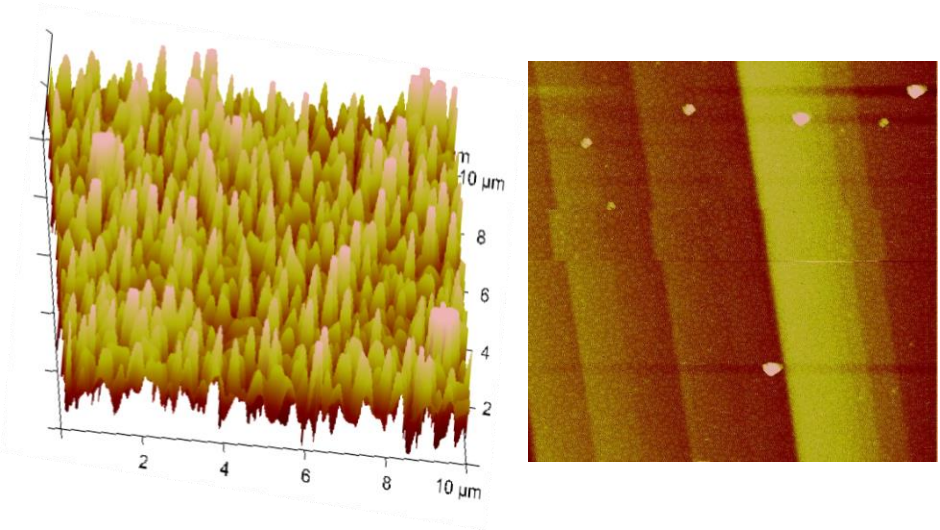
arz etmektedir. Curie sıcaklığı (veya Curie noktası), ferromanyetik bir madde, kalıcı mıknatıslığı Curie sıcaklığında yitirilip paramanyetik hale geçer. Curie sıcaklığının üstünde, ısı enerjisi ile manyetik momentler en rastgele yönelmelerine sahip olur ve maddede paramanyetik hal gözlemlenir. Bu durumda Curie sıcaklığı ne kadar yüksek ise tasarlanan aygıtın çalışma sıcaklığıda o kadar yüksek olur ve bu durumda aygıtın çalışması daha yüksek sıcaklıklarda da mümkün olacaktır. Başka bir değişle örneğin bir hard disk için çalışma sıcaklığı oda sıcaklığından düşük olan bir malzemeden üretilse çalışma yani bilgi taşıma özelliğini kullanmak için önce soğutma gibi bir sorunla karşılaşırdık. Bu ise son kullanıcı için imkânsız bir hal alırdı. Cruie sıcaklığı $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$ yapısında 360 K civarındadır.



Şekil 10. Zıt Renklerle Verilmiş $La_{0.67}Sr_{0.33}mno_3$-$Srtio_3$ Yüzeyinden Alınan Bir Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) Görüntüsü

Aygıt tasarımında katmanlı yapılarda diğer bir önemli parametre ise katmanlar arası örgü uzunluklarının uyumlu olmasıdır. Katmanlı örgüler arasındaki örgü uyum farkı %5' i geçtiğinde aygıt performansında belli oranda değişimler gözlemlenebilmektedir. $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$ örgü parametresi a= 3.871 Å ve bu değer aygıt üretiminde kullanılan $SrTiO_3$ örgü parametresine oldukça yakındır. $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$ yapısı Şekil 11' de sağ taraftaki Atomik kuvvet Mikroskobu ile alınmış 2B katmanlı yapısı ve sol taraftaki 10 µm-10 µm uzunluk aralığındaki 3B görüntüleridir. Örgü uyumsuzluğunun varlığı belirli yönelime sahip (epitaksiyel) filmlerde örgü içi gerilime neden olmaktadır. Bu istenmeyen özellik, aygıtın manyetik davranışında koersivite, doyum mıknatıslanması ve Curie sıcaklığını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle aygıt geliştirmede önce malzemenin yapısal özelliklerinin iyi bilinmesi ya da önceden tanımlanmış uygun malzemelerin kullanılması gereklidir. Ayrıca tabakalı yapılarda özellikle örgü parametreleri uyumsuz-

luğu hem örgü kafesi oluşumunda kusur hemde elektron iletiminde değişik istenmeyen davranışları ortaya çıkarmaktadır. Bu durumu daha iyi görebilmek için $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$-$SrTiO_3$ yüzeyinden alınan Şekil 10' daki gibi bir TEM görüntüsü ile açıklanabilir. Bu görüntü ve analizinden $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$-$SrTiO_3$ ara sınırlarında anti faz oluşumları olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 11. $La_{0.67}Sr_{0.33}mno_3$ Katmanlı Yapısının Yüzey Ve 3B ve 2B Görüntüleri

Bu diğer oksit malzemelerde de ortaya çıkan bir özelliktir. Anti faz oluşumu önceden açıklanan PLD kaplama ile film-alt taş arasında ilk birim hücre oluştuğunda, atom türleri arasındaki uyumsuzluk ile birbirine kaynaşmaya çalışıp bir yapı oluşturmaya çalışma esnasında ortaya çıkmaktadır. Katyon uyumsuzluğu yani fazlalığından ya da eksikliğinden meydana gelmektedir.

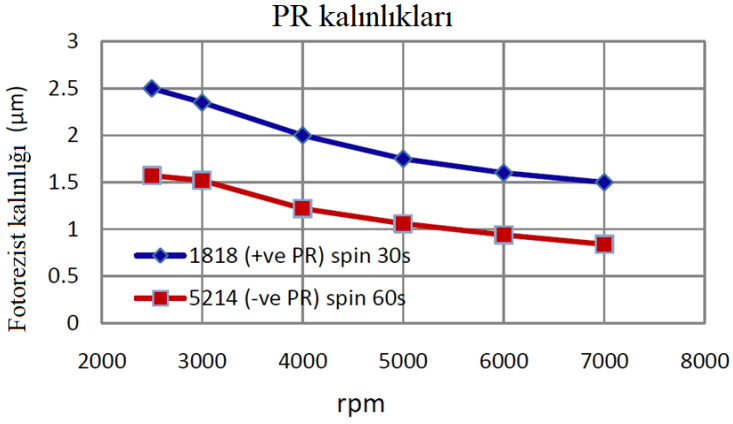
Bu bilgiler ışığı altında bölümümüzün kalan kısmında bir mikro temiz oda ortamında fotolitografi yöntem ile LSMO/STO/LSMO yapısı ile bir TMR aygıtının yapımı ve sonuçlarını tartışacağız. Bunun için aşağıda verildiği gibi bir işlem prosedürünü takip edeceğiz.

1. Önceki kısımlarda tartışılan PLD kaplama yöntemi ile üretilmiş LSMO/STO/LSMO numunesi öncelikle temiz odada kimyasal kalıntı ve ortam kirlerinden uzaklaştırmak için temizleme işlemine alınır. Ultrasonik temizleyici aleti ile her bir LSMO/STO/LSMO numunesi sırası ile aseton, izopropil alkol ve deiyonize su içinde her biri 2 dk ile titreştirme işlemi uygulanır. Bu işlem ile yüzeyde kalan sıvı kimyasalların ortamda kendisi kuruduğunda leke bırakma riskine karşı en son aşama olan deiyonize sudan numuneleri tek tek cımbız ile çıkartıp

üzerlerine N_2 gazı püskürtülerek ıslaklığın başka bir deyişle kendi kendine kurumanın önüne geçilmiş olur.

2. Bu aşamadan sonra daha önce detayları verilen fotorezist kaplama aşamasına geçilir. Bu aşamada Şekil 12' de görülen spin kaplama cihazı ile uygun fotorezist 45 sn süresinde, başlangıçta cihaz üzerindeki tüm parametreler sıfırlanarak, 4000 rpm hızına ayarlanıp, 6-7 damla fotorezist damlatılarak kapatılır ve vakuma alınır. Vakuma alınması fotorezistin dönme esnasında alt taş dışında başka bir yere dökülmesini önler. Bununla birlikte Şekil 12' de fotorezistin kaplama hızına bağlı oluşturduğu kalınlıklar ölçülere optimize edilmiştir. Kalınlık oluşumu spin kaplama cihazının hızı ve kullanılan malzemeye göre farklılık göstereceğinden, tasarımda kalınlık parametresinin ayarı önceden tayin edilmiş olmalıdır.





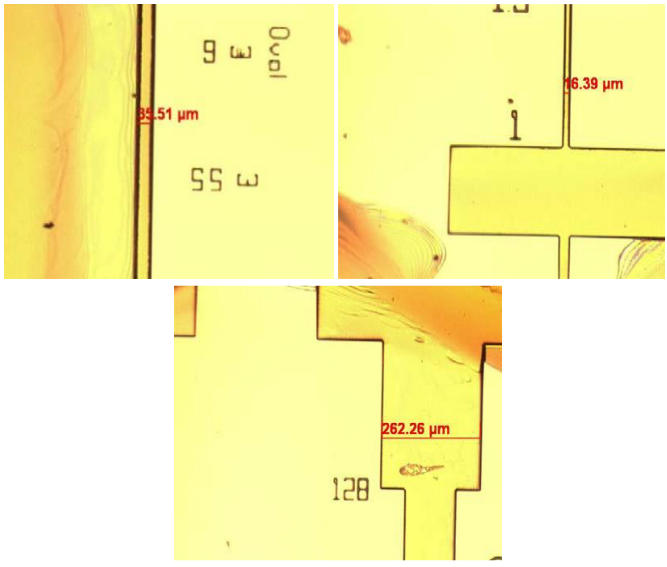
Şekil 12. Spin Kaplama Cihazı İle Fotorezist Kaplama ve Altta Kaplama Hızına Bağlı Kalınlık

3. İlk ısıl işlem olan yumuşak tavlama (soft bake) aşamasında fotorezist kaplanan örnek 100 ºC' de 2 dk ısıl işlem uygulaması yapılarak sebepleri daha önce 1.3.2' de daha kapsamlı anlatıldığı üzere fotorezist içindeki suyun atılmasıdır. 1.

maskenin yüzeyi tek yönde aseton ile temizlenmesi gereklidir. Alt taş-film sisteminin ile fotorezist' in maske oluşacak kontaminant ile desen kaybının önlenmesi gerekir. Bu aşama bitimi ile artık fotolitografi cihazında hizalama ve pozlama aşaması uygulanır. UV ışık ile pozlama süresi (exposure time) 9 sn, ilk desen oluşumu için yeterli bir süredir. Fakat bu süre farklı malzeme ve desenleme işleminde değişkenlik göstermektedir. Desen oluşumunun belirginleşmesi için 20 sn developer kimyasalı ve 30 sn deiyonize su ile çalkalanıp kurutma işlemi için N_2 gazı kullanılmalıdır.

4. Alt elektrot devrelerinin mikro görüntüleri birinci maske uygulaması sonrası Şekil 13 'de verilmiştir. Şekil 13 (a), (b) ve (c) üzerindeki sayılar alt tabakanın üzerindeki harita kodlarıdır. Bunlar dışında kırmızı renk ile verilen sayılar mikroskop altında ölçülmüş elektrot kalınlıklarıdır. Elektrot kalınlıları desen üzerinde farklı değerlere sahiptir.

5. Bir sonraki aşama olan iyon aşındırma (ion milling) işleminde aşındırma işlemi önceden kalibre edilerek 1 dk boyuncunca uygulanarak 5 nm' lik bir aşındırma elde edilir. Aşındırma süresine bağlı olarak *aşındırma oranı=desen kalınlığı/aşındırma süresi* ifadesiyle elde edilir. Taramalı Elektron Mikrosobu (SEM) ya da AFM ile önce süreler tayin edilerek aşındırılmış olan numunelerin kalınlıkları ölçülerek, süreye bağlı olarak desen aşınımı anlaşılarak şekil 14' te verilen iyin aşındırma aletinin malzememize bağlı aşındırma karakteristiği önceden saptanmalıdır.



Şekil 13. İlk Pozlama ve Developer Kimyasalı Sonrası Oluşturulmuş Makro-Elektrotlar



Şekil 14. Mekanik Aşındırma İşleminde Kullanılan İyon Aşındırma Cihazı

Bu örnek çalışmada LSMO/STO/LSMO filmleri yaklaşık 92 nm' dir. Bu kalınlık ölçümü SEM ya da X-ışını yasıması (XRR) tekniği ile elde sağlanabilir. 1 dk aşındırma işlemiyle 5 nm aşınma elde edildiğinden tamamen alt taşa kadar aşınma elde etmek için yaklaşık 18 dk iyon aşındırmasına tabii tutmak gerekir. Bununla birlikte iyon aşındırma işlemi bu yöntemde çok uzun sürelerde sürekli olarak kullanılamaz. Uzun aşındırma işlemlerinde aletin iç kısmında oluşan ısının film yüzeyine etki etme ihtimali vardır. Bu nedenle uzun aşındırma işlemlerinde aşındırma işlemi iki aşamalı olarak yapılabilir. Bu işlem sonrasında oluşan elektrotların optik resimlerinin çekilmesi gerekmektedir. Bu elektrotların her birinin direnci birbirinden farklıdır. Bu farklı dirençlere sahip elektrotların optik resimleri ile kategorize edilmesi gereklidir. Bu nedenle optik resim seti oluşturmak oldukça önem taşımaktadır. İyon implantasyonu kısmında verilmiştir.

6. İki aşamalı 30 dk kaplama 10 dk sistemin durdurulması 30 dk kaplama olarak radyo frekansı (RF) sputter ile 1 saat süresince SiO_2 kaplanır. İki aşamalı kaplama yapılması kaplanan filmin aşınması önlemek içindir.

7. Numune ultrasonik temizleyici ile 2 dk aseton ortamında yüzeydeki fotorezistin atılması için titreştirilir ve deiyonize su içine konulup (ultrasonik temizleyici olmaksızın)1 dk bekletilerek çıkarılır. Bu işlem sonunda N_2 gazı ile kurutma ile yüzeydeki isteneyen malzeme kaldırılmış olur.

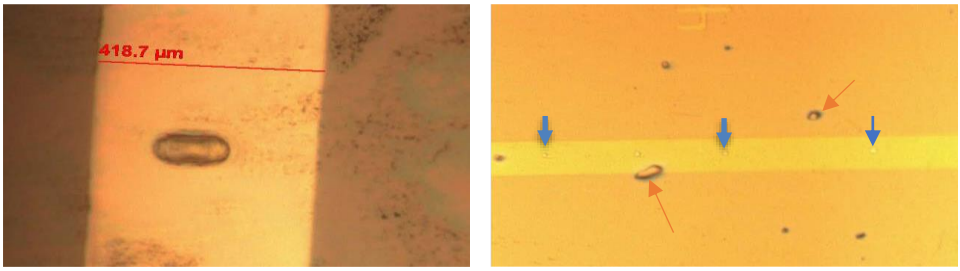
8. Sırasıyla 1, 2 ve 3 numaralı işlemler tekrar uygulanır.

9. Tekrar pozlama işlemi yapmak için 2 numaralı maske kullanılır ve pozlama süresi 3.5 s olarak pozlama türü ise "hard" seçilmelidir.

10. Numunenin çizilmesini önemek için teflon cımbız ile 40 sn developer içinde çalkalanır. Bu işlem için ultrasonik temizleyici kullanılmaz. Deiyonize su

bir pipetli şişeye alınarak en az 60 sn boyunca numune tazyikli deiyonize su ile yıkanır.

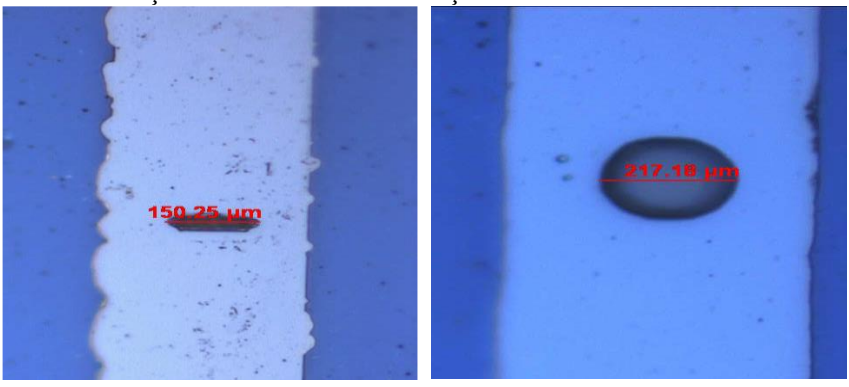
11. Bu aşama ile optik kontrol yapılarak varsa fotorezist 10 sn developer ve 30 sn deiyonize su işlemi ultrasonik temizleme cihazı kullanılmadan yapılır. N_2 gazı ile kurutulur.



Şekil 15. Her İki Resimde Temizlik İşlemi Sonrası Bir Elektrot Görüntüleridir

Developer ile temizleme işlemi sonrası hazır durumda olan elektrotlar Şekil 15' te verilmiştir. Sol kısımda bir elektrot genişliği ölçülmüş ve bir elektrot gözeneğinin fotorezist ile kapanmadığını yani iletime hazır olduğunu gösteren bir resimdir. Sağ taraftaki kırmızı oklarla verilenler desen ile alakalı olmaksızın iyon aşındırma bölgelerindeki kusurlar, 2B veya 3B ada atom oluşumları olabilir. Mavi oklarla gösterilenler şerit elektrotun açık gözenekleridir.

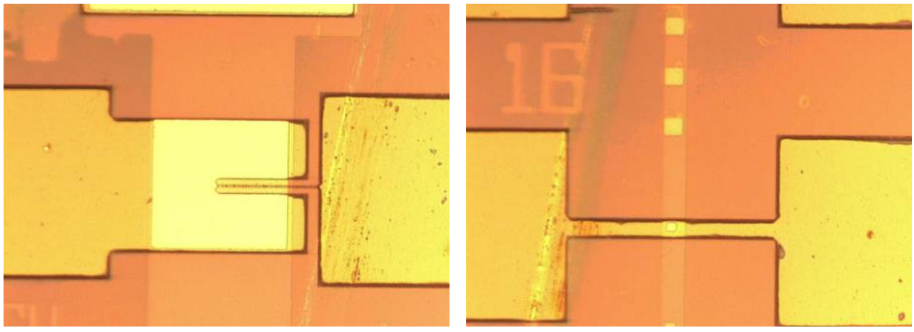
12. 1 dk bekleme ve 1 dk aşındırma işlemi ile toplam 18 dk' lık süre ile iyon aşındırma işlemi yapılır. Sputter sistemi 6 numaralı SiO_2 kaplaması 1 saat boyunca yapılır. Önceden kalibre edilen sistem SiO_2 için 1 saatt' e 100 nm kaplama yapabilmektedir. Bu işlem sonrası 1 numaralı aşama tekrar edilir.



Şekil 16. 16x8 µm^2 Alanda Her İki Resimde Temizlik İşlemi Sonrası Bir Elektrotların Görüntüleridir. Sio_2 Yalıtkan Maddesi Mavi Kısımlardır

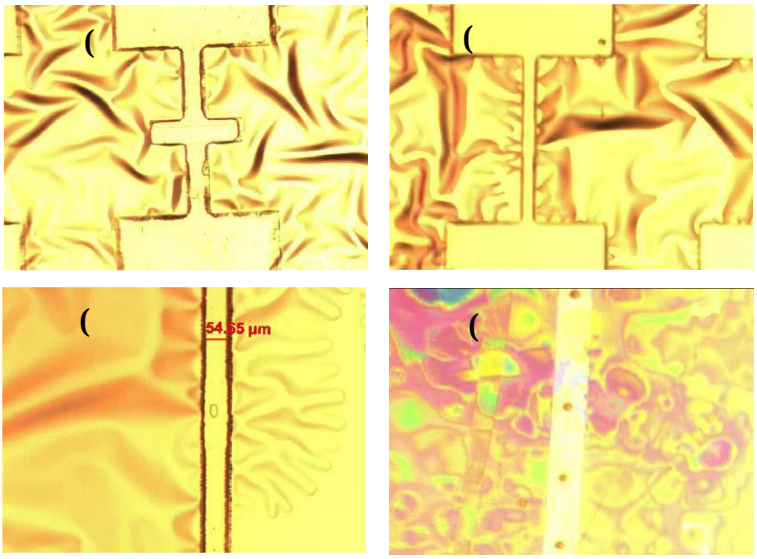
13. Spin kaplama cihazı ile 4000 rpm frekansında 45 sn boyunca negatif fotorezist kaplanır ve bu işlem sonunda 2 dk 100 ºC' de yumuşak tavlama yapılır.

14. 3.5 sn süresince son maske ile pozlama yapılır ve 100 ºC'de 1 dk tavlama yapılır. Buna ilaveten 9 sn son pozlama (flood exposure ile) yapılır ve temizlik için 20 sn developer ile 30 sn deiyonize suda bekletilir.

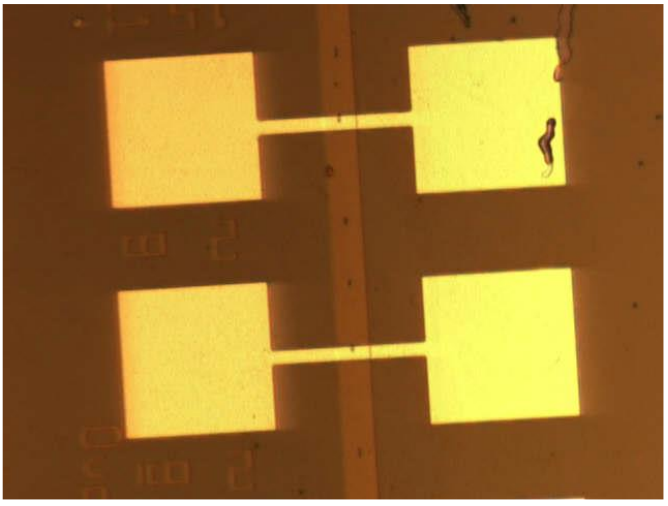


Şekil 17. Maske 3 Uygulaması Sonrası Negatif Fotorezist ile Kaplı Üst Elektrotların Görüntüsü

Developer işlemi yeteri derecede uygulanmadığında Şekil 17' de görüldüğü gibi bazı bölgelerde dalgalanma oluşmaktadır. Bu dalgalanmanın başka bir nedenide fotorezistin kenar kısımlara daha kalın olarak kaplanmasıdır. Burada unutulmaması gereken bir özellik, pozitif ve negatif fotorezistlerin 30 dk 100 ºC' de tavlanması bu süre ve sıcaklıkta fotorezist ile film kimyasal yapısını belli bir oranda değiştirerek daha düzenli bir yap oluşturarak deseninde daha düzenli olmasını sağlarlar. Bu işlem için fotorezistin ve film malzemesinin mutlaka çok iyi bilinmesi gerekir ve her fotorezist ve malzemeye bu işlem aynı süre ve sıcaklıkta uygulanamaz. Uzun tavlama süreleri ve sıcaklıklarında fotorezist yüzeye yapışarak developer ile sökülmesi zorlaşacağı için sökme işleminde aygıt yüzeyinde fotorezist lekeleri oluşabilir. Developer kimyasalı içinde uzun çalkalama süreleri ise aygıt elektrotlarını desenden silebilir. Silikon alt tabanlı çalışmalarda uzun avlama süreleri daha uygundur. Uzun tavlama sonucu yüzeyde değişimler oluşmuş bir desenin görüntüsü Şekil 18' (d) de görülmektedir. Şekil 17' de görülen düzgün elektrotların sağlanmasıyla iletim ve kontak alma amaçlı olarak yüzeye sputter sistemi ile gümüş kaplaması yapılır. Sistem parametreleri olarak 5 mTorr basınç, 10 W güç ve 10 dk kaplama süresi alınabilir. Alttaş deseni zerinde alt ve üst elektrotlar dışında kalan bölgenin gümüşten temizlenmesi için aseton için 12 saat kadar konulup bekletilir. Eğer bu işlem ile temizlenme tam sağlanamamış ise, cımbız ile 2 sn aralıklarla, içinde aseton beheri olan ultrasonik temizleyiciye sokulur. Uzun süre ultrasonik temizleyici maskeyi ve deseni tamamen ortadan kaldırabilir.



Şekil 18. Desen Üzerine Gümüş Kaplı Elektrotların Görüntüsü (A), (B) ve (C). Uzun Tavlama Sonucu Developer ile Fotorezit Desen Üzerinde Karışmıştır (D)

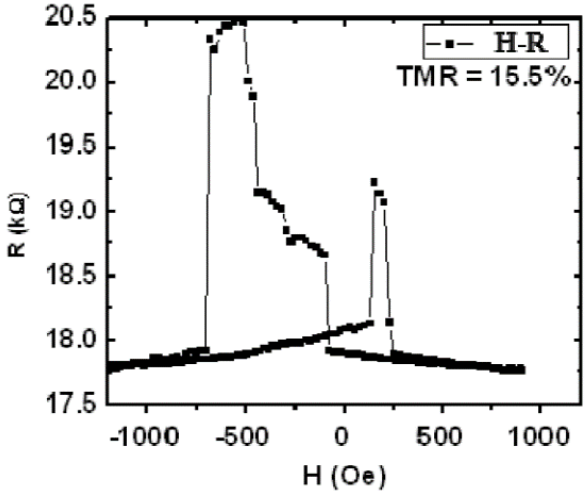


Şekil 19. Tüm Desen Kaplama İşlemleri Sonucunda Elektrotların Mikroskop ile 2B Görüntüsüdür

Şekil 19' da görülen elektrot tüm litografik aşamalarından geçerek artık bir aygıt karakteristiği olan sıcaklığa bağlı direnç ve manyetik alana bağlı direnç değişimleri olan transport ölçümlerine hazırdır. Bundan sonraki kısımda özetle elde ettiğimiz aygıtın transport özelliklerine bakacağız.

LSMO/STO/LSMO AYGITININ TRANSPORT ÖZELLİKLERİ

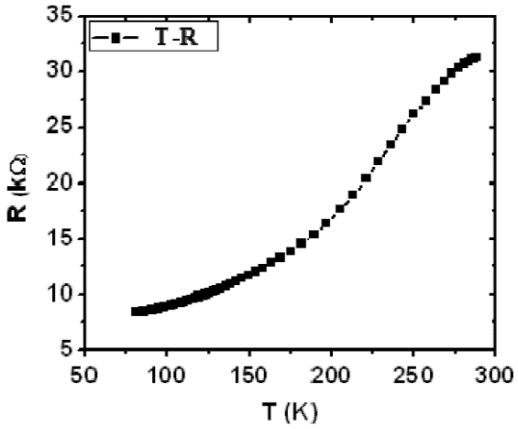
Önceki kısımlarda fotolitografi tekniğini ve bu teknikle bir aygıt üretim aşamaları ve detaylarını incelemiştik. Bu kısımda sıcaklığa (T) bağlı direnç (R) değişimi ve sıcaklık sabit tutularak manyetik alan (H) değiştiğinde oluşan direnç değişimi incelenecektir. Bu inceleme ile makro tasarımımızın iletim seviyesi hakkında bilgi edinmiş olacağız. Bu sayede genel olarak kullanılan ve litografik sistemlerle üretilen aynı kategorideki aygıtlar ile bir performans karşılaştırması için verilerimizi elde etmiş olacağız. 77 K sabit sıcaklıkta manyetik alan uygulandığında direnç değerlerindeki değişime bakacağız. Bununla birlikte manyetik alan ters uygulandığında, litografik yöntemle elde ettiğimiz aygıtımızın yön değiştirme (swithcing) özelliği taşıdığı incelenecektir. Bu tür aygıtlarda manyetik alanın uygulanma yönüne bağlı olarak yön değiştirme ya da aygıtın verdiği cevap kullanım alanı açısından oldukça önemlidir.



Şekil 20. 77 K Sabit Sıcaklıkta Manyetik Alan Uygulanıp Aygıtımızın Direnç Değişiminin Gözlemlenmesi

Şekil 20' de Physical Property Measurement System (PPMS) cihazı ile sıvı helyum ile oda sıcaklığından 77 K sabit sıcaklığına inildikten sonra ± 1000 Oe manyetik alan uygulayarak aygıtımızın TMR cevabı araştırılmıştır. Şekil 20' den anlaşılacağı üzere 0 alanın sağında ve solunda iki benzer grafik vardır bunlar alan

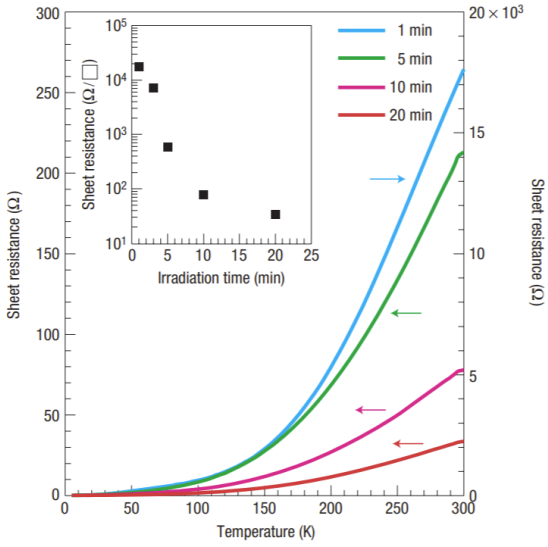
uygulandığında yön değiştirmenin olduğunu göstermektedir. Uygulanan manyetik alana TMR aygıtımızın cevabı pozitiftir yani Şekil 20' deki gibi iki elektrotlu bir sistemde yüksek direnç etkisi gözlemleniyor ve spin durumu antiparaleldir. Okunan TMR cevabı, genel olarak aşındırma işlem uzun tutulduğunda negatiftir. Bu durum aygıtın hazırlanma prosedürü hakkında önemli dikkati vermemiz gerektiğini göstermektedir. TMR aygıtında negatif direnç etkisi direncin işaretinin negatif alınması olarak algılanmamalıdır. Bu durum genellikle Şekil 20 grafiğinin tersi olarak düşünülebilir. Kullanılan aygıtlarda bazı elektrotların negatif bazılarının pozitif direnç etkisi göstermesi olası bir durumdur. Bu durumda sisteme uygulanan manyetik alanın elektronlar tarafından taşınımı farklı olduğu söylenebilir. Sinyal cevabının pozitif veya negatif olmasının bir sebebi tamamen uygulanan malzemenin bant yapısıyla alakalıdır. Elektronlar boşluklardan geçerken boşluğun boyutunun küçük olanını tercih ederler bu kısımda işin fiziği başlamaktadır. Bununla birlikte aynı elektrot üzerinde bulunun makro devrelerin sinyal cevaplarının ya tamamı pozitif ya da tamamı negatif olması gereklidir. Aynı elektrot üzerindeki farklı sinyal durumunda aygıtın üretim koşullarında optimizasyona ihtiyaç olduğu bilinmelidir.



Şekil 21. 50-300 K Sıcaklık Değişimine Karşı TMR Aygıtının Direnç Değişim Karakteristiği

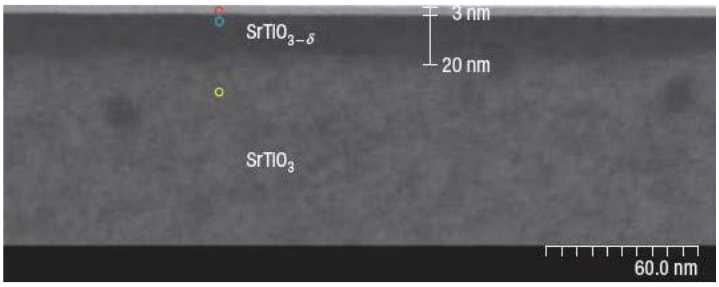
TMR aygıtının sıcaklığa bağlı direnç özelliği aygıtın çalışma durumunda sergilediği direncin bilinmesi açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle bir TMR aygıtının manyetik cevabı ile sıcaklık değişimine bağlı direnç özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. 50 ile 300 K arasında Şekil 21' de sıcaklık değişimine bağlı direnç etkileri görülmektedir. Direnç 75 ile 200 K arası hemen hemen lineer bir artış sergilerken, 200 K sonrasında belirli bir doyuma ulaşma eğrisi sergilemektedir. Lineer davranışın bozulmasının önemli bir sonucu olarak aşındırma işleminde yalıtkan olan $SrTiO_3$ alttaşımız iyon aşındırma işlemi sırasında aşınmaya maruz

kalmışsa, bu durumdan alttaşımız yalıtkan halden iletken hale geçecektir. Bu durumda elektrot devrelerinde negatif ve pozitif TMR cevaplarının her ikiside görülebilir. Bu sorunun çözümü için yapılan çalışmalara baktığımızda Şekil 22' de artan aşındırma süresine bağlı olarak hem direnç grafiklerinde lineerlik hemde direnç azalması görülmektedir. Bu durum olası elektrotların cevaplarında birtakım istenmeyen akımların olduğunu tanımlamaktadır.



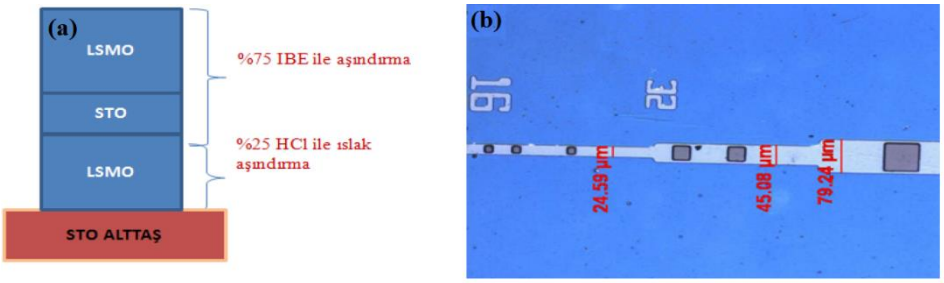
Şekil 22. Srtio$_3$ Alttaşının Farklı Aşındırma Sürelerine Bağlı Olarak Direnç Değişimi

Şekil 22' nin iç grafiğinde 25 dk süre ile iyon aşındırma işlemi uygulanmıştır. Grafikten okunacağı üzere aşınma süresi arttıkça dirençte çok belirgin bir azalma olmuştur. Başka bir değişle büyük bant boşluklu ve yalıtkan, yani çok yüksek dirence sahip $SrTiO_3$ alttaşının aşınma sonucunda oksijen boşlukları oluşmakta ve yalıtkan durumunda iletken hale geçmektedir. Bu metalik bir davranıştır. $SrTiO_3$ alttaşının metalik davranması desende istenmeyen bir akımın dolaşmasına neden olmaktadır. Buradan hareketle, fotolitografi aygıt tasarım, optimizasyon ve yapımının önemli kalibrasyonlarla mümkün olacağı anlaşılmaktadır. Bir fotolitografik aygıtın oluşturulması ve transport ölçümlerine sokulması en az 1 aylık bir süreyi gerektirmektedir.



Şekil 23. $Srtio_3$ Alttaşındaki Aşınma Değişimlerini Göstermek Üzere TEM Görüntüsü

Şekil 23' te görüldüğü üzere üstte 3 ile 20 nm olan kısımlardaki renk farkı aşırı iyon aşındırma işleminin bir sonucu ve aşırı hasar oluşumudur. Bu sebeple $SrTiO_3$ artık oda sıcaklığında iletken hale geçmektedir. $SrTiO_3$ amorf bir yapıya geçmektedir. Oksijen elektronunu Sr ya da Ti atomlarına vermektedir ve bu elektronların iletim bandına geçmesi oldukça kolaydır. Böylece seçilen alttaşında oldukça önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Standart ticari aygıtlarda alttaş kısmı bir tabaka ile ayrılarak optimize edilmiştir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için, hem mekanik hemde kimyasal aşındırmayı içeren bir hibrit aşındırma uygulanabilir.



Şekil 24. Hibrit Aşındırma Tekniği Şematik Gösterimi (A) ve Hibrit Aşındırma Sonucu Elde Edilen Kullanıma Hazır Bir Makro Elektrot (B)

Hem elektrot hemde alttaşın korunması için bellirli bir süre %75 oranında mekanik aşındırma sonrası kalan kısım (%25) kimyasal aşındırma ile elektrotların iletim sorunları ortadan kaldırılabilir. Kimyasal aşındırma kısmına bırakılan pay oldukça az olmalıdır (maksimum 1 dk). Uzun süreli kimyasal aşındırma aynı zamanda deseninde tamamen silinmesine neden olabilir. Bu sayede yalıtkan alttaşın metalik davranış gösterip akım oluşturması önlenmiş olacaktır.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Litografi tekniği ve önemli bir makro-aygıt tasarımı fabrikasyon esnasında karşılaşılan problemler ile anlatılmıştır. Bu aşamalara bakıldığında bir aygıt tasa-

rımı yaparken tüm parametrelerin birbirine bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle film kalınlıkları, aşındırma süreleri ve miktarları, kimyasal süreçler ve diğer parametrelerin bir bütünlük teşkil ettiği ve üretim esnasında mutlaka bir hata payı göz önüne alınarak bir iş akış süre ve diyagramı oluşturulmalıdır. Çalışılan sistem boyutları küçüldükçe hata yapma ihtimali arttığından daha hassas çalışmak önemle arz etmektedir. Burada önerildiği gibi bir hibrit aşındırma genel olarak makro-aygıt çalışmalarında ölçüm kusurlarını daha aza indirmektedir.

KAYNAKÇA

Boyraz C. (2012). Marmara Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü.

Daisuke K., et al., (2005). Blue-light emission at room temperature from Ar^{+}-irradiated Nature materials. 4, 816.

Kirchauer H. (1969). Photolithography Simulation Technischen Universität Wien Fakultät für Elektrotechnik.

Lee W. C., MacDonald A. H., (2009). Quantum Wells in Polar-Nonpolar Oxide Heterojunction Systems Phys. Rev. B 79:115408

Lord Rayleigh F. R. S., (1879). "Investigations in optics, with special reference to the spectroscope" (PDF). Philosophical Magazine. 5. 8 (49): 261–274.

Mack C., Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication. John Wiley & Sons, Ltd.

N. Reyren et al., (2007). Superconducting Interfaces Between Insulating Oxides. Science 317, 1196.

O'Donnell J., Andrus A., Oh E. S., Colla E. V., Eckstein, J. N., (2000). Colossal magnetoresistance magnetic tunnel junctions grown by molecular-beam epitaxy. Applied Physics Letters 76, 1994.

Ohtomo A., Hwang H. Y., (2004). A high-mobility electron gas at the La-AlO_3/$SrTiO_3$ heterointerface. Nature, London. 427, 423.

Okamoto S., Millis A. J. (2004). Spatial inhomogeneity and strong correlation physics: A dynamical mean-field study of a model Mott-insulator-band-insulator heterostructure. Phys. Rev. B 70, 241104(R).

Pentcheva R., Pickett W. E., (2007). Compensation Mechanisms and Functionality of Transition Metal Oxide Surfaces and Interfaces: A Density Functional Theory Study. Phys. Rev. Lett. 99, 016802.

Popescu C., Dorcioman G. Popescu A. C. Laser Ablation Applied for Synthesis of Thin Films: Insights into Laser Deposition Methods: Intech open yayınları.

Popovic Z. S., Satpathy S., (2005). Wedge-shaped potential and Airy-function electron localization in the oxide superlattices. Phys. Rev. Lett. 94, 176805.

Ruegg A., Pilgram S., Sigrist M., (2007). Strongly renormalized quasi-two-dimensional electron gas in a heterostructure with correlation effects. Phys. Rev. B 75, 195117.

Zhai X., Amish B. Shah A. B., Zuo J. M., Eckstein J. E., (2003). Magnetic properties of the ($LaMnO_3$)/($SrTiO_3$) atomic layer superlattices. Journal of Applied Physics 113, 173913.

BÖLÜM 4
TİTANYUM VE SÜPER ALAŞIMLARDA SOĞUTMA YÖNTEMLERİNİN ETKİLERİ

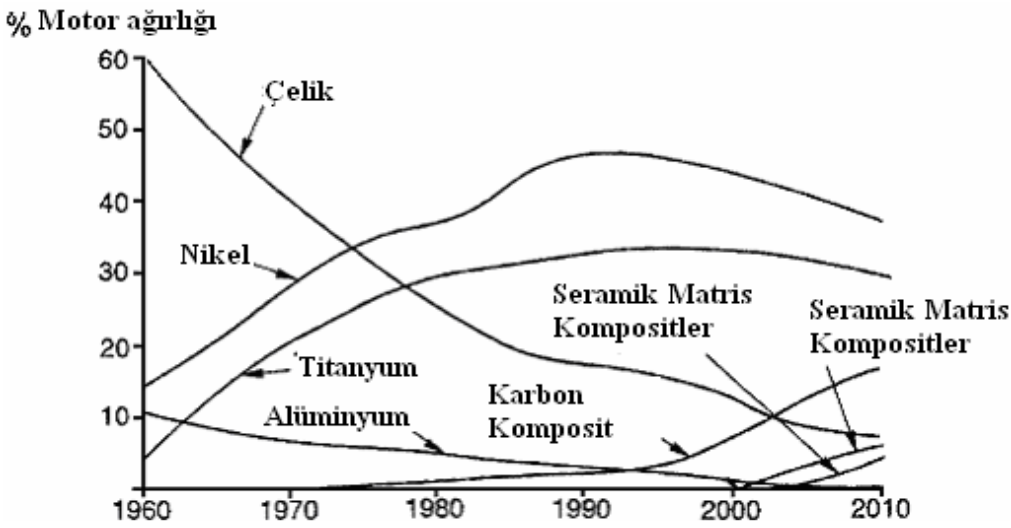
Arş. Gör. Bahattin YILMAZ[1], Prof. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ[2]
[1-2] Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ankara / TÜRKİYE

Öz: Yüksek teknolojinin kullanıldığı uzay ve havacılık endüstrisi başta olmak üzere günümüz imalat endüstrisi nitelikli ve üstün özelliklere sahip malzemelere ihtiyaç duymaktadır. Malzeme bilimindeki gelişmeler bu üstün özellikli alaşımları üretmekte ve endüstrinin hizmetine sunmaktadır. Ancak ileri teknoloji nitelikli malzeme kadar hassas ölçü ve tolerans değerlerine de ihtiyaç duymaktadır. Özel nitelikli malzemelerin yüksek maliyeti, üretim maliyetlerinin asgari seviyelerde tutulmasını ve yüksek verimlilik ile gerçekleştirilmesini gerekli kılmaktadır. Ancak malzemelerin bu üstün özellikleri talaşlı imalat yöntemleri ile şekillendirilmesini de son derece güçleştirmektedir. Talaşlı imalat operasyonlarında verimliliği artırmak için soğutma yöntemlerinin kullanılması eskiden beri uygulanan ve başarılı olan bir stratejidir. Soğutucuların maliyetleri, çevre ve insan sağlığına olan etkileri, farklı soğutma kabiliyetleri soğutucuların da farklı yöntemler ile uygulanmasına neden olmuştur. Bu çalışmada uzay ve havacılık alanında kullanılan üstün özellikli malzemeler tanıtılmaya çalışılmıştır. Bu malzemelerin talaşlı imalat ile şekillendirilmesi süreci açıklanmıştır. Talaşlı imalat sürecine soğutucu katkıları ve farklı soğutma yöntemleri tanımlanmıştır. Bu malzemelerin talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak şekillendirildiği ve farklı soğutma yöntemlerinin etkilerinin araştırıldığı çalışmalar incelenmiştir. İnceleme sonucunda bu malzemelerin işlenmesi sırasında soğutma yöntemlerinin kullanılmasının operasyon verimliliğini önemli bir şekilde artırdığı görülmüştür. Soğutucu basınçlarının da operasyonu etkilediği artan soğutucu basınçları ile işlem kalitesinin de arttığı tespit edilmiştir.

GİRİŞ

Tarihsel süreç içerisinde nitelikli malzeme kullanımı ürün kalitesini ve proses verimini önemli ölçüde artırmıştır. Üstün özelliklere sahip malzemelerin keşfedilmesi ya da üretilmesi teknolojik gelişmelere de zemin hazırlamıştır. Günümüz

teknolojisi uzay, havacılık ve savunma sanayi başta olmak üzere birçok endüstri dalında çığır açmıştır. Teknolojideki hızlı gelişmeler malzemelerin ve üretim süreçlerinin yüksek verimle gerçekleşmesini gerektirmektedir (Kurt, 2005). Bu hızlı gelişmeyle oluşan zorlu çalışma koşulları, yüksek mekanik ve kimyasal özelliklere sahip malzemelerin kullanımını gerekli kılmaktadır. Uzay ve havacılık endüstrisinin bu gereklilikler kapsamında sıklıkla kullandığı malzemelerin bazıları süper alaşımlar ve titanyum alaşımları olarak sınıflandırılabilir. Bu malzeme gruplarının farklı üstün özellikleri kullanımlarını da hem gerekli kılmakta hem de cazip hale getirmektedir. Şekil 1'de tarihsel süreçte bu malzemelerin uzay ve havacılık endüstrisi için ne kadar önemli olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Uzay Ve Havacılık Endüstrisinde Motor Ağırlığı ve Yıllara Göre Kullanılan Malzeme Çeşitliliği (Karabulut, 2006)

Süper alaşımlar; yüksek sıcaklıklar altında üstün mekanik ve kimyasal özelliklerini koruyabilme kabiliyetine sahip malzemelerdir (Bhattacharya ve ark., 1983). Bu malzemeler yüksek sıcaklıklar altında korozyon ve oksidasyona uğramazlar ve kimyasal kararlılık ortaya koyarlar. Yine yüksek çalışma sıcaklıklarında üstün kopma dayanımı ve aşınma direnci sergilerler (Bradley, 1988). Bu özellikleri süper alaşımların uçak motorlarında, uzay teknolojilerinde, gaz türbinlerinde, roket tahrik sistemlerinde, nükleer reaktörlerde ve petrokimyasal tesislerde kullanımını gerekli kılmıştır (Warbuton, 1967). Süper alaşımların en çok kullanıldığı endüstri dalı %70'lik bir oranla uzay ve havacılık endüstrisi olmuştur (Ezugwu, 2005). Süper alaşımlar bünyelerinde barındırdıkları temel bileşim elementlerine

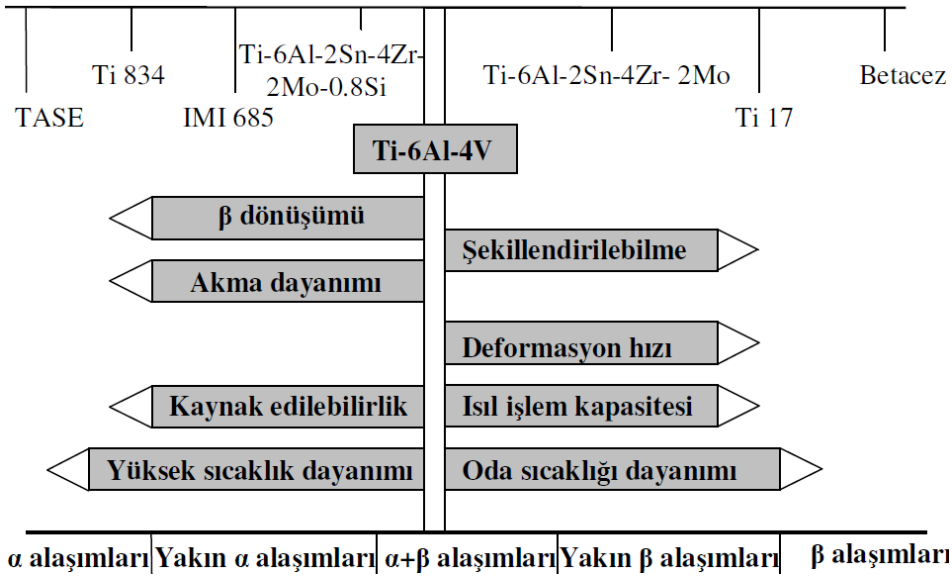
göre sınıflandırılmaktadır. Süper alaşımlar nikel esaslı süper alaşımlar, kobalt esaslı süper alaşımlar ve demir esaslı süper alaşımlar olmak üzere üç ana sınıfta toplanmıştır. Demir esaslı süper alaşımlar yüksek sıcaklıklar altında nispeten düşük mekanik özellikleri nedeni ile daha az tercih edilmektedir (Bradley, 1988). Buna karşın nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlar 1500-1650 °C sıcaklıklarda dahi yüksek mukavemet özelliklerine sahiptir ve sıklıkla kullanılan süper alaşımlardır (Yazıcıoğlu, 1999). Inconel 718 başta olmak üzere Inconel, Udimet, Rene ve Hastelloy alaşım grupları geniş kullanım alanı olan nikel esaslı süper alaşımlardır. Haynes, Stellite gibi alaşım grupları ise sıkılıkla kullanılan kobalt esaslı süper alaşımlar olarak endüstride yerini almıştır.

SÜPER ALAŞIMLAR		
Nikel bazlı	**Demir bazlı**	**Kobalt bazlı**
– **Inconel (578, 597, 600, 601, 617, 625, 706, 718, x750)** – **Nimonic (75, 80A, 90, 105, 115, 263, 942, PE.11, PE.16, PK.33)** – **Rene (45, 95)** – **Udimet (400, 500, 520, 700, 710, 720)** – **Pyromet 860** – **Astroloy** – **M-252** – **Hastelloy (C-22, G30, S, X)** – **Waspaloy** – **Unitemp AF-2IDA6, Cabot 214** – **Haynes 230**	– Incoloy (800, 801, 802, 807, 825, 903, 907, 909) – A-286 – Alloy-901 – Discaloy – Haynes 556 – H-155 – V-57	– Haynes 188 – L-605 – MAR-M918 – MP35N – MP159 – Stellite 6B – Elgiloy

Şekil 2. Süper Alaşım Grupları (Kıvak, 2007)

Titanyum alaşımları; düşük özgül ağırlıkları ve üstün mekanik özellikleri ile yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip malzemelerin başında gelmektedir. Titanyum alaşımlarının dayanımı, çeliğin dayanımı kadar yüksek olmasına karşın ağırlığı yarı yarıya düşüktür. Alüminyum ile titanyum alaşımları mukayese edildiğinde, titanyum alaşımları %60 daha ağır olmasına karşın 2 kat daha yüksek dayanım ortaya koymaktadır (Uzun, 2013). Düşük özgül ağırlıkları ve yüksek daya-

nımının yanında titanyum alaşımlarının yüksek ısı dayanımı, mükemmel korozyon direnci ve kimyasal kararlılığı öne çıkan diğer özelliklerinin başında gelmektedir (Dursun, 2007). Uzay ve havacılık endüstrisinde arzu edilen önemli özelliklerin başında, yüksek dayanımı düşük ağırlıklar ile sağlamak vardır. Titanyum alaşımlarının; sahip olduğu yüksek dayanım/ağırlık oranları ve diğer üstün özellikleri uzay ve havacılık alanında sıkılıkla kullanılmasına neden olmuştur (Ensarioğlu ve Çakır, 2005). Üretilen titanyumun %80'i uzay ve havacılık endüstrisi tarafından kullanılmaktadır (Tian ve ark., 2006). Uçak yapısal parçaları arasında yer alan iniş takımları, kanatlar, hidrolik tüp - borular, cıvata ve rondela gibi bağlama elemanları titanyum alaşımlarından üretilmektedir. Uzay ve havacılık alanı dışında jet motor uygulamaları, biyomedikal endüstrisi, otomotiv sanayi ve kimya endüstrisi başta olmak üzere birçok alanda da titanyum alaşımlarından yararlanılmaktadır (Joshi, 2006). Titanyum alaşımları mikroyapı özelliklerine bağlı olarak saf titanyum, α-Ti, α+β-Ti ve β-Ti olarak sınıflandırılmaktadır. Bu malzemeler mikroyapı fazlarına göre farklı karakteristik özellikler (çekme dayanımı, yorulma dayanımı, kırılma tokluğu vb.) sergilemektedir (Uzun, 2013). α+β-Ti titanyum alaşımları her iki mikro yapı özelliğini de bünyesinde taşıyarak üstün özellikleri (ısıl işlem kapasitesi, oda sıcaklığında yüksek dayanım, kaynak edilebilirlik ve yüksek ısı dayanımı) ile dikkat çekmektedir. Şekil 3'de titanyum alaşımları sınıfları ve bu sınıflara ait özellikler açıklanmaya çalışılmıştır. En çok kullanılan titanyum alaşımı α+β-Ti ailesinin bir üyesi olan Ti6Al4V alaşımıdır (Boyer ve ark., 1994).

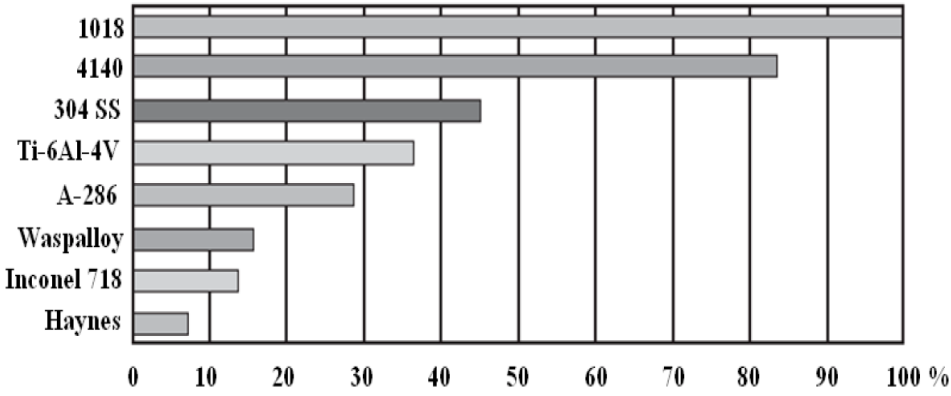


Şekil 3. Titanyum Alaşımları ve Alaşım Özellikleri (Kıvak, 2012)

Ham malzemelerin üstün özelliklerini sergileyebilmeleri ürüne dönüştürülmesi ve ait olduğu mekanik sistem içerinde çalışmasıyla mümkündür. Ham malzemeye şekil vererek ürüne dönüştürme operasyonlarının tamamı imalat sürecini oluşturmaktadır. İmalat yöntemleri; mekanik ve kimyasal yöntemler olarak iki ana başlık altında değerlendirilebilir. Talaşlı imalat yöntemi mekanik imalat yöntemlerinden sadece biridir. Talaşlı imalat; iş parçası üzerinden fazla malzemenin, uygun takım tezgâhlarında kesici takımlar vasıtasıyla kesilerek uzaklaştırıldığı ve hedeflenen son geometrinin elde edildiği şekil verme işlemlerinin tamamıdır (Yılmaz ve Güllü 2020). Talaşlı imalat yöntemleri tornalama, frezeleme, delik açma ve taşlama gibi farklı üretim stratejilerini bünyesinde barındırmaktadır. Talaşlı imalat yöntemi; neredeyse tüm malzemelere uygulanabilmesi, farkı geometrilerin rahatlıkla elde edilebilmesi, hassas yüzey ve boyut toleranslarına ulaşılması, özgün kesici takımların geliştirilmesi ve kısa operasyon süreleri nedeniyle diğer imalat yöntemlerine göre daha sık kullanılmaktadır. Avantajlarından dolayı uzay ve havacılık alanı başta olmak üzere birçok sektörde talaşlı imalat yöntemleri ürünlerin şekillendirilmesinde en önde gelmektedir.

Bir malzemenin talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak şekillendirilebilme kabiliyeti işlenebilirlik olarak adlandırılmaktadır. İşlenebilirlik bir açıdan da talaşlı imalatın verimliliğini ortaya koyan çıktıların tamamıdır. Malzemenin şekillendirilmesi sırasında oluşan kuvvetler ve buna bağlı enerji tüketimi, iş parçasının yüzey kalitesi, kesme işleminde kullanılan takımların ömürleri, kesme sırasında açığa çıkan yüksek ısı enerjisi vb. birçok çıktı malzemenin işlenebilirliğini belirlemektedir. Düşük işlenebilirlik özellikleri talaşlı imalat maliyetlerinin yüksek olması ya da ürün kalitesinin düşük olması anlamını taşımaktadır. Bu durum da operasyon verimini azaltmaktadır.

Titanyum alaşımları ve süper alaşımların üstün mekanik ve kimyasal özellikleri bu malzemelerin tercih edilmesini sağlarken yine aynı özellikler bu malzemelerin işlenebilirliğini düşürmektedir. Titanyum alaşımlarının yüksek ısı dayanımı, düşük elastikiyet modülleri işlenmesini zorlaştırmaktadır. Titanyum malzemelerin termal iletkenliği düşük olduğundan kesme bölgesinde yüksek sıcaklıklar açığa çıkmakta ve bu sıcaklığa bağlı olarak takım aşınmaları meydana gelmektedir. Malzemenin bu özellikleri de işlenebilirliği olumsuz etkilemektedir (Günay, 2016). Benzer bir durum süper alaşımlarda da söz konusudur. Süper alaşımların yüksek ısılarda dahi üstün mekanik özelliklerini koruması ve diğer avantajlı özellikleri bu malzemenin de işlenebilirliğini zorlaştırmaktadır (Kıvak, 2007). Şekil 4'de titanyum alaşımlarının ve süper alaşımların (Inconel 718 ve Haynes) işlenebilirlik seviyelerinin diğer bazı malzemeler ile kıyaslaması görülmektedir.



Şekil 4. Farklı Malzemelerin İşlenebilirlik Seviyeleri (Karabulut, 2006)

Talaşlı imalat uygulamalarında işlenebilirliği kolaylaştırmak ve operasyon verimliliğini artırmak için farklı soğutma yöntemleri kullanılmaktadır. Talaşlı imalat operasyonlarında soğutucuların uygulanması ilk kez 1868 yıllarında tornalama işlemi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Soğutucu akışkan olarak suyun kullanıldığı ilk uygulamalarda kesme hızları soğutucu etkisi ile %30 oranında artırılmıştır (Yücel ve ark. 2011). Soğutma işleminin başlıca görevleri kesici takım ve iş parçasını soğutmak, takımın iş parçası ve talaş ile olan temasını azaltarak yağlama yüzeyi oluşturmak, talaşı etkili bir şekilde uzaklaştırmak, takıma yapışan talaşı (BUE) engellemek veya minimize etmek, güç gereksinimlerini azaltmak, korozyonu önlemek ve takım ömrünü artırmak olarak sıralanabilir (Groover, 2002). Soğutma sıvıları bir taraftan bu görevleri yerine getirirken diğer yandan istenen bazı özellikleri de taşımalıdır. Etkili bir soğutma işlemi için soğutma sıvıları soğutma ve yağlama özelliklerine sahip olmalıdır. Bu özelliklerini uzun süre koruyabilmeli, korozyona yol açmamalı, tezgâh donanımlarına zarar vermemeli, uçucu ve yanıcı olmamalı, iş parçasının kimyasal yapısını bozmamalı, çevreci olmalı ve insan sağlığı için tehlike oluşturmamalıdır. Tüm bu özellikler dikkate alınarak malzeme ve işleme yöntemlerine bağlı olarak farklı soğutma sıvıları kullanılmaktadır (Yücel ve ark. 2011). Kesme işlemi sırasında karşılaşılan farklı sorunları etkili bir şekilde çözmek için kullanılan soğutma sıvıları ve soğutma uygulamaları da değişmektedir. Saf kesme yağları, su bazlı yağlar ve gazlar başlıca soğutucu sıvılar olarak tanımlanmaktadır. Saf kesme yağları yüksek basınçların oluştuğu ve etkili yağlama gerektiren bölgelerde kullanılmaktadır. Su bazlı soğutma sıvıları yüksek kesme hızlarına bağlı yüksek sıcaklıkların oluştuğu şartlarda tercih edilirler ve kısmen takım üzerinde oluşan yükleri azaltırlar. Gaz soğutucular işe diğer iki tip soğutucu akışkanın nüfuz edemediği kesme koşullarında etkili olmaktadır (El Ba-

radie, 1996). Bu sıvıların birçoğu sentetik, kimyasal sıvılarken organik bazlı çevreci sıvıların kullanımı da görülmektedir. Soğutucular gibi soğutma yöntemleri de farklılık göstermektedir. Yaygın kullanılan soğutma yöntemleri dört ana başlık ile değerlendirilebilir.

Geleneksel soğutma

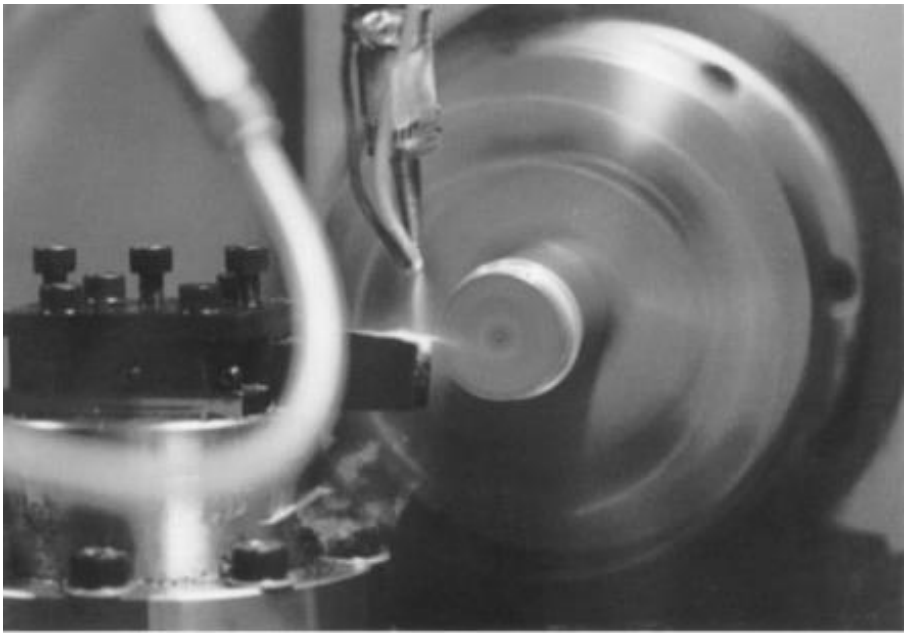
Geleneksel soğutma işlemelerinde genellikle su bazlı soğutma sıvıları tercih edilmektedir. Bu yöntemde soğutma sıvısı nozullar yardımı ile kesme bölgesine gönderilir ve operasyon verimliliğinin artırılması hedeflenir. Geleneksel soğutma yöntemi kesme bölgesine takım dışından gönderilebildiği gibi takım içinden soğutma uygulamaları da sıklıkla tercih edilmektedir. Soğutucu akışkan uygulanırken kesme ortamına farklı basınçlar ile gönderilebilmektedir. Dıştan soğutma uygulamalarında basınç değerleri 5-50 bar aralığında değişmektedir. İçten soğutma uygulamalarında ise bu basınç değerleri 35-100 bar basınçlara kadar çıkabilmektedir (Stephenson ve Agapiou, 2006). Bu yöntem tornalama, delme ve frezeleme işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle talaş tahliyesinin önemli olduğu delme işleminde takım içinden soğutma uygulamaları operasyon verimini önemli ölçüde artırmaktadır. Kimyasal içeren bu soğutucuların, yoğun temas durumunda insan sağlığına zarar verdiği bilinmektedir.



Şekil 5. Takım Dışından Uygulanan Su Bazlı Geleneksel Soğutma Yöntemi

Gaz ile soğutma

Kesme bölgesine basınçlı bir gazın gönderilmesi ile gerçekleştirilen soğutma uygulamasıdır. Bu yöntemde hava, soğutulmuş hava, argon ve karbondioksit gibi gazlar kullanılmaktadır. Ucuz ve sınırsız bir kaynak olması nedeni ile hava ya da soğutulmuş hava en yaygın kullanım alanlarının başında gelir. Sentetik soğutucuların insan sağlığına ve çevreye olumsuz etkileri, atıklarının yok edilme maliyetleri gibi çevreci ve ekonomik nedenlerden dolayı hava ile soğutma son dönemlerde önemli bir alternatif haline gelmiştir. Vortex tüp ile soğutulmuş hava uygulamaları başta tornalama ve frezeleme olmak üzere, delme ve taşlama işlemlerinde kullanılmaktadır. Hava ile soğutma uygulamaları birçok açıdan etkili olsa da yağlama etkisi açısından diğer soğutma yöntemlerinin gerisinde kalmaktadır (Gürkan ve ark, 2020).



Şekil 6. Kesme Bölgesine Soğutucu Gaz Gönderilerek Yapılan Soğutma İşlemi (Gürkan ve Ark, 2020)

Minimum miktarda yağlama (MQL) soğutma

Soğutucu akışkanların yüksek maliyetleri, çevre ve sağlık açısından olumsuz özellikleri ve hava soğutmanın yağlama özelliğinin yetersizliği bu iki soğutma yönteminin birleştirilmesi ile minimum miktarda yağlama yönteminin doğmasına neden olmuştur. Bu soğutma uygulamasında basınçlı hava çok az miktarlarda yağ ile karıştırılarak kesme bölgesine gönderilmektedir. Böylece kimyasal yağ kullanımı çok az (10 - 150 ml/saat) miktarlarda tutularak yağın olumsuz etkileri azaltılmaktadır. Basınçlı havanın ise eksik olan yağlama özelliği böylece giderilmiş

olmaktadır. Minimum miktarda yağlama takım içinden ve dışından uygulanabilmektedir. Basınçlı havanın etkisi ile yağlama takım-talaş ve takım-iş parçası arasında daha etkili nüfuz etmektedir. Bu durum yağlama kalitesini artırmaktadır (Gürbüz ve ark. 2017). Minimum miktarda yağlamanın farklı yağlar ve basınç uygulamaları ile etkinliği değişmektedir. Tüm talaşlı imalat uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilmektedir.

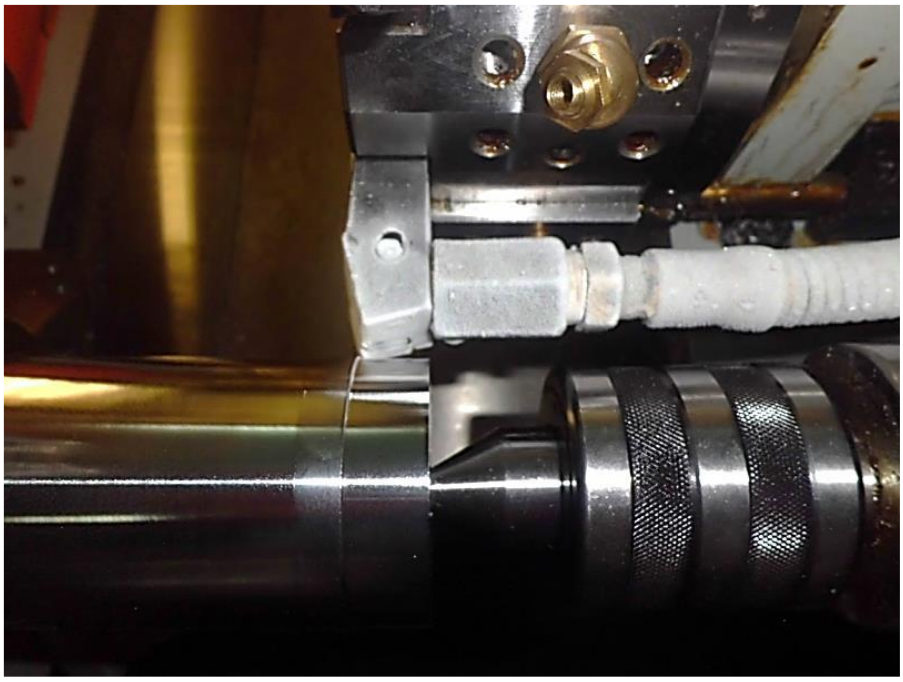


Şekil 7. Minimum Miktarda Yağlama ile Soğutma Yöntemi

Kriyojenik soğutma

Kesme sırasında oluşan yüksek ısıların azaltılarak takım ömrünün ve kesme performansının aratılması için kriyojenik soğutma yöntemi gerçekleştirilmektedir. Bu yönteme özellikle yüksek kesme sıcaklıklarının oluştuğu çalışmalarda başvurulmaktadır (Sarıkaya, 2014). Kriyojenik soğutma yönteminde soğutma işlemi, kesme bölgesine sıvı azot gönderilerek yapılmaktadır. Sıvı azotun suyun donma sıcaklığının çok altındaki sıcaklıklarda (-196 ^{o}C) kalabilmesi farklı uygulamalarda kullanılmasına imkân vermektedir. Bu düşük sıcaklıklarda yapılan soğutma işlemi canlı dokuda ani donmalara neden olabileceği için çalışma ortamı çok dikkatli seçilmelidir. Soğutucu azot özel tanklarda saklanmakta ve kesme bölgesine yine özel hortumlar ile transfer edilmektedir. Sıvı azotun temini saklanması ve kesme bölgesine transferi ek maliyetler getirmektedir. Bu ek maliyetler ve hassas çalışma

koşulları kriyojenik soğutmanın yaygın kullanılan soğutma yöntemlerinden olmasının önüne geçmektedir. Çok yüksek kesme sıcaklıklarının oluştuğu özel malzemelerin işlenmesinde ve akademik çalışmalar çerçevesinde sınırlı kullanılmaktadır. Hâlihazırda yaygınlaşma boyutu kazanamamıştır.



Şekil 8. Kriyojenik Soğutma ile Tornalama Operasyonu (Sarıkaya 2014)

Bu çalışmada uzay ve havacılık endüstrisinin gözde malzemeleri olan süper alaşımlar ve titanyum alaşımları kullanılarak gerçekleştirilen soğutma çalışmaları araştırılmıştır. Bu iki malzeme grubu için ideal soğutma yöntemi ve bu yöntemlerin etkinliği incelenmiştir.

SOĞUTMA UYGULAMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Süper Alaşımlar

Kobalt esaslı süper alaşım olan Haynes 25'in tornalandığı bir başka araştırmada geleneksel soğutma, basınçlı hava ile soğutma, minimum miktarda yağlama ile soğutma ve kriyojenik soğutma yöntemleri karşılaştırılmıştır. Takım aşınması, sıcaklıklar ve yüzey pürüzlülükleri çalışma kapsamında incelenmiştir. En yüksek takım aşınmalarının kuru kesme şartlarında oluştuğu soğutma yöntemlerinin takım aşınmasını azalttığı bildirilmiştir. Takım aşınmasının en fazla olduğu soğutma yönteminden en az olduğu soğutma yöntemine göre sıralaması; geleneksel soğutma, basınçlı hava ile soğutma, minimum miktarda yağlama ile soğutma ve

kriyojenik soğutma olarak sıralanmıştır. Bu durumun literatür ile uygunluk gösterdiği bildirilmiştir (Sharma ve ark., 2009). Yüzey pürüzlülükleri için de aynı durum söz konusudur (Sarıkaya, 2014). Benzer bir strateji ile Inconel 718 süper alaşımının tornalandığı çalışmada minimum miktarda yağlama, geleneksel soğutma ve kuru şartlar değerlendirilmiştir. Kesici takım üzerindeki kaplama tiplerinin de değerlendirildiği çalışmada takım aşınması ve takım ömrü çıktıları için en kötü performansın kuru şartlarda elde edildiği görülmüştür. Kaplama tipleri de dikkate alınarak minimum miktarda yağlamanın takım ömrünü ve yüzey kalitesini artırdığı görülmüştür (Kamata ve Obikawa, 2007). Nikel esaslı süper alaşımlar sınıfında yer alan Inconel 718 ile yapılan tornalama deneylerinde geleneksel soğutma yöntemi farklı basınçlar ile uygulanmıştır. Takım aşınmalarının incelendiği çalışmada sabit 300 m/min kesme hızı, 0,2 mm/rev ilerleme oranı ve 1 mm kesme derinliği kullanılmıştır. Seramik takımlar ile yapılan çalışmada geleneksel soğutma 0,7 MPa basınç ile yüksek basınçlı geleneksel soğutma ise 20 MPa basınçla uygulanmıştır. Çalışma sonucunda yüksek basınçlı soğutmanın takım ömrünü artırdığı bildirilmiştir (Vagnorius ve Sørby, 2011). Soğutucu basıncının etkisinin araştırıldığı başka bir çalışmada geleneksel soğutma ve yüksek basınçlarda (110, 150, 203 bar) soğutma uygulamaları kullanılmıştır. Karbür takımlar ile Inconel 718'in tornalandığı çalışmada 203 bar basınç ile uygulanan soğutma işleminin geleneksel soğutmaya göre yedi kat fazla takım ömrü sağladığı ve artan soğutucu basıncı ile takım ömrünün arttığı bildirilmiştir (Ezugwu ve ark., 2005).

Inconel 718 malzemenin delinmesi sırasında kuru işleme şartları, geleneksel soğutma ve kriyojenik soğutma uygulamaları kıyaslanmıştır. Kesme bölgesi sıcaklıkları, yüzey pürüzlülükleri, delik kalitesi ve takım ömrü çalışma çıktıları olarak değerlendirilmiştir. En düşük kesme sıcaklıkları kriyojenik soğutma ile elde edilirken, yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü için geleneksel soğutma uygulamalarının daha avantajlı olduğu bildirilmiştir. Delik kalitesi araştırmalarında kriyojenik soğutma diğer soğutma yöntemlerine göre daha iyi performans ortaya koymuştur (Uçak, 2017).

Nikel esaslı süper alaşım Inconel 718 in frezelendiği çalışmada ise kriyojenik çalışma ve kuru kesme şartları kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda kriyojenik soğutmanın güç tüketimini artırmadan yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği bildirilmiştir (Shokrani ve ark., 2012). Yine Inconel 718 malzemenin frezelendiği çalışmada kuru kesme koşulları minimum miktarda yağlama koşulları ile karşılaştırılmıştır. Minimum miktarda yağlama yöntemi ile yapılan soğutmanın takım aşınmaları ve kesme kuvvetleri için olumlu etkileri olduğu çalışma kapsamında bildirilmiştir

(Zhang ve ark., 2012). Inconel 718 malzemenin frezelenerek farklı soğutma sistemlerinin etkinliğinin kıyaslandığı çalışmada sabit kesme parametreleri (kesme hızı 120 m/min, ilerleme oranı 0,06 mm/diş) kullanılmıştır. Çalışmada kuru, geleneksel soğutma, kriyojenik soğutma (CO_2), minimum miktarda yağlama ile kriyojenik ve minimum miktarda yağlama (CO_2+MQL) gibi farklı soğutma yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda en düşük takım ömrü kuru şartlarda oluşmuştur. Değişik soğutma yöntemleriyle iyiye doğru takım ömrü sıralaması geleneksel soğutma, kriyojenik ve minimum miktarda yağlama ve minimum miktarda yağlamayla yapılan soğutma yöntemlerinde elde edilmiştir (Pereira ve ark., 2015).

Süper alaşımların talaşlı imalat yöntemleri ile şekillendirildiği çalışmalarda soğutma yöntemlerinin etkinliği açıkça ortaya konulmuştur. Süper alaşımların verimli bir şekilde işlenmesi için soğutucu kullanımının gerekli olduğu görülmüştür. Soğutma uygulamalarının özellikle takım ömrünü iyileştirdiği ve aşınma eğilimlerini azalttığı görülmüştür. Farklı kesme uygulamaları malzemeler ve kesme şartları için farklı soğutma yöntemleri öne çıkmıştır. Soğutma uygulamalarına ek olarak artan soğutucu basınçlarının da kesme verimliliğini artırdığı görülmüştür. Kolay uygulanabilirliği ile geleneksel soğutma uygulamaları, çevreci ve etkili performansı ile de minimum miktarda yağlama uygulaması öne çıkmaktadır.

Titanyum Alaşımları

Titanyum alaşımlarından Ti-5553'ün tornalandığı çalışmada geleneksel soğutma, yüksek basınçlı geleneksel soğutma ve minimum miktarda yağlama yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmada takım aşınması ve kuvvetler incelenmiştir. Yüksek basınçlı soğutmanın takım aşınmalarını azalttığı ve en fazla aşınmanın minimum miktarda yağlama uygulamasında oluştuğu bildirilmiştir (Kaynak ve ark., 2018). Ti6Al4V malzemenin tornalandığı çalışmada geleneksel soğutma ve minimum miktarda yağlama ile soğutma operasyonlarının kesme bölgesinde oluşan yüksek ısıyı uzaklaştırmada yetersiz kaldığı bildirilmiştir. Çalışma kapsamında etkili bir soğutma işlemi için kriyojenik soğutma ve geleneksel soğutma uygulamaları karşılaştırılmıştır. Kriyojenik soğutmanın takım aşınmalarında daha faydalı olduğu, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği bildirilmiştir (Dhananchezian ve Kumar, 2011). Yine Ti6Al4V malzemenin tornalandığı bir başka çalışmada geleneksel soğutma ile geleneksel soğutmanın yüksek basınçla uygulandığı çalışma şartları karşılaştırılmıştır. Takım ömrü ve yüzey pürüzlülüklerinin incelendiği çalışmada PCD takımlar kullanılmıştır. Yüksek basınçla uygulanan soğutma işleminin takım ömrünü önemli ölçüde artırdığı bildirilmiştir. Tüm çalışma koşullarında kabul edilebilir yüzey pürüzlülüklerinin elde edildiği ifade edilmiştir (Ezugwu ve ark. 2007).

Frezeleme operasyonu kapsamında geleneksel soğutma ve minimum miktarda yağlama yöntemleri kuru kesme koşulları ile karşılaştırılmıştır. En düşük takım aşınması değerlerinin minimum miktarda yağlama şartlarında elde edildiği görülmüştür (Khatri ve Jahan, 2018). Ti6Al4V malzemenin frezelenmesi esnasında farklı soğutma uygulamalarının etkinliğinin araştırıldığı çalışmada takım ömrü incelenmiştir. Araştırmada kuru şartlar, geleneksel soğutma, kriyojenik soğutma ve nitrojen-yağ püskürtme kullanılmıştır. Çalışma sonucunda nitrojen-yağ ikilisinin en iyi takım performansını ortaya koyduğu belirtilmiştir (Su ve ark., 2006). Bir başka titanyum alaşımının (Ti-48Al-2Cr-2Nb) frezelendiği araştırmada kuru, geleneksel soğutma ve minimum miktarda yağlama ile soğutma yöntemleri kıyaslanmıştır. En az takım ömrü kuru şartlar ile yapılan kesme işleminde belirlenmiştir. Minimum miktarda yağlama yönteminin sürtünmeleri azaltarak etkili bir yağlama oluşturduğu ve en uzun takım ömrünü sağladığı belirtilmiştir (Priarone ve ark., 2014). Ti6Al4V malzemenin mikro frezelenmesinde kuru işleme koşulları ile yüksek basınçlı soğutmanın ve minimum miktarda yağlamanın etkileri araştırılmıştır. Minimum miktarda yağlamanın takım aşınmalarını azalttığı ve yüzey kalitesini artırdığı bildirilmiştir (Vazquez ve ark., 2014).

Titanyum alaşımlarının (Grade 2) delindiği araştırma kapsamında geleneksel soğutma ve kriyojenik soğutma uygulamaları karşılaştırılmıştır. Farklı kesme parametreleri eşliğinde yapılan çalışmada delik yüzey kalitesi, kesme sıcaklıkları kuvvet oluşumları ve takım aşınmaları irdelenmiştir. Kriyojenik soğutmanın yaklaşık %60 seviyede kesme sıcaklıklarını düşürdüğü, takım aşınması için daha iyi sonuçlar verdiği bildirilmiştir. Buna karşın delik kalitesi ve yüzey pürüzlülüğü değerlendirildiğinde geleneksel soğutma yöntemi kriyojenik soğutmaya kıyasla daha başarılı bulunmuştur (Shakeel Ahmed ve ark., 2016). Ti6Al4V malzemenin delindiği bir diğer çalışmada geleneksel soğutma ve kriyojenik soğutma kıyaslanarak operasyon performansına katkıları irdelenmiştir. Çalışmada kesme bölgesi sıcaklıkları, itme kuvveti, tork, yüzey pürüzlülüğü ve delik kalitesi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda kriyojenik soğutmanın ısıyı önemli ölçüde düşürerek geleneksel soğutmaya göre daha iyi performans sergilediği bildirilmiştir (Shakeel Ahmed ve Pradeep Kumar 2016). Başka bir araştırmada, Ti6Al4V malzemenin mikro delme işlemleri, farklı soğutma yöntemleri ile test edilmiştir. Kesme parametrelerinin değişken olduğu çalışmada kesme kuvvetleri, tork ve takım aşınması incelenmiştir. Çalışma sonucunda en başarısız kesme performansı kuru şartlar ile gerçekleşmiştir. Geleneksel soğutma uygulamasının yüzey kalitesine katkı sağladığı bildirilmiştir. Kuvvet ve tork değerlerinin kriyojenik soğutma ile en yüksek değerlere çıktığı ifade edilmiştir (Perçin ve ark., 2016).

Titanyum alaşımlarının işlenmesinde soğutucuların verimin artmasına büyük katkı sağladığı görülmüştür. Artan soğutucu basıncı operasyona olumlu katkılar sağlamıştır. Titanyum alaşımlarının düşük ısıl iletkenliği bu malzemelerin işlenmesi sırasında yüksek ısının oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum operasyon kalitesini azalttığı için soğutma uygulamaları titanyumun işlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Yüksek ısının daha başarılı bir şekilde kontrol edilebildiği kriyojenik soğutma bu bağlamda etkili olmuştur. Ancak kriyojenik soğutmanın seçiminde uygulanabilirliği, maliyetleri ve operatör güvenliği için olumsuz etkileri dikkate alınmalıdır.

SONUÇLAR

Bu araştırmada özel malzemelerin işlenmesi sırasında kullanılan soğutma yöntemlerinin etkileri araştırılmıştır. Süper alaşımlar ve titanyum alaşımları olarak malzeme kavramı iki temel gruba ayrılmış ve sınırlandırılmıştır. Soğutma yöntemleri de temel dört başlık altında toparlanmış ve bu yöntemlerin çalışma prensipleri açıklanmaya çalışılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda elde edilen bulgular bu bölümde maddeler halinde sıralanmıştır. Tablo 1 ile soğutucuların etkileri 1 ile 5 arasında puanlanmış ve her yöntem için etkilerinin sayısal karşılığı tabloda belirtilmiştir.

- Talaşlı imalat yöntemlerinde soğutucu kullanımı operasyon verimliliğini belirgin bir şekilde artırmaktadır.
- Başta süper alaşımlar ve titanyum alaşımları olmak üzere malzemelerin farklı özellikleri farklı soğutma yöntemlerinin öne çıkmasına neden olmuştur. Bu bağlamda malzeme yapısı soğutma için de büyük önem taşır.
- Kriyojenik soğutma, kesme bölgesindeki yüksek ısıyı düşürmede etkilidir. Bu durum ısıya bağlı takım aşınmalarını azaltırken, bazı durumlarda aşırı düşük ısının kuvvetlerin yüksek çıkmasına neden olduğu düşünülmektedir.
- Minimum miktarda yağlama ile soğutma işlemi basınçlı hava ile soğutma yöntemine göre daha etkili bir yağlama performansı sergilemiştir. Bu durum verimliliği artırmaktadır.
- Kriyojenik soğutma ve minimum miktarda yağlama ile soğutma yöntemleri ek donanımlar gerektirdiği için uygulanabilirlikleri kısmen zor ve pahalıdır.
- Geleneksel soğutma sistemlerinin tezgâhlarda hazır bulunması uygulanabilirliğini kolaylaştırmış ve kullanımını yaygınlaştırmıştır.
- Hava ile soğutma temiz ve maliyeti düşük bir yöntemdir.

- Soğutucuların uygulanmasında artan basınçlar çoğu zaman operasyon verimini artırmaktadır.

Tablo 4. Alaşımların İşlenmesinde Kullanılan Soğutma Yöntemlerinin Etkileri

YÖNTEMLER / ETKİLERİ	Hava ile Soğutma	Geleneksel Soğutma	MQL Soğutma	Kriyojenik Soğutma
Uygulanabilirliği	4	5	3	2
Yağlama Özelliği	1	4	5	2
Soğutma Özelliği	2	4	3	5
Talaş Tahliyesi	4	4	3	3
Çevresel Etkileri	5	2	3	4
İnsan Sağlığına Etkileri	5	2	2	3
Maliyet Etkileri	5	4	3	2
1: Çok kötü 2: Kötü 3: Orta 4: İyi 5: Çok iyi				

KAYNAKÇA

Bhattacharya, S.K., Javaid, A., Lewis, M.H., Walbank, J., (1983). "Wear Mechanisms of Syalon Ceramic Tools when Machining Nickel-Based Materials" *Metals Technology*, 10: 482-493.

Boyer, R.R., Welsch, G., Collings, E.W., (1994). "Materials Properties Handbook: Titanium Alloys" *ASM Int.*, Materials Park, OH. 465-480.

Bradley, E., (1988). "Superalloys A Tecnical Guide" *ASM Internationali* USA, 1-29.

Dhananchezian, M., Kumar, M.P., (2011). "Experimental investigations on cryogenics cooling by with modified cutting tool insert" *Cryogenics*, 51,34-40.

Dursun, M., (2007). " Titanyum ve Inconel 718 Malzemelerin Frezelenmesinde Takım Aşınması ve Yüzey Pürüzlülüğünün Araştırılması" Yüksek Lisans Tezi, Tasarım ve İmalat Mühendisliği, Gebze.

El Baradie, M.A., (1996). "Cutting fluids: Part I. Characterisation" *Journal of Materials Processing Technology*, 56 (1-4), 786-797.

Ensarioğlu, C., Çakır, M.C., (2005). " Titanyum ve Alaşımlarının İşlenebilirlik Etüdü" *Mühendis ve Makine*, 46:546: 1-7.

Ezugwu, E.O., (2005). "Key improvements in the machining of difficult to cut aerospace superalloys" *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45: 1353-1367.

Ezugwu, E.O., Bonney, J., Da Silva, R.B., Çakır, O., (2007). "Surface integrity of finished turned Ti-6Al-4V alloy with PCD tools using conventional and high pressure coolant supplies" *International Journal of Machine and Manufacture*, 47, 884-891.

Ezugwu, E.O., Bonney, J., Fadare, D.A., Sales, W.F., (2005). "Machining of nickel-base, Inconel 718, alloy with ceramic tools under finishing conditions with various coolant supply pressures" *J. Mater. Process. Technol.*, 162–163, 609–614.

Groover, M.P., (2002). "Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials Processing and System" *Wiley*, New York, (2nd ed.), 550-560.

Günay, M., (2016). " Ti-6Al-4V' nin Tornalanmasında Takım Aşınması ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etki Eden Parametrelerin Araştırılması" Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman,

Gürbüz, H., Baday, Ş., Gönülaçar, Y.E., (2017). "Minimum Miktarda Yağlamanın Frezeleme İşlemleri Üzerine Etkisinin Araştırılması: Derleme" *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 7:2, 59-79.

Gürkan, D., Yaşar, S.A., Uzun, G., Korkut, İ., (2020). "Investigation of the Vortex Cooling Method to Machining Method and Cutting Parameters" *GU J Sci, Part C*, 8(3): 730-745.

Joshi, V.A., (2006). "Titanium Alloys", *Taylor & Francis*, London, 5-20.

Kamata, Y., Obikawa, T., (2007). "High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools" *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193, 281-286.

Karabulut, Ş., (2006). "Inconel 718 süper alaşımlarının işlenmesinde talaş kırma problemleri ve talaş kırıcı tasarımı" Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,

Kaynak, Y., Gharibi, A., Yılmaz, U., Köklü, U., Aslantaş, K., (2018). "A comparison of flood cooling, minimum quantity lubrication and high pressure coolant on machining and surface integrity of titanium Ti-5553 alloy" *J. Manuf. Process*, 34, 503–512.

Khatri, A., Jahan, M.P., (2018). "Investigating tool wear mechanisms in machining of Ti-6Al-4V in flood coolant, dry and MQL conditions" *Procedia Manuf.*, 26, 434–445.

Kıvak, T., (2007). " Inconel 718'in Delinebilirliğinin Araştırılması" Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Kıvak, T., (2012). " Kesici Takımlara Uygulanan Kriyojenik İşlemin Ti-6Al-4V Alaşımının Delinebilirliği Üzerindeki Etkilerin Araştırılması" Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Kurt, B., (2005). "Ti6Al4V Alaşımı İle Farklı Tip Paslanmaz Çeliklerin Difüzyon Kaynağı" Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Perçin, M., Aslantaş, K., Ucun, İ., Kaynak, Y., Çiçek, A., (2016). " Micro-drilling of Ti-6Al-4V alloy: The effects of cooling/lubricating" *Precision Engineering,*45, 450-462.

Pereira, O., Català, P., Rodríguez, A., Ostra, T., Vivancos, J., Rivero, A., López de Lacalle, L.N., (2015). "The use of hybrid CO2+MQL in machining operations" *Procedia Engineering*, 132, 492-499.

Priarone, P.C., Robiglio, M., Settineri, L., ve Tebaldo, V., (2014). "Milling and turning of titanium aluminides by using minimum quantity lubrication" *Procedia CIRP*, 24, 62-67.

Sarıkaya, M., (2014). " Kobalt Esaslı Haynes 25 Süper Alaşımın İşlenebilirliğinin İncelenmesi" Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Shakeel Ahmed, L., Govindaraju, N., Pradeep Kumar, M. (2016). "Experimental Investigations on Croyogenic in the Drilling of Titanium Alloy" *Materials and Manufacturing Processes,* 31:5, 603-607.

Shakeel Ahmed, L., Pradeep Kumar, M., (2016). " Cryogenic Drilling of Ti-6Al-4V Alloy Under Liquid Nitrogen Cooling" *Materials and Manufacturing Processes,* 31:7 951-959.

Sharma, V.S., Doğra, M., Suri, N.M., (2009). "Cooling techniques improved productivity in turning" *International Journal of Machine Tools and Manufacturing Processes,* 22:1, 45-50.

Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S.T., Imani-Asrai, R., (2012). "An inital study of the effect of using liquid nitrogen coolant on the surface roughness of Inconel 718 nickel-based alloy in cnc milling" *Procedia CIRP*, 3, 121-125.

Stephenson, D.A., Agapiou, J.S. (2006). "Metal Cutting Theory and Pratice" *CRC Taylor and Francis,* USA.

Su, Y., He, N., Li, L., Li, X., (2006). "An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in hgh speed end milling of Ti-6Al-4V" *Wear*, 261:760-766.

Tian, Y.S., Chen, C.Z., Chen, L.B., Chen, L.X., (2006). "Study on the microstructure and wear resistance of the composite coating fabricated on Ti-6Al-4V under different processing conditions" *Appled Surface Science*, 253: 1494-1499.

Uçak, N., (2017). " The Effects of Cutting Conditions on Cutting Temperature and Hole Quality in Drilling of Inconel 718 Using Solid Carbide Drills" M. Sc. Thesis, Yıldırım Beyazıt University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.

Uzun, G., (2013). "Ti6Al4V Titanyum Alaşımında Kılavuz ile Vida Açma Problemlerinin Araştırılması" Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Vagnorius, Z., Sørby, K., (2011). "Effect of high-pressure cooling on life of SiAlON tools in machining of Inconel 718" *Int. J. Adv. Manuf. Technol*. 54, 83–92.

Vazquez, E., Gomar, J., Ciurana, J., ve Rodríguez, C.A., (2014). "Analyzing effects of cooling and lubrication conditions in micro milling of Ti6Al4V" *Journal of Cleaner Production*, 87, 906-913.

Warbuton, P., (1967). "Problems of Machining Nickel-Based Alloys" Iron and Steel Institute, Special Report 94, 151-160.

Yazıcıoğlu, O., (1999). "Makine Elemanları" *Beta Yayınevi*, İstanbul, syf:950-952.

Yılmaz, B., Güllü, A., (2020). "AISI 1050 Çeliğin Tornalanmasında Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Ve Talaş Oluşumu Üzerine Etkilerinin Araştırılması" *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26:4, 628-633.

Yücel. E., Günay. M., Ayyıldız. M., Erkan. Ö., Kara, F., (2011). "Talaşlı İmalatta Kullanılan Kesme Sıvılarının İnsan Sağlığına Etkileri ve Sürdürülebilir Kullanımı" *6th Int. Adv. Technol. Symp*., Elazığ, Turkey, pp. 116–121.

Zhang, S., Li, J.F., Wang, Y.W., (2012). "Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions" *Journal of Cleaner Production*, 32, 81-87.

İNTERNET KAYNAKLARI

1. http://www.agartagroup.com/endustriyel-yaglar/sogutma-sivilari/

2. https://www.sbhmakine.com/yaglama-uygulamasi/klavuz-cekme/

BÖLÜM 5
UÇAK KOLTUĞUNUN YAPISAL ANALİZİ VE TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

Serhat ERDEN[1], Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA[2]
[1]Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul / TÜRKİYE
[2]Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İstanbul / TÜRKİYE

Öz: Sonlu elemanlar yöntemi (FEM), koltuk endüstrisinde ve bunun bir alt kolu olan uçak koltuğu endüstrisinde, özellikle son 10-15 yılda sıkça kullanılan bir yöntemdir. Sonlu eleman analizindeki gelişmeler koltuk sektöründe daha güvenli ve daha ucuz tasarımların oluşturulmasını sağlamıştır. Bu çalışmanın amacı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bir uçak koltuğunun statik analizi ve topoloji optimizasyonunu yapmaktır. Bu yöntemi kullanırken yapılan sonlu elemanlar analizinin doğruluğu son derece önemlidir. Bu nedenle, sonlu elemanlar modeli oluşturulurken, modelin doğru sonucu verebilmesi için bazı önemli parametrelerin doğru seçilmesi ve doğru şekilde modele işlenmesi gerekir. Bu parametreler eleman boyutu, zaman ölçeği, analiz tipi, malzeme modeli olarak sıralanabilir. FEA sonuçlarının doğrulanması genellikle deneysel yöntemler kullanılarak yapılır. Sonlu elemanlar analiz sonuçlarında, yukarıda belirtilen parametrelerin doğru bir şekilde modellenmesi durumunda deneysel sonuçlara hemen hemen eşdeğer olduğu bilinmektedir.

GİRİŞ ve KURAMSAL ÇERÇEVE

Uçak koltuğu, uçakta seyahat eden yolcuların uçuş süresince oturdukları koltuktur. Uçak koltukları genellikle uçakta koltuk rayları üzerinde sıra sıra olarak konumlandırılır. Uçak koltukları için bazı temel özellikler vardır. Bu özellikler iki kategoride sınıflandırılabilir: Koruma sağlama ve oturmayı sağlama. Bu iki ana özelliğin alt kategorileri vardır. Oturmaya imkan sağlama özelliği altında iki alt kategori bulunmaktadır: Konfor ve ortopediyi bir arada sağlayan uzun süreli oturma ve yolculuklarda eğlenceyi de kullanıcıya LCD ekranlar vasıtasıyla sunan bir oturma deneyimi gibi. Diğer ana özelliğin alt kategorileri ise taksi, kalkış ve iniş (TToL) sırasında güvenlik, koltuk malzemesinin yangına dayanıklılığı ve acil

çıkış için uygunluk olarak sıralayabiliriz Şu anda kullanımda olan bazı uçak koltuğu türleri şu şekildedir; ekonomi sınıfı, premium ekonomi sınıfı, business class ve first class uçak koltukları. Listelenen bu koltuklar, koltuk fiyatı, bilet fiyatı gibi temel ücret miktarına bağlı olarak değişen bazı özelliklere sahiptir. Bu özelliklerden ilki iki koltuk arasındaki (diz mesafesi) mesafedir. Bunlara ek olarak bu koltuklarda monitör boyutu, koltuk süngeri kalitesi, koltuk yatma açışsı gibi bazı özellikler farklılık göstermektedir (URL-1).

Bu çalışmada, statik analiz ve topoloji optimizasyonu gerçekleştirmek için ekonomi sınıfı bir koltuk seçilmiştir. Çünkü ekonomi sınıfı koltuklar endüstriyel anlamda en çok kullanılan ve pazarda en fazla paya sahip olan koltuklardır. Bu kapsamda öncelikle statik analiz için gerekli olan koltuk modeli oluşturulacak ve ardından bu koltuk için topoloji optimizasyonu yapılacaktır.

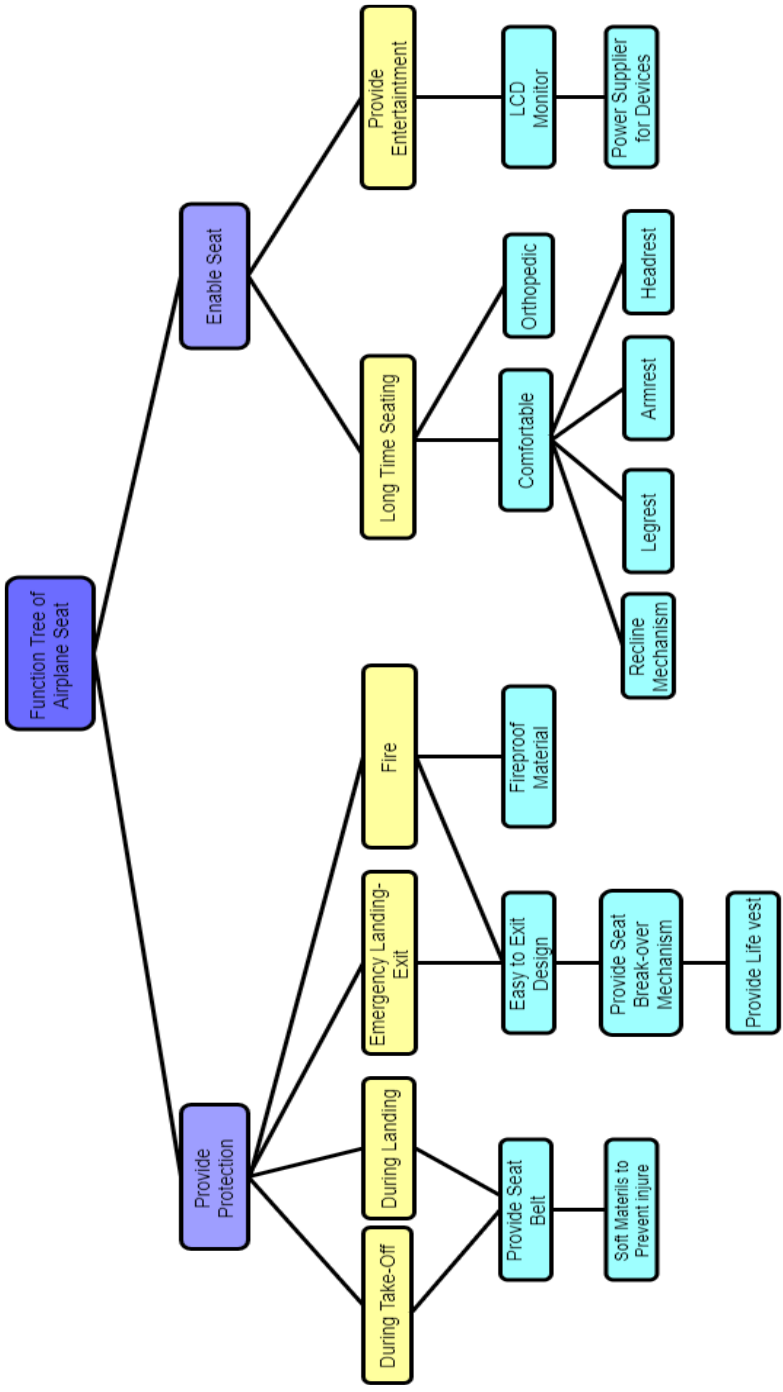
Son olarak, bu çalışmada kullanılan ekonomi sınıfı koltuğun bilgisayar destekli çizim (CAD) modeli, bu çalışmada kullanılmak üzere TSI Aviation Seats Company tarafından sağlanmıştır.



Şekil 1. TSI Seats Firmasının Epianka Model Ekonomi Sınıfı Koltuğu



Şekil 2. TSI Seats Firmasının Royalux Model Business Class Koltuğu



Şekil 3. Uçak Koltuğunun Fonksiyon Ağacı

Literatür taraması

Bu çalışma yapılırken bazı kitaplar havacılık otoritelerinin belirlediği standartlar referans olarak kabul edilmiştir. Bu alanda bazı temel havacılık otoriteleri vardır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir; European Aviation Safety Agency (EASA), Federal AviationAdministration (FAA) ve Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü(SHGM).

Ayrıca bu çalışmada yapılacak olan yapısal analiz ve onun alt basamakları(geometri temizleme, çözüm ağı oluşturma, model kurulumu ve çözüm) için kullanılacak programa karar verşlmesi gerekiyordu. Şu an mevcut durumda bu işlemleri yapabilen birçok sonlu elemanlar yöntemi paket programı mevcuttur. Ancak bu çalışmada statik analiz bölümü için Hyperworks paket programının araçları olan Hypermesh ve Optistruct, topoloji optimizasyonu bölümü için de ANSYS Workbench paket programı kullanılmıştır.

Son yıllarda her sektörde olduğu gibi havacılık sektöründe de sonlu elemanlar analizinin kullanımı artmıştır. Havacılık standartlarının getirdiği şartları sağlamak için yapılan çalışmalarda, şirketler üretim aşamasına geçmeden bir tasarım doğrulama aşamasına ihtiyaç duymaktadır. Daha önceleri, bu doğrulama aşaması prototip üretiminin ardından yapılan test ile sağlanırken bu sistem zaman içinde dijital platformlar üzerine taşınarak simülasyon çalışmaları ile sağlanmaya başlandı.

Bu alanda daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde;

2013 yılında Prasannakumar BHONGE tarafından yapılan bir çalışmada uçak koltuğunun statik ve dinamik test koşullarının sonlu elemanlar analizi ile doğrulanması üzerine çalışılmıştır. Bu çalışma neticesinde statik ve dinamik analiz koşullarını simüle edecek sonlu elemanlar analiz modelleri kurulmuş ve uçak koltuğunun yapısal dayanımı fiziki test yapılmadan bilgisayar ortamında test edilmiştir (Bhonge,2008).

Ferruh DÜVENCİ tarafından yapılan benzer bir çalışmada, araç yolcu koltuğu ayağında farklı malzeme kullanımının etkisi sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda mevcutta kullanılan malzeme yerine yoğunluğu daha düşük ve birim fiyatı daha az bir malzeme kullanılarak da gereken mukavemet ulaşılabileceği anlaşılmıştır. Yine bu çalışma da sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılarak bilgisayar ortamında yapılmıştır (Düvenci, 2017).

2007 yılında PJ García NIETOA ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada bir otomobil koltuğunun sırtlık (backrest) kısmının analizi gerçekleştirilmiş-

tir. Yapılan bir çok analiz sonucunda gerekli mukavemet değerleri içerisinde kalınarak daha hafif ve optimum sayılabilecek bir tasarım elde edilmiştir. Çalışma sonuçlarından elde edilen bilgilere göre koltuk çerçevesi 9,135 kilogramdan 8,289 kilograma düşürülerek %9,16 ağırlık düşüşü sağlanmıştır.

2016 yılında M. R. SHIVAKUMAR ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, sürücü koltuğunda oturan kişinin konforuna etki eden faktörler sonlu elemanlar analizi yöntemi ile ele alınmıştır. Çalışmanın temel amacı, regülasyonların dışına çıkmadan sürücü koltuğunda oturan kişinin maksimum konforu yakalamasıdır. Çalışma neticesinde elde dilen sonuçlara göre, maksimum sürücü konforu 5 kPa sünger direngenliği ve 6mm*3mm koltuk ızgara teli kullanımında elde edilmiştir. Bu çalışma; koltuk yapısı, yolcu ve çevre ortamının sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmesi prensibi yapılmış ve sürüş sırasında yolcuya gelen yükler belirlenerek sonuçlar elde edilmiştir (Shivakumar, 2016).

2007 yılında A. SIEFERT ve arkadaşları tarafından yapılan başka bir çalışmada, koltuğun statik ve dinamik etkilerinin oturma konforu üzerindeki etkileri incelenmiş ve bunu etkileyen faktörler sanal olarak optimize edilmeye çalışılmıştır. Çalışma sonucunda aşağıdaki bulgular sıralanmıştır;

Sanal optimizasyon sayesinde,

1) Pahalı ve geç tasarım değişikliklerinden kaçınılabilir,

2) Koltuk yapısı ve koltuk bağlantılarının optimizasyonu sağlanabilir,

3)Analizler test aşamasına paralel olarak yapıldığından istenmeyen durumlarla karşılaşıldığında erken modifikasyon olanağı sayesinde test maliyetlerinde azalma sağlanabilir (Siefert, 2008).

Şeyda S. Aydıner tarafından 2018 yılında yapılan bir başka çalışmada yolcu koltuğu ayağının sonlu elemanlar yöntemi ile optimizasyonu üzerine çalışılmıştır. Çalışmanın temel amacı, farklı tasarım ürünlerini fiziksel testlerden önce değerlendirmek ve mevzuata uygun en ekonomik ve nihai tasarımı belirlemektir. Bu kapsamda koltuk bağlantı ayakları için farklı tasarımlar sonlu elemanlar analizi ile denenmiş ve optimum tasarıma ulaşılmaya çalışılmıştır. Yine bu çalışma sonuçlarına göre, bir otobüsün yolcu koltuğu ayağı için yapılan topoloji optimizasyonu çalışması sonucunda koltuk ağırlığında% 3'lük bir azalma sağlanmıştır (Aydıner, 2018).

2008 yılında Wichita State Üniversitesi'nden Prasannakumar BHONGE ve Hamid LANKARİNİ tarafından yapılan çalışmada, FEM yöntemi ve bilgisayar doğrulaması kullanılarak uçak koltuğu için dinamik testlerin SAE ve FAE yönetmeliklerine uygunluğunun doğrulanması üzerine çalışılmıştır. Çalışmanın temel

amacı koltuk doğrulama testlerinin fiziksel olarak değil bilgisayar destekli modeller kullanılarak yapılmasının mümkün olup olmadığını araştırmaktır. Çalışma sonucunda FEA sonuçlarının test sonuçları ile paralelliğine dikkat çekilirken, bu yöntemin ileride geliştirilmesi gerektiğine dair bazı noktalara dikkat çekilmiştir. Bu noktalar aşağıdaki gibidir;

1) Dummy(insan maketi) validasyonu

2) Malzeme özellikleri

3) Başlangıç ve sınır koşulları (Bhonge, 2008).

2006 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nden Artanç BULGUR tarafından yapılan çalışmada, ilk hız koşulları ve dummy etkisi ile çarpışma testi sırasında koltuk bağlantı elemanlarının simülasyonu üzerine çalışılmıştır. Ansys ve LS-Dyna programlarının kullanıldığı simülasyonlarda, koltuğun dinamik test koşullarındaki durumu simüle edilmiştir. Analiz, tez yazarının bilgisayar donanımı eksikliğinden doğrusal olarak yapılmış ve analiz sonuçlarında deformasyonlar değil, sadece kuvvet değerleri incelenmiştir. Analizi yapılan koltuğun test verisi olmadığı için, analiz sonuçları benzer koltuklarda yapılan analizlere değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler sonucunda analiz sonuçlarının mantıklı mertebelerde olduğu belirtilmiş ve fiziksel testler yerine bilgisayar destekli simülasyonların kullanılabileceğine değinilmiştir (Bulgur, 2006).

İstanbul Teknik Üniversitesi bünyesinde 2019 yılında Güney GÖRGÜN tarafından yapılan çalışmada, uçak koltuk sırtlığının kompozit malzeme ve sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılarak modellenmesi ve analizi üzerine çalışılmıştır. Çalışmanın temel amacı kompozit malzeme kullanılarak yapılan koltuğu hafifletmek ve uçuş maliyetlerini düşürmektir. Çalışma sonucunda sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulanan mukavemet değerlerine göre kompozit malzemeler kullanılarak 300 koltuklu bir uçak için 135-153 kilogramlık ağırlık azalmasına gidilebileceği belirtilmiştir. Aynı çalışmada, havayolu şirketlerinin 1 kilogramlık uçuş ağırlığı için bir yıllık yakıt giderinin 130-150 $ civarında olduğu vurgulanarak ve bu çalışmada yapılan ağırlık azaltma işleminin finansal önemi belirtilmiştir (Görgün 2019) .

Literatür çalışması sonucunda koltuk sektöründe daha önce sonlu elemanlar analizi yöntemi yapılan çalışmalar incelenmiştir. İncelemeler sonucunda, yapılan yapısal analiz ve topoloji optimizasyonu çalışmalarının olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Bunlara ek olarak bu çalışmada izlenecek metodoloji ile ilgili fikirler elde edilmiştir.

Çalışmanın amacı

Sonlu elemanlar analizlerinde meydana gelen gelişmeler havacılık sektöründe kullanılan koltuk ve diğer kabin içi parçaların dizayn ve simülasyon aşamalarının daha ekonomik ve doğru yapılabilmesine katkı sağlamıştır. Bu anlatılanlar kapsamında, bu çalışmada ekonomi sınıfı bir uçak koltuğunun statik analizi ve topoloji optimizasyonu yapılacaktır. Yapılacak olan bu analiz ve topoloji optimizasyonu çalışması 4 temel aşamada incelenebilir;

1. Analiz sonucu elde edilen gerilme değerleri ile malzemenin akma mukavemetinin kıyaslanması

2. Maksimum deformasyon miktarı ve lokasyonlarının kontrol edilmesi

3. Topoloji optimizasyonu çalışması sonucunda optimum geometrinin elde edilmesi ve uçağın uçuş ağırlığının azaltılması

4. Koltuğun havacılık standartlarıyla olan uyumunun kontrolü

SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Sonlu elemanlar analiz metodolojisi

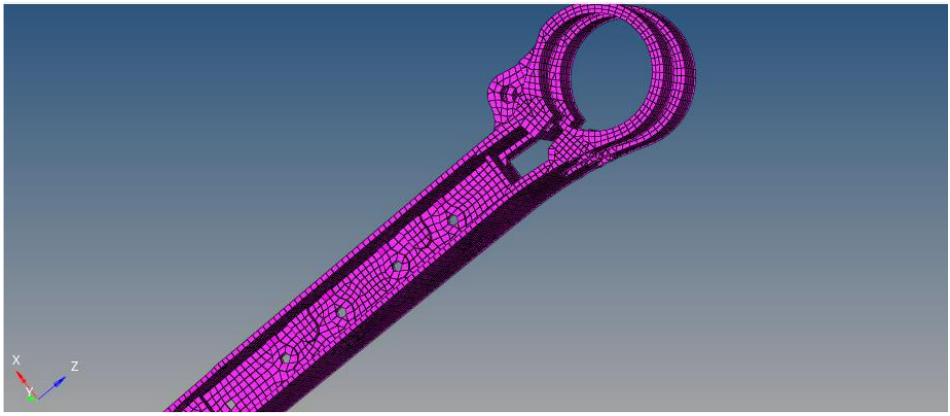
Sonlu Elemanlar Yöntemi, ilk olarak 1956'da uçak gövdelerinin stres analizi için geliştirilmiş ve sonraki yıllarda uygulamalı bilimlerin ve mühendislik problemlerinin çözümü için kullanılmıştır. İlerleyen yıllarda bu yöntemler ve çözüm teknikleri hızla geliştirilerek günümüzde birçok mühendislik probleminin çözümünde kullanılan en iyi yöntemlerden biri haline gelmiştir. Sonlu elemanlar yöntemindeki temel mantık, karmaşık bir problemi basitleştirmek ve çözmektir. Bu yöntemde çözüm bölgesi birkaç basit, küçük, birbirine bağlı, sonlu eleman alt bölgelerine ayrılmıştır. Kısacası çok sayıda düğüm ile birbirine bağlanan parçalara bölünen problemin çözümü rahatlıkla yapılabilmektedir. Örneğin, bir yapısal analizde sonlu elemanlar yönteminin uygulanması şu şekildedir:

- Yapı parçalara ayrılmıştır. (Düğüm noktaları içeren öğelerle)
- Her öğe için fiziksel boyutların davranışı tanımlanır.
- Elemanlar düğüm noktaları aracılığıyla birbirine bağlanır ve tüm yapı için yaklaşık bir denklem sistemi oluşturulur.
- Düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerler için sistem denklemleri çözülür. (Örneğin, deformasyon)
- Seçilen elemanların istenen değerleri hesaplanır. (Örneğin stresler) (Hutton, 2004).

Sonlu elemanlar analizini yaparken sistemi mesh denen küçük parçalara böleriz ve meshler düğüm denilen köşelerde birbirine bağlanır. Mesh sayısı, modele ve analizin beklenen doğruluğuna göre değişmektedir. Sonlu eleman modelleri

kullanılırken farklı tipte ağ yapıları kullanılır. Bazıları solid mesh, shell mesh olarak sıralanabilir. Bu çalışmada solid mesh ve shell mesh türleri kullanılmıştır. Bu mesh tipleri seçilirken meshlenecek parçanın ölçüleri dikkate alınır. Parça kalınlığı düşük ve kalınlık ile diğer ölçüler arasındaki fark yüksek ise shell tip mesh kullanılır. shell mesh ağ, malzemenin kalınlığını yokmuş gibi kabul eder ve yalnızca düzlemsel ağ sağlar. Ancak modelin doğru yapılandırılması için parça kalınlığı programda tanımlanır. Bu şekilde tanımlandığında, kabuk tipi mesh kullanan parçalar, mesh ekranında 2D ve geometri ekranında 3D olarak görüntülenir. Başka bir mesh tipi olan katı mesh, parçayı doğrudan küçük parçalara bölerek ağı tanımlamak için kullanılır. Bu sayede meshlenecek kısım 3 boyutlu olarak küçük parçalara bölünür. Bu mesh tipini kullanacak parçaları seçerken dikkat edilmesi gereken bazı noktalar vardır. Bunlardan biri, katı meshin kullanılacağı parçanın boyutları arasında göreceli olarak büyük farkların olmamasıdır.

Sonlu eleman analizinde, ağ ile ilgili dikkate alınması gereken bir diğer faktör, ortalama eleman kalitesidir. Sonlu eleman analizinin yapıldığı programda bu değer mesh işlemi bittikten sonra gözlemlenebilir. Ortalama mesh kalitesinin %80 ve üzerinde olması, sonlu elemanlar analizinin doğru sonuca dönüştürülmesi için gerekli koşullardan biridir. Ortalama eleman kalitesinin %80'den düşük olduğu modellerde, sonuçların doğruluğunu artırmak için mesh iyileştirme işlemleri uygulayarak ortalama eleman kalitesini artırmaya çalışmak gerekebilir. Bu çalışmada kullanılan ağın ortalama eleman kalitesi %87 civarındadır. Bu oran, doğru sonuçlara yakınsamak için yeterlidir. Sonlu eleman analizi yöntemini kullanarak bir çözüm oluştururken dikkate alınması gereken önemli faktörlerden biri ağ boyutudur. Kullanılan ağ boyutu, model analiz edildiğinde doğru modelin sonuca yakınsaması için önemlidir. Mesh boyutu küçüldükçe, model daha küçük parçalara bölündüğünden kullanılan eleman sayısı artacaktır. Mesh sayısı arttığında analiz sonuçlarının doğruluğu da artar. Ancak bu durum çözüm süresini arttırır ve çözüm süresinin artması da maliyetlerin artmasına neden olur. Dolayısıyla, ağ sayısı ile çözüm süresi arasında bir mühendislik optimizasyonu yapılmalıdır. Bu çalışmada çözüm için kullanılan ağ boyutu, modeldeki parçalara bağlı olarak ortalama 3-4 mm civarındadır. Ayrıca bu çalışmada incelenen modelde kullanılan toplam mesh sayısı 333185'tir.



Şekil 4. Koltuk Ayağı İçin Yapılan Solid Mesh Çalışması

Statik analiz

Statik analiz; önceden oluşturulmuş bir CAD datasının sonlu elemanlar programı yardımıyla geometri temizleme, meshleme, modelleme aşamalarında sonucunda oluşturulan modele statik yük değerleri uygulayarak ve gerekli sınır koşullarını girerek yapılan analiz şeklidir.

Bu tip analizlerde genel mantık, zaman değişiminin sonuçlar üzerinde etkisi olmadığı görüşüne dayalıdır. Bu analiz tipinde, girilen sınır koşulları ve yükleme koşullarına göre sonlu elemanlar programı çözüme yakınsar. Çözüm neticesinde ise kullanıcı yapıda meydana gelen deformasyonları ve gerilme dağılımlarını gözlemleyebilir.

Genel anlamda 2 tip statik analiz vardır. Bunlar lineer statik analiz ve non-lineer statik analiz tipleridir. Lineer analiz çözümlemesi yapılırken bazı şartların sağlanması gerekir. Bunlar şu şekildedir;

- Lineer geometri
- Lineer malzeme özellikleri
- Lineer kontak yapısı
- Titreşimsiz yapı

Bir sistemde uygulanan kuvvetler ve deformasyonlar arasında lineer bir ilişki yoksa bu sisteme non-lineer sistem denir. Bu tür sistemlerin analizine non-lineer analiz denir. Bu non-lineerliğin bazı nedenleri vardır. Bunlar geometrik non-lineerite, malzeme non-lineeritesi ve kontak yapısı olarak sıralanabilir (Dede, 2016).

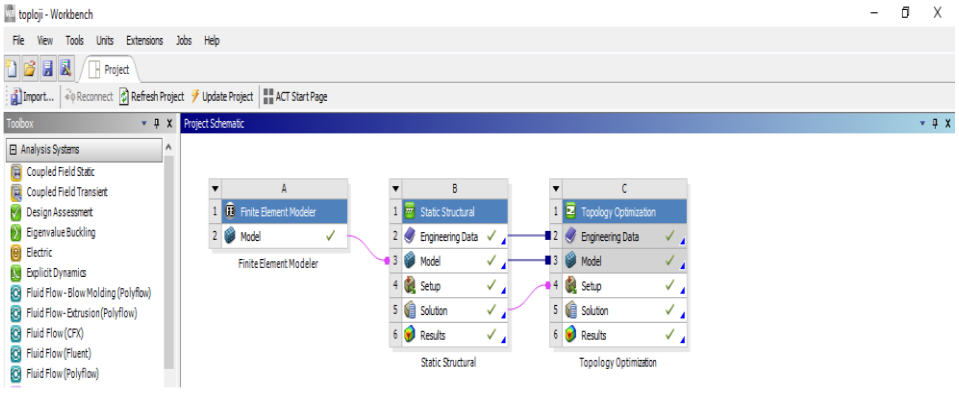
Bu çalışmada lineerliği bozan bazı durumlar olduğu için non-lineer analiz tipi kullanılmıştır. Bu durumlardan bazıları şunlardır; kontaklardaki statik sürtünme durumu, malzeme non-lineeritesi, cıvatalara uygulanan ön gerilme olarak sıralanabilir. Non-lineer statik analiz sayesinde farklı yükleme koşullarında koltukta

meydana gelen deformasyonları ve kuvvet dağılımlarını gözlemleyebiliriz. Bu durum tasarlanan CAD modelinin istenilen mukavemet değerlerine sahip olup olmadığı konusunda bize fikir verir. Bu sayede prototip aşamasına geçilmeden muhtemel geometri hataları öngörülüp hatalar giderilebilir.

Topoloji optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu, belirlenen sınır şartlarına ve belirtilen amaç fonksiyonuna göre oluşturulmak istenen model için optimum geometriye ulaşmamızı sağlayan bir araçtır. Topoloji optimizasyonu sayesinde, tasarlanan modellerde malzeme tasarrufu sağlanabilir ve ayrıca tasarlanan model minimum ağırlıkta kalır (Altair University, 2014).

Bu çalışmada üzerine çalışılan yapı uçak koltuğu olduğu için ağırlık çok önemli bir noktadır. Çünkü ağırlık, havacılık sektöründe istenmeyen bir özelliktir. Bu nedenle bu çalışmada topoloji optimizasyonu çalışması yaparak koltuk dayanımını düşürmeden ağırlığını azaltmaya çalışacağız.



Şekil 5. Topoloji Optimizasyonu Modeli (Ansys Programı)

Analiz programlarında yapılan topoloji optimizasyonu sonucunda, taslak modelin gereksiz kısımları mavi renkte gösterilerek daha düşük gerilim değerini ifade etmektedir. Bu gereksiz bölümler daha sonra tasarımcı tarafından kaldırılır ve yeni bir model oluşturulur. Yeni model oluşturulduğunda, taslak model ile yeni model arasındaki hacim, ağırlık ve malzeme miktarı gibi değişiklikler hakkında yorum yapmak mümkündür. Ek olarak, sadece analiz programında görülen rakam sayesinde değişimin yaklaşık bir tahminini yapmak mümkündür. Bu çalışmada gizlilik adına taslak verilerde değişiklik yapma hakkı sadece TSI Aviation Seats'e ait olduğundan, topoloji optimizasyon çalışmasından sonra taslak CAD verilerinde herhangi bir değişiklik yapılmayacaktır. Bu durum çalışmanın yukarıda belirtildiği gibi tamamlanmasına engel olmayacaktır.

PROBLEMİN TANIMI

Problemin anlatımı

Bir ürünü tasarlarken oluşturulan ilk CAD modeli üretilen ilk prototip değildir. Çünkü prototip maliyetleri yüksektir ve ekonomik bir tasarım üretebilmek için bunu olabildiğince azaltmak gerekir. Bu amaca ulaşmak için, önceden üretilmiş bir CAD modeli CAE simülasyon programları yardımıyla analiz edilir. Ayrıca bu paket programlar kullanılarak üretilecek ürünün ağırlık ve malzeme optimizasyonları yapılabilmektedir. Bu çalışmada, bir uçak koltuğu için statik analiz ve topoloji optimizasyonu üzerinde çalışılmıştır. Çalışmanın temel amacı, FEA programlarını kullanarak prototip üretmeden önce CAD modelini yüksek doğrulukla doğrulamak ve uçak koltuğunun daha rekabetçi ve ekonomik bir tasarıma sahip olmasını sağlamak için topoloji optimizasyon yöntemi ile ağırlığı azaltmaktır. Doğrulama sırasında programdan elde edilen gerilme değerleri, malzemelerin akma dayanımı ve havacılık otoritelerinin talep ettiği gereksinimler dikkate alınmıştır.

Malzeme seçimi

Malzeme seçimi, bir tasarım için önemli adımlardan biridir. Çünkü tasarlanacak sistemin mukavemeti, maliyeti, ağırlığı ve daha birçok özelliği malzeme seçimine bağlı olarak değişecektir. Doğru malzemeyi seçebilmek için sistemin yerine getirmesi gereken gereksinimleri bilmek gerekir.

Bu çalışmada, koltuğun oturma tabanı(seat base) ve yayıcısı(spreader) için Al7075 T651 alüminyum alaşım, koltuk çerçevesi(seat frame) için ise Al6082 T651 alüminyum alaşım seçilmiştir.

Alüminyum, yoğunluğu düşük olduğundan tasarımcıya hafif çözümler sunar. Bu nedenle havacılık sektöründe sıklıkla kullanılan bir malzemedir. Ayrıca malzeme araştırmalarında alüminyumun gerekli dayanım koşullarını sağladığı tahmin edilmiştir. Ayrıca plastik parçalar için SHE_PCABS_T85 malzemesi kullanılmıştır. Bu modelde parçaların çoğu metal olmakla birlikte, oturma tavası(seat pan) ve kelepçe gibi yük taşıma gerektirmeyen kısımların bir kısmı plastiktir. Bu kapsamda kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri aşağıdaki gibidir (Kelleci, 2020).

Tablo 1. Alüminyum 6082 T651'in Mekanik Özellikleri

Mechanical Properties	Metric
Hardness, Vickers	-
Tensile Strength, Ultimate	238 MPa
Tensile Strength, Yield	41 MPa
Elongation at Break	160 %

Tablo 2. Alüminyum 7075 T651'in Mekanik Özellikleri

Mechanical Properties	Metric
Hardness, Vickers	175
Tensile Strength, Ultimate	572 MPa
Tensile Strength, Yield	503 MPa
Elongation at Break	9.0 %

Tablo 3. Plastik SHE_PCABS_T85'in Mekanik Özellikleri

Mechanical Properties	Metric
Hardness, Vickers	95
Tensile Strength, Ultimate	290 MPa
Tensile Strength, Yield	250 MPa
Elongation at Break	10.0 %

Tablo 4. Alüminyum 6005 T6'nın Mekanik Özellikleri

Mechanical Properties	Metric
Hardness, Brinell	85 HB
Tensile Strength, Ultimate	270 MPa
Tensile Strength, Yield	225 MPa
Elongation at Break	9.0 %

Tablo 5. AW 2024 T3'Ün Mekanik Özellikleri

Mechanical Properties	Metric
Hardness, Brinell	-
Tensile Strength, Ultimate	536 MPa
Tensile Strength, Yield	370 MPa
Elongation at Break	16.7 %

Tablo 6. AISI Tip 304 Paslanmaz Çeşliğin Mekanik Özellikleri

Mechanical Properties	Metric
Hardness, Brinell	123
Tensile Strength, Ultimate	505 MPa
Tensile Strength, Yield	215 MPa
Elongation at Break	70.0 %

Sınır koşulları, bir modeli veya bu kuvvetlerle ilişkili deformasyonları çözmek için gereken kuvvetlerdir. Sınır koşulları, bir model oluştururken bilinen değerler arasındadır. Bu şartlar sayesinde kullandığımız çözüm aracı analizi yaparak sonuçlara ulaşmaktadır. Bir FE modeli oluştururken, önce mesh modelini oluşturuyoruz, ardından kontakları tanımlıyoruz, devamında sınır koşulları eklenir [15]. Bir uçak koltuğu için statik FE analizinde, koltuğun tabanının sabit olduğunu varsayıyoruz, bu, onu analizde sabit bir destek olarak tanımladığımız anlamına gelir. Ayrıca uçak koltuğu farklı bileşenlerden oluşur, bu nedenle aralarındaki kontaklar tanımlamamız gerekir. Hypermesh'te birkaç kontak türü vardır ve modele uygun olan kontak türünü seçeriz. Modelimizde, modeli tanımlamak için üç tip kontak vardır. Birincisi, shell to shell; bu kontak, Shell parçaların birbirine temasını tanımlamak için kullanılır ve shell parçalar arasındaki boşluk, parça kalınlığına göre tanımlanır. İkinci tip kontak ise solid to solid kontaktır. Bu kontak tipi katı cisimle bir diğer katı cismin arasındaki etkileşimi tanımlamak için kullanılır. Sonuncu kontak tipi ise solid to shell kontak tipidir. Bu kontak tipi ise solid parçalarla shell parçalar arasındaki etkileşimleri modellemek için kullanılır. Bu kontak tipinde de tanımlanan boşluk miktarı shell parçanın kalınlığına göre belirlenir (URL-2).

Bu çalışma kapsamında hazırlanan sonlu eleman modelindeki sınır koşulları şu şekilde incelenebilir;

1) Koltuğun ön ve arka ayaklarına verilen kısıtlar sayesinde uçağa sabitlenen koltuk kısımları programa dahil edilir.

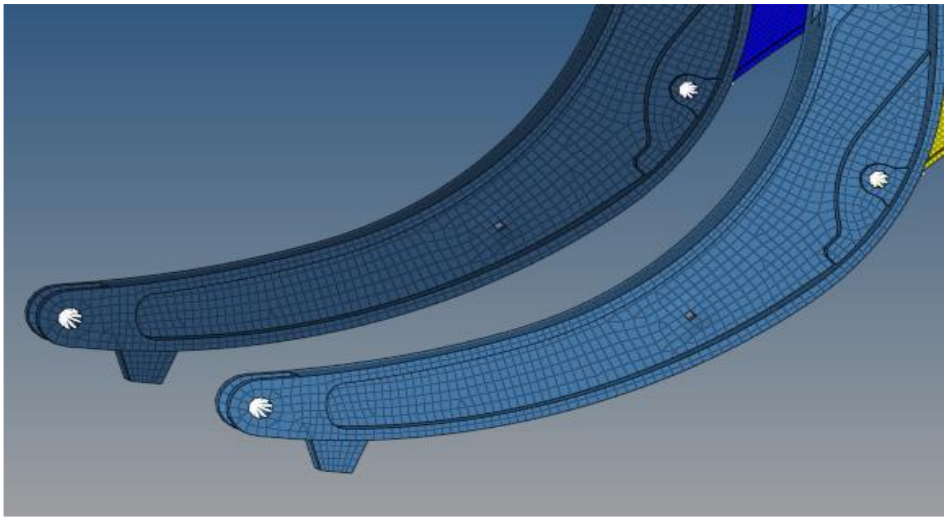
2) Parçalar arasında tanımlanan kontaklar sayesinde koltuk bölümleri arasında gerçek durumda oluşacak etkileşim modele tanımlanır. Bu kontak türlerinden en çok kullanılanı, solid to node türüdür. Ayrıca bunlar ve diğer kontak tipleri tanımlanırken statik sürtünme özelliği aktif hale getirilerek statik sürtünme katsayısı 0,2 olarak alınmıştır. Bu kontak tipinin kullanıldığı başlıca yerler şunlardır:

• Yayıcılar ve yayıcı kiriş parçaları arasında

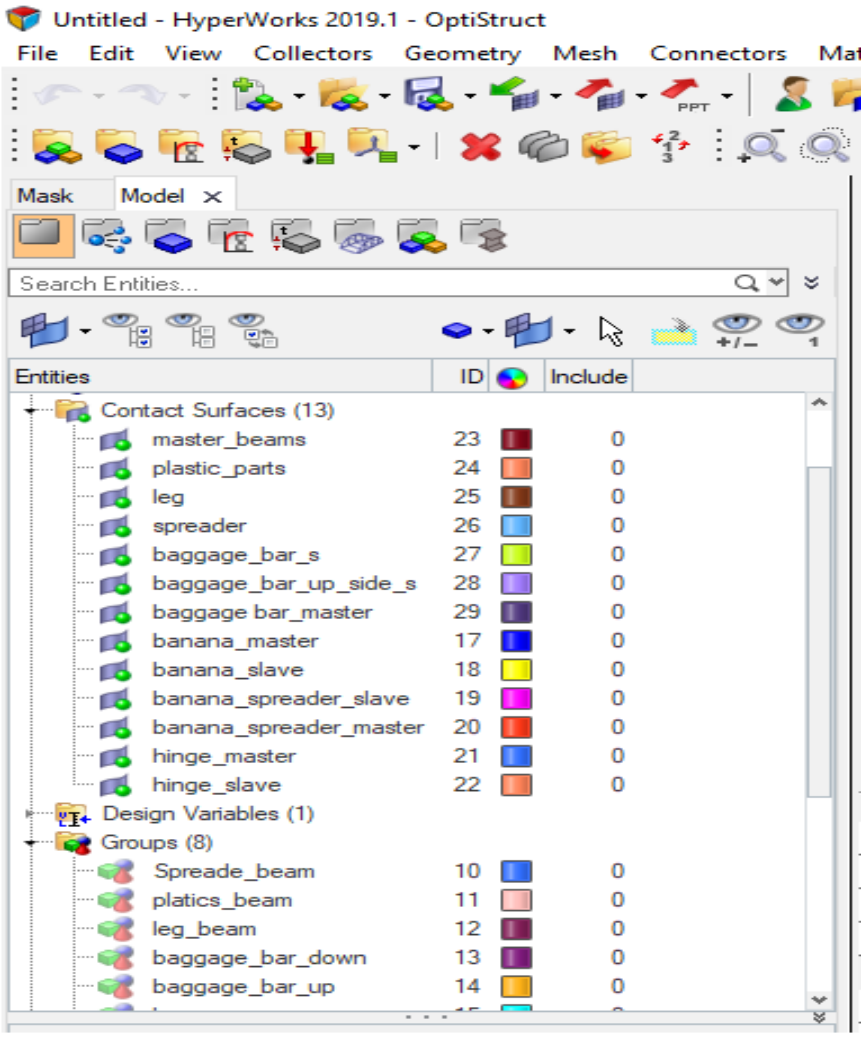
• Yayıcı kirişler ve koltuk ayakları arasında

• Yayıcılar ve seat pan kelepçe halkaları arasında

3) Sabit civata bağlantılı parçalar sabit parça olarak modellenir ve programa tanımlanır.



Şekil 6. Koltuğun Arka Ayaklarında Tanımlanan Sabit Destek ve Cıvata Bağlantısı Sınır Koşulları

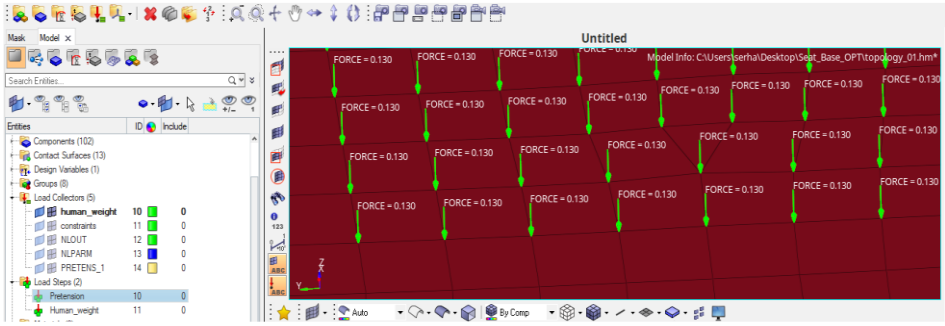


Şekil 7. Bu Çalışmada Kullanılan Bazı Kontaklar

Yükleme koşulları

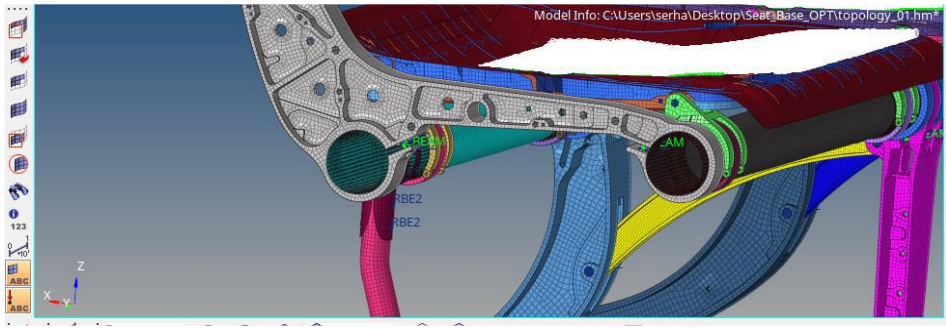
Bu çalışmada, deformasyonları bilmediğimizden, bilinenler olarak yalnızca bir uçak koltuğu için ortalama insan ağırlığı değerleri olan yük değerlerini ekleyeceğiz. Bu değerler havacılık otoriteleri tarafından belirlenir. Bu yükler, modelde yayılı yük olarak tanımlanır. Bu, bir insanın ağırlığının koltuğa eşit olarak dağıldığını varsaymamız anlamına gelir. Bu varsayım, analiz sonuçlarında herhangi bir hataya neden olmaz. Bizim çalışmamızda insan ağırlığı 100 kg olarak alındı ve 3 koltuk için toplam 300 kg ağırlık uygulandı, çünkü koltuk özelliklerine göre maksimum statik test yükü uçak koltuğu için 100 kg tanımlanmıştır. Modelimizde kol-

tuğun ağırlığını analizde gözlemlemek için yerçekimi ivmesini uyguladık. Ek olarak, kesin sonuç için gerekli olan gerçekçi bir model yapmak adına, Hypermesh'te "add mass" özelliğini kullanıldı. Add masss, eksik parçalar için kullanılan bir tekniktir ve sonuçları gerçekçi kılar. Modelimizde yapısal yük dayanımı olmayan ve bu yüzden eksik olan kısımlardan bazıları şunlardır: koltuk minderi, sırtlık, emniyet kemeri (URL-3).



Şekil 8. Nodlara Uygulanan Yayılı Yük

Ayrıca koltuk kirişleri ve yayıcılar arasında ön gerilmeli cıvata bağlantısı uygulanmıştır.

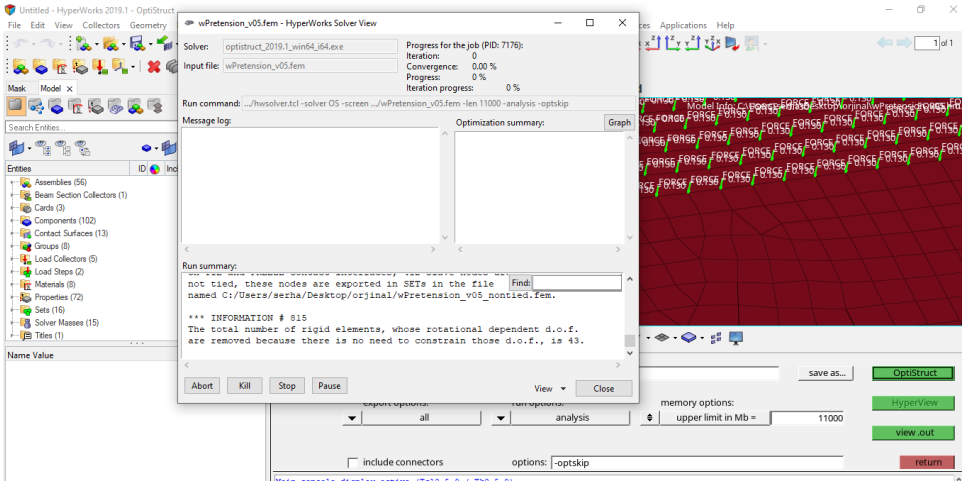


Şekil 9. Ön Gerilmeli Cıvata Bağlantısı

Çözüm aşaması

Bu, problem tanımlama bölümünün son adımıdır. Bu adımda analiz ve çözüm prosedürünün nasıl çözüleceğini açıklayacağız. FEA programları bir algoritma çalıştırır ve bu algoritmaya göre ilk olarak CAD modelini CAD programından CAE programına ekleriz. Daha sonra geometri temizleme çalışmaları yapılır. Bu çalışmalardan bazıları şu şekildedir; küçük delik silme, mid-surface çalışmaları, gereksiz kenar ve yüzey silme vb. Bu aşamaçözüm için gerekli ve uygun bir mesh oluşturmak için gereklidir çünkü birçok modelde geometri meshlemeye uygun değildir.

Devamında, meshlenecek parçaya göre meshleme çalışması yapılır. Bu aşama, sonucun doğruluğu için oldukça önemlidir. Çünkü uygun olmayan mesh yapısı analiz sonuçlarında yanlış gerilme ve deformasyon değerleri vermektedir. Ayrıca, mesh boyutu, sonucun kesinliğini ve doğruluğunu etkilediği için mesh boyutu da önemlidir. Uygun mesh boyutu, analiz edilecek modele, kullanılan bilgisayara ve istenen çözümün hassasiyetine göre değişir. Statik analiz için oluşturulan bu modelde 333185 mesh kullanılmıştır. Daha sonra, sınır koşulları ve yükleme koşulları yukarıda açıklandığı gibi modele uygulanır. Tüm bu çalışmalardan sonra OptiStruct'ta statik analiz modeli koşulur.

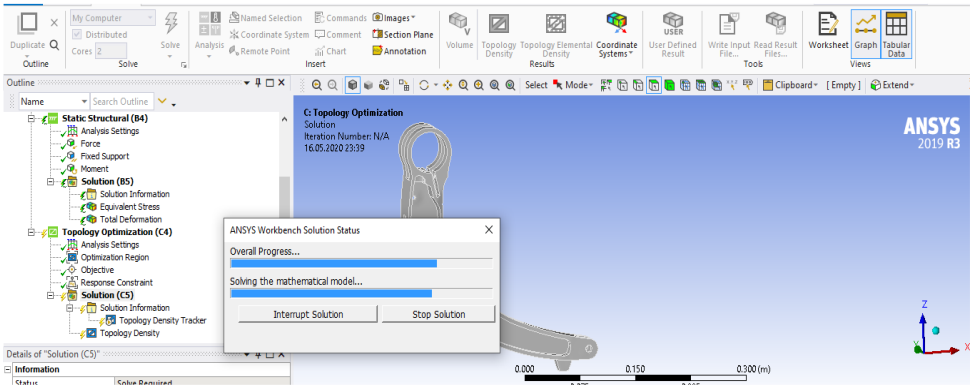


Şekil 10. OptiStruct Çözücüsünün Analiz Ekranı

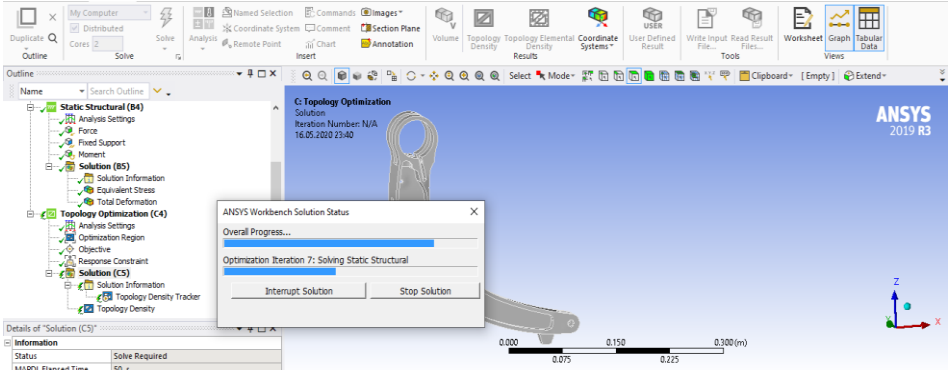
FEA programı tarafından yapılan analiz ve bize sonuçları verir. Analiz süresi, mesh boyutuna, mesh sayısına, kullanılan elemanların türüne, seçilen analiz türüne (lineer veya non-lineer) ve bilgisayarın performansına bağlı olarak değişir. Analiz sonuçlarına göre CAD modelinin mühendislik gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını değerlendirebiliriz. Çözüm süresi, bilgisayarın işlem gücüne ve kurulu modeldeki elemanların sayısına bağlı olarak değişebilir. Ayrıca, kullanılan FEA programına bağlı olarak toplam süre bir miktar değişiklik gösterebilir. Bu çalışmada statik analiz için kullanılan Hyperworks programındaki çözüm yaklaşık 2 saat sürmüştür.

Statik analiz tamamlandıktan sonra topoloji optimizasyonu aşamasına geçildi. Bu aşamada koltuğun arka ayağı için bir model oluşturulmuş ve bu kısım için ağırlık optimizasyonu çalışması yapılmıştır. Topoloji optimizasyon modeli Ansys Workbench programında oluşturulmuştur. Topoloji optimizasyon modeli

oluşturulurken önceki statik analizde hesaplanan kuvvet ve moment değerleri kullanılmıştır. Ayrıca bu model kurulurken daha önce statik analizde kullanılan mesh çalışması kullanılmıştır.



Şekil 11. Ansys Workbench Programında Gerçekleştirilen Statik Analiz Çalışması



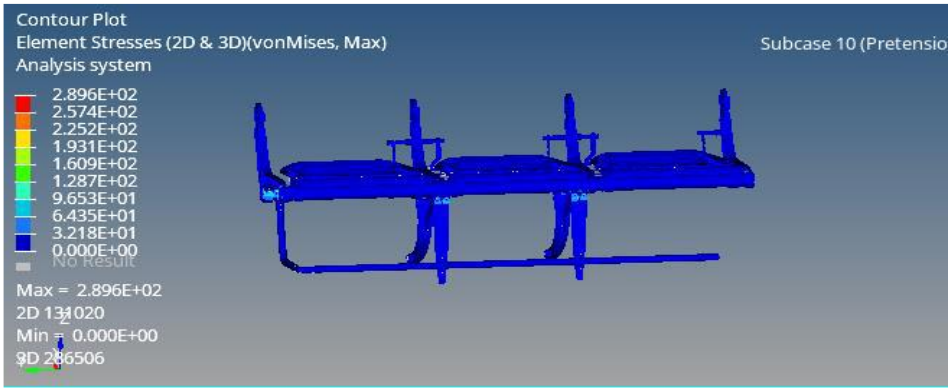
Şekil 12. Ansys Workbench Programında Gerçekleştirilen Topoloji Optimizasyonu Çalışması

Bir önceki sayfadaki şekillerde de görülebileceği gibi, topoloji optimizasyonu yapabilmek için öncelikle statik analizden gelen gerilme değerlerinin bilinmesi gerekir. Bu nedenle kurulan model çalıştırıldığında statik analiz otomatik olarak başlamıştır. Daha sonra topoloji optimizasyonu aşamasına geçildi. Bu aşamanın süresi ve iterasyon sayısına, modelin boyutuna, temas yapılarına ve kuvvetlere bağlı olarak değişir. Bu çalışmada oluşturulan topoloji optimizasyonu modelinde 6189 mesh ve 10308 düğüm(nod) bulunmaktadır.

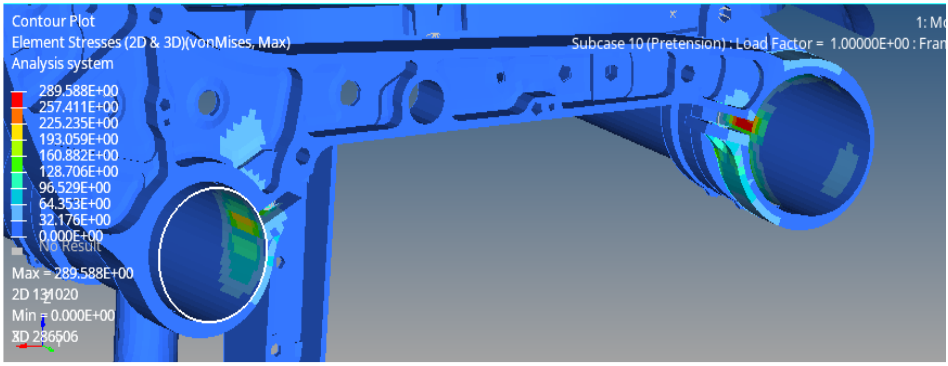
ANALİZ SONUÇLARI

FEM sonuçlarının analizi

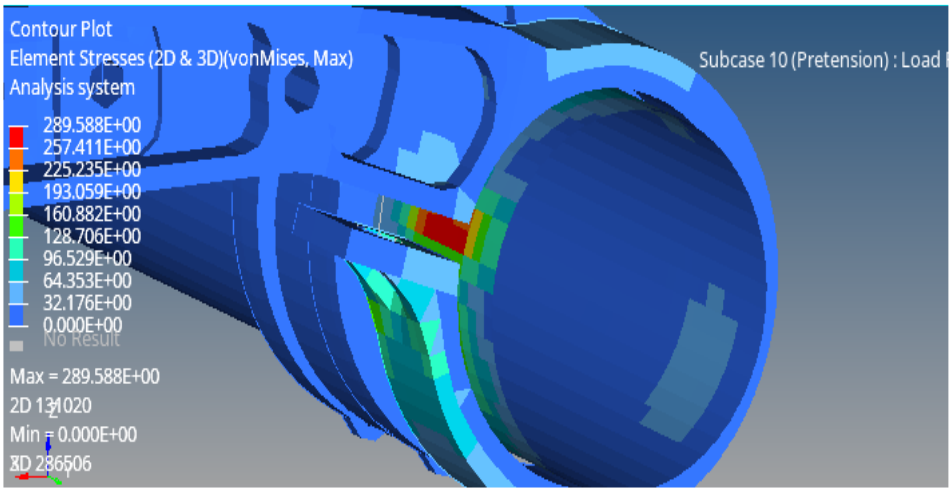
Model kurulduktan sonra birçok denemeden sonra modeldeki hatalar giderildi ve sonuçlar elde edildi. Statik analiz sonucunda elde edilen gerilme ve deformasyon değerleri aşağıdaki şekillerde gösterildiği gibidir.



Şekil 13. Analiz Sonuçlarına Göre Koltuk Ön Görünüşdeki Stres Dağılımları

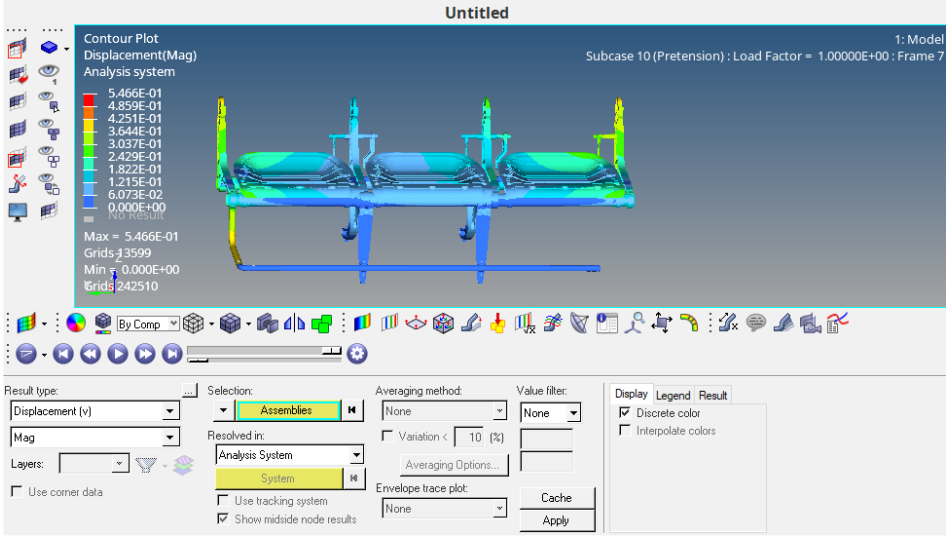


Şekil 14 Analiz Sonuçlarına Göre Koltuk Yan Görünüşdeki Stres Dağılımları

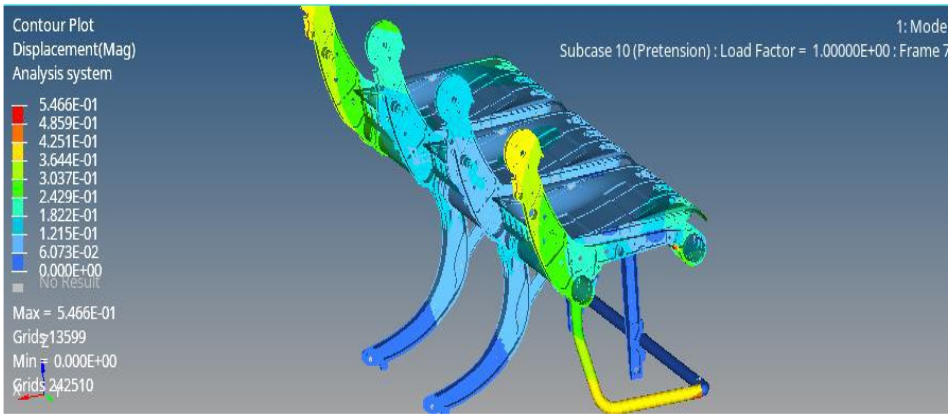


Şekil 15. Analiz Sonuçlarına Göre Yan Görünüşten Detaylandırılmış Stres Dağılım Görünümü

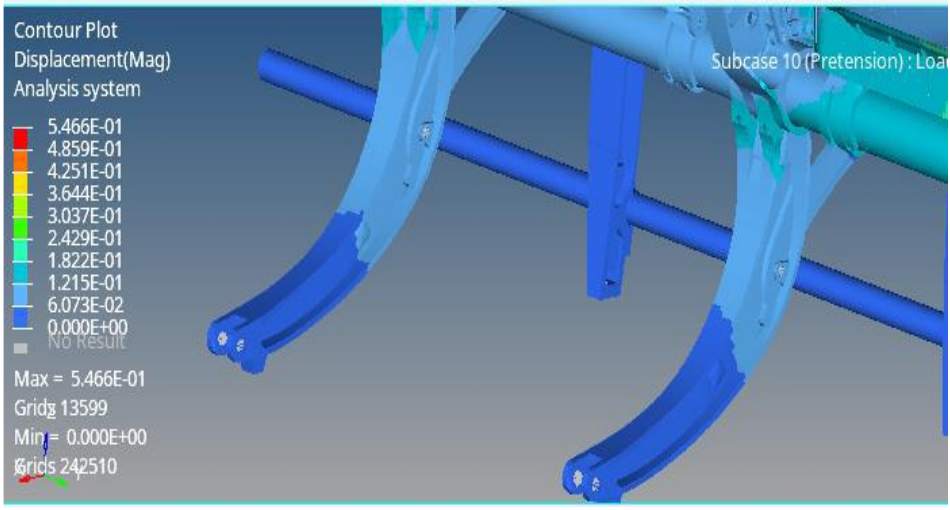
Gerilme ve deformasyon değerleri değerlendirildiğinde genel olarak koltuk yapısında 30-60 MPa civarında değişen gerilme değerlerinin olduğu görülmüştür. Ek olarak, maksimum gerilimin yaklaşık 290 MPa olduğu görülmüştür. Bu gerilim, yayıcının birleşim yerindedir. Statik analiz sonuçlarından elde edilen bu değerler, tahmin edilebilir ve beklenen seviyelerdedir.



Şekil 16. Analiz Sonuçlarına Göre Koltuk Ön Görünüşdeki Deformasyon Dağılımları



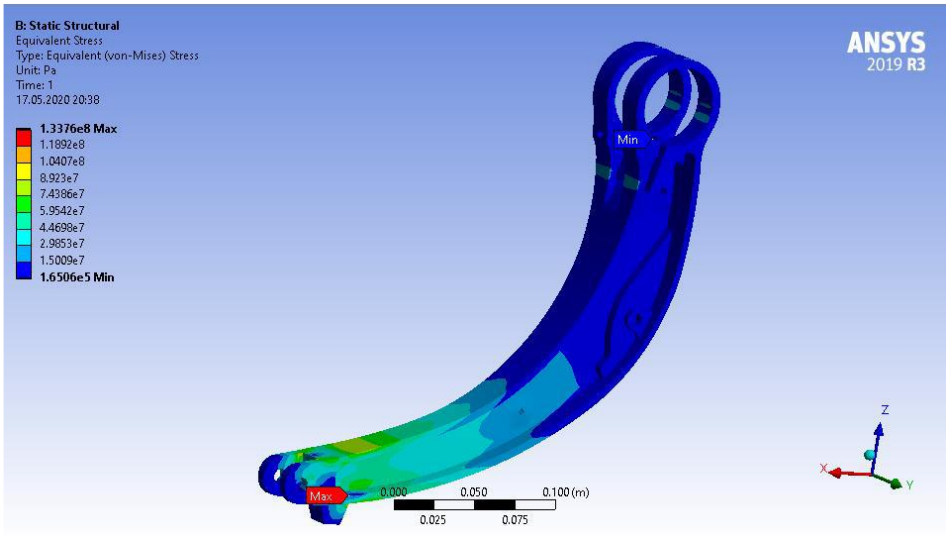
Şekil 17. Analiz Sonuçlarına Göre Koltuk Arka Görünüşdeki Deformasyon Dağılımları



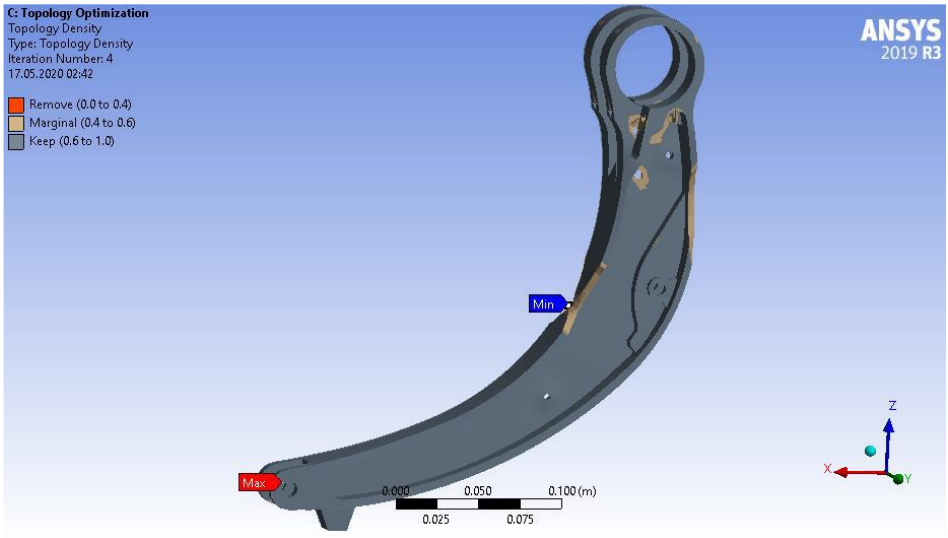
Şekil 18. Analiz Sonuçlarına Göre Koltuk Arka Görünüşdeki Detaylandırılmış Deformasyon Dağılımları

Deformasyon değerleri incelendiğinde, koltuğun rijit yapısı nedeniyle deformasyonların düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür. Buna göre statik analiz sonucunda maksimum deformasyon değerinin 0,5 mm civarında olduğu görülmüştür. Statik analizde tasarlanan koltukların bu kadar düşük deformasyon değerlerine sahip olması tahmin edilebilir ve beklenir bir durumdur. Çünkü tasarlanan uçak koltukları sadece statik testlere değil, 14g ve 16g dinamik testlere de tabi tutulur. Bu testleri geçebilmek için koltuk yapısının ultra dayanıklı ve yüksek mukavemetli olması gerekir.

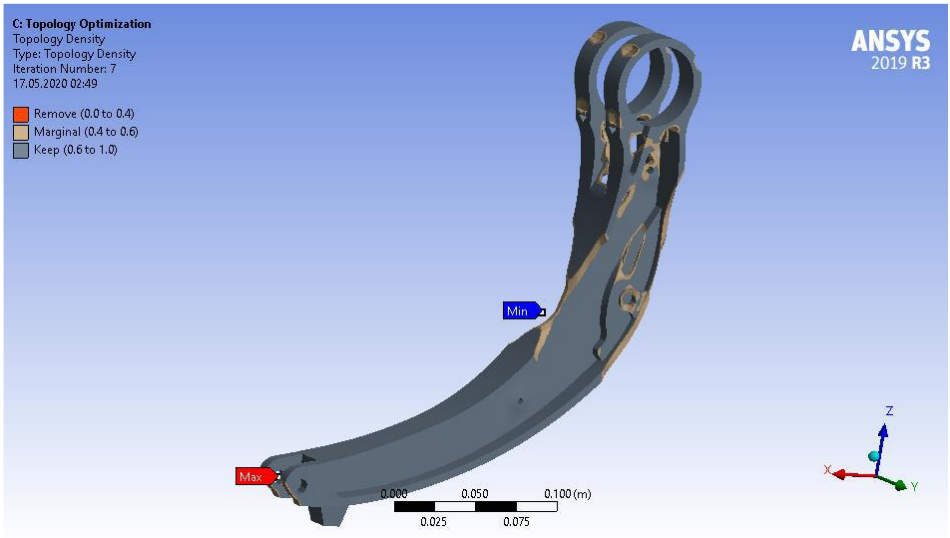
Topoloji optimizasyon çalışmasında elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekillerde olduğu gibidir.



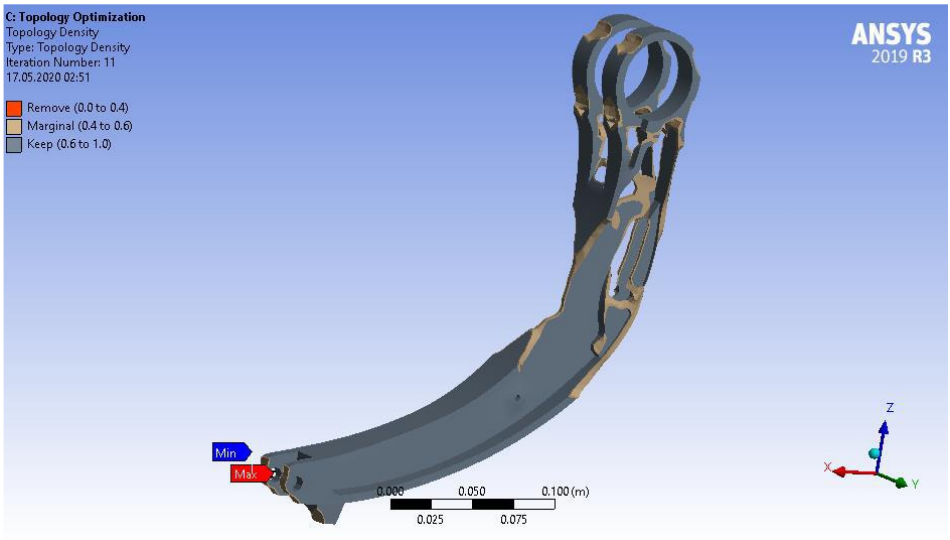
Şekil 19. Koltuk Arka Ayağında Statik Durumdaki Stres Dağılımı



Şekil 20. %10 Malzeme Tasarrufu ile Topoloji Optimizasyonu Çalışması



Şekil 21. %20 Malzeme Tasarrufu ile Topoloji Optimizasyonu Çalışması



Şekil 22. %30 Malzeme Tasarrufu ile Topoloji Optimizasyonu Çalışması

Bu çalışmanın topoloji optimizasyonu farklı amaç fonksiyonları ile 3 kez tekrarlandı. Bu kapsamda topoloji optimizasyon çalışması yapılırken, optimize edilecek parçanın doğal koşullarındaki yüklemeleri yapılmış ve optimizasyon amaç fonksiyonu olarak kütle azaltma fonksiyonu belirlenmiştir. Topoloji optimizasyonları sonucunda, koltuğun arka ayağı için yapılabilecek potansiyel bir ağırlık azaltma çalışması için tasarımlar elde edildi. Bilgisayar destekli analiz sayesinde

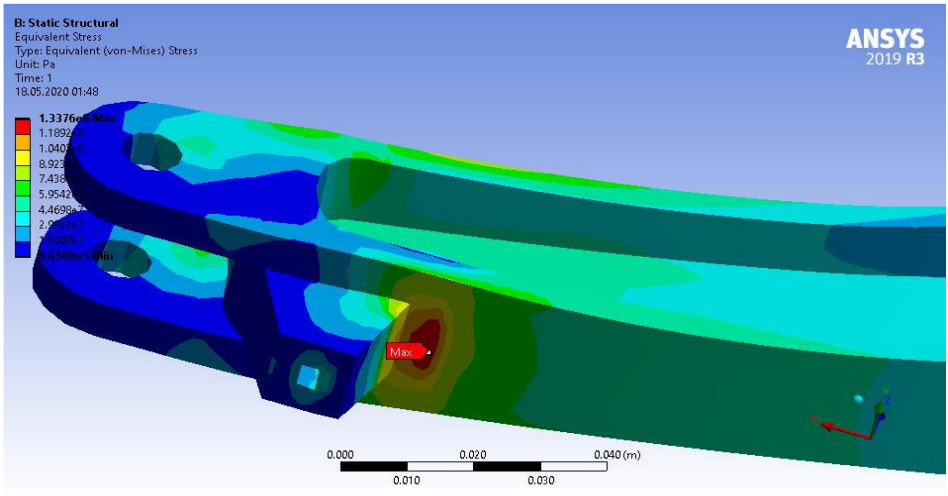
statik analiz yapılarak kurulan modelde oluşan gerilmeler elde edilerek topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Topoloji optimizasyonu modeli oluşturulurken tam model (bütün koltuk) analizden elde edilen kuvvetler esas alınmıştır. Bu analizler sonucunda elde edilen gerilme ve deformasyonlar öngörülebilir ve beklenen seviyelerdedir.

Sonuçların kıyaslanması ve yorumlanması

Elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, hesaplanan stres değerlerinin beklenen ve öngörülebilir seviyeler civarında olduğu görülmüştür. Tam model statik analizde, koltuk parçalarında oluşan en yüksek gerilme değeri yaklaşık 290 MPa'dır. Ek olarak, diğer parçalar üzerindeki gerilim 30-60 MPa aralığındadır. Bu değerler incelendiğinde TSI Aviation Seats Company bünyesinde daha önce yapılan diğer koltuk analizlerinde hesaplanan değerlere yakın oldukları görülmektedir.

Bu koltukta kullanılan en yüksek gerilme değerine sahip olan malzemeler göz önüne alındığında, çekme ve akma dayanımlarının 500 MPa civarında olduğu bilinmektedir. Bu analiz ile Epianka model uçak koltuğunun statik testler için uygun olduğu ve statik yükleme testini başarıyla geçebileceği tahmin edilmektedir.

Diğer kısımlarda daha düşük gerilme değerine sahip olan alüminyum alaşımının mukavemet değerleri 290 MPa civarında bilinmektedir. Bu bağlamda diğer bölümlerde oluşan 30-60 MPa gerilmeler statik analiz için oldukça normaldir ve bu parçaların statik testleri başarıyla geçebileceği düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan topoloji optimizasyonu değerlendirildiğinde, mevcut yüklere ek yükler yapıldığı için gerilim değerlerinin daha yüksek olduğu (134 MPa civarında, bir sonraki sayfada görülebilmektedir) görülmektedir. En yüksek gerilim değeri, beklenen alan civarındadır ve beklenen değerlere yakındır. Bu sonuçlar kapsamında yapılan topoloji optimizasyonunda, bu yükler altında optimize edilmiş koltuk ayağı modellerinin 3 farklı versiyonu elde edilmiştir. Optimize edilmiş bu modeller, stres değerlerinin yoğunluğuna göre kütlenin azaltılmasıyla elde edilir. Optimizasyon sonuçları incelendiğinde, daha az kritik olan bölgelerde kütle eksiltmesi yapılabileceği görülmektedir.



Şekil 23. Topoloji Optimizasyonu Çalışmasında Koltuk Arka Ayağında Gözlemlenen Maksimum Stres

Bu çalışmada yapılan topoloji optimizasyon çalışmasında, daha önce statik analiz yüklerine ilave yüklerin yapıldığı belirtilmişti. Bunun nedeni, tasarlanan koltukların dinamik analizde daha fazla yüke ve strese maruz kalmasıdır. Bu nedenle dinamik analiz koşullarında sonuçlara yakınsamak için ek yükler yapılarak topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Bu şekilde topoloji optimizasyonundan gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir.

SONUÇLARIN DOĞRULANMASI

Sonlu elemanlar analizinin sonuçları, doğru eleman tipi, boyutu ve uygun çözüm metotları seçilirse test verileriyle oldukça uyumlu olacak şekilde alınır. Ancak yine de sonlu elemanlar analizinin doğrulanması için test edilmesi gerekir. Bu çalışma kapsamında yapılan analiz sonuçları test edilerek doğrulanmamıştır. Ancak analizler sonucunda elde edilen sonuçlar TSI Aviation Seats firmasındaki diğer koltuk modelleri için yapılan test sonuçları ile uyumludur. Ayrıca analizden elde edilen sonuçlarda gerilme ve deformasyon değerleri beklenen seviyelerdedir. Ayrıca bu çalışma kapsamında yapılan statik analiz sonuçlarının doğruluğunu kontrol etmek için bazı analitik hesaplamalar yapılmıştır. Bu bağlamda koltuğun ön ayağı için stres hesabı aşağıdaki gibidir;

İlk olarak, koltuk ayakları neredeyse simetrik bir oryantasyona sahip olduğundan, koltuğun ön ayakları üzerindeki yükün yaklaşık dağılım hesabı aşağıdaki gibidir;

$$Ön\ ayaklara\ gelen\ kuvvet\ miktarı \approx \frac{300 * 9.81}{2}$$

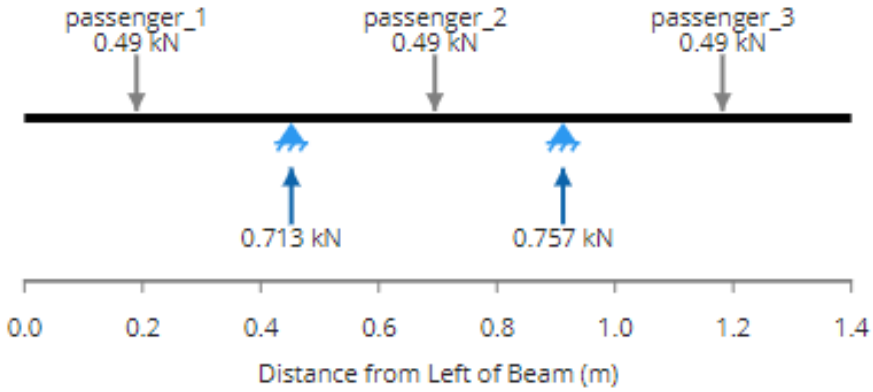
≈1471.5 N

Yükün 3 farklı oturma bölgesinden uygulandığını düşünürsek;

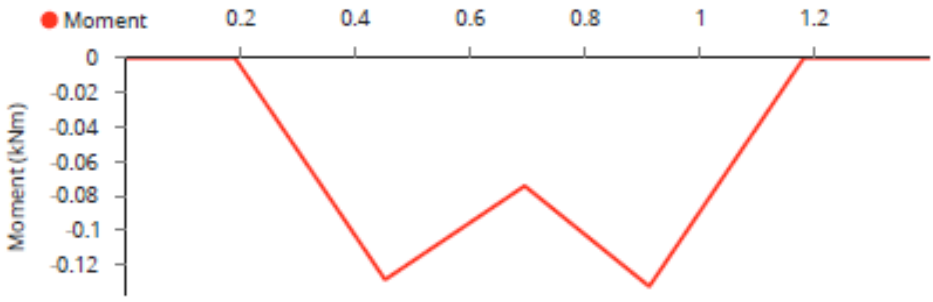
$$Her\ bir\ noktadan\ uygulanan\ kuvvet \approx \frac{1471.5}{3}$$

$$\approx 490.5\ \text{N}$$

Bu sonuçlara göre koltuk ayaklarına uygulanan kuvvetler ve reaksiyon kuvvetleri aşağıdaki gibidir.

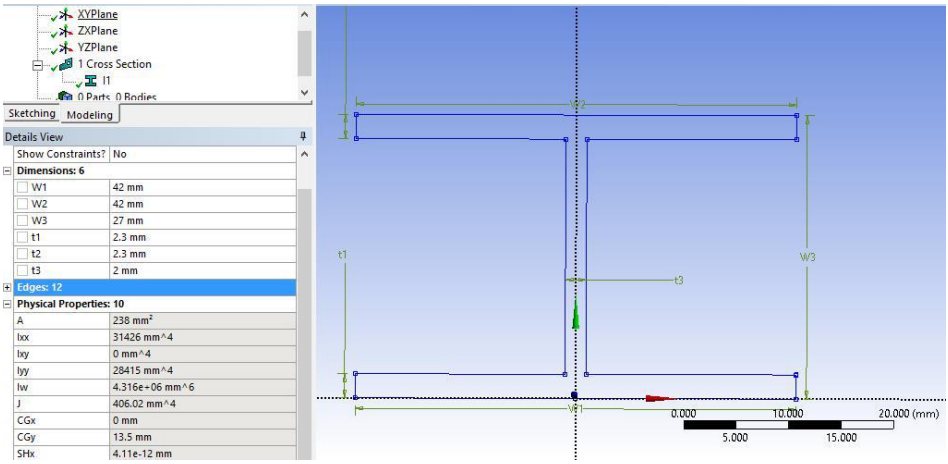


Şekil 24. Koltuk Ayağına Etki Eden Kuvvetler ve Reaksiyon Kuvvetleri



Şekil 25. Koltuk Ayağına Etki Eden Moment Diyagramı

Reaksiyon kuvvetleri ve moment nedeniyle koltuk ayağında meydana gelen gerilme şu şekilde hesaplanmıştır.



Şekil 26. Koltuk Ayağının I Profili Yapısı ve Ölçüleri

Maksimum moment= 132 N.m=132000 N.mm

Maksimum kuvvet= 757 N

y (nötral eksene olan dikey mesafe) = 13.5 mm

I (Atalet momenti) = 28415 mm^4

Koltuk ayağının kesit alanı = 238 mm^2

$$\Sigma_{toplam} \approx \sigma_{basma} + \sigma_{eğilme}$$

$$\approx \frac{F}{A} + \frac{M * y}{I}$$

$$\approx \frac{757}{238} + \frac{132000 * 13.5}{28415}$$

$$\approx 65.9 \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)}$$

Koltuğun ön ayağında analitik olarak hesaplanan stres hesabına göre sonuç yaklaşık 65,9 MPa'dır. Ayrıca analiz sonuçlarında elde edilen gerilmeler koltuğun ayak bölgesi için 30-60 MPa civarındadır. Analitik sonuçlar analizde elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında, maksimum gerilmelerin birbirine çok yakın olduğu anlaşılacaktır.

SONUÇLAR

Bu proje, literatür taraması, model oluşturma, statik analiz ve topoloji optimizasyonU çalışmaları ve sonuçları ile tamamlanmıştır. Bu bağlamda, bu projenin konusu olan tasarlanan bir uçak koltuğunun statik durumda nasıl davranacağı incelenmiştir. Bu çalışmada öncelikle çalışılacak uçak koltuk modeli TSI Aviation Seats firması tarafından sağlanmıştır. Daha sonra literatür taraması sonucunda bu konuda daha önce yapılmış benzer çalışmalar incelenmiş ve konu hakkında kapsamlı bilgiler elde edilmiştir. Çalışmanın devamında koltuğun statik olarak analiz edilebilmesi

için model hazırlama çalışmaları başlatılmıştır. Öncelikle FEA yöntemi ile koltuk kısımlarını incelemek amacıyla mesh çalışması yapılmıştır. Bu aşama, model hazırlamanın en önemli aşamalarından biridir. Çünkü hazırlanan modelin bir sonuca yakınlaşması, daha da önemlisi doğru sonuca yaklaşması için mesh kalitesi ve seçilen mesh boyutu çok önemlidir. Bu çalışmada yapılacak analizler için uygun mesh parametreleri ayarlandıktan sonra bir sonraki aşamaya geçilmiştir. Bu aşamalarda koltuk için sınır şartları ve belirlenen yükler modele tanımlanmıştır. Daha sonra tasarlanan koltukta kullanılması planlanan malzemeler programa işlenmiş ve koltuk parçalarına malzeme atanmıştır. Devamında ise çözüm yöntemi için gerekli yöntemler modele tanımlanıktan sonra son olarak model çalıştırılıp sonuçlar elde edilmiştir.

Statik analiz için değerlendirmeler

Statik analizden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde elde edilen gerilme ve gerinim değerleri, statik analiz için beklenen sınırlar içinde kalmıştır. Bu sonuçlar sayısal olarak değerlendirildiğinde genellikle 30-60 MPa civarında olduğu görülmektedir. Ek olarak, beklenen en yüksek gerilim 290 MPa civarındadır. Kullanılan malzemenin akma dayanımı ve çekme dayanımı göz önüne alındığında, gerilme değerlerinin dayanım değerlerinden çok daha düşük olduğu görülmüştür. Bu sonuçlardan yola çıkılarak tasarlanan koltuğun statik analiz koşullarında başarılı olduğu ve statik testleri geçebileceği sonucuna varılmıştır.

Topoloji optimizasyonu için değerlendirmeler

Bu bölümden sonra bu projenin ikinci bölümü olan topoloji optimizasyonu aşamasına geçilmiştir. Uçak koltukları için topoloji optimizasyonu çok önemlidir çünkü uçuşla ilgili her ağırlık, havacılık endüstrisinde maliyet anlamına gelir. Bu bağlamda, koltuğun gerekli mukavemet sınırları içinde yapılan her ağırlık azaltma çalışması, maddi bir kazanç anlamına gelir. Bu amaçla koltuk ağırlığını belirleyen önemli kısımlardan biri olan arka koltuk ayağı için topoloji optimizasyonu çalışması yapıldı. Topoloji optimizasyonu 3 farklı amaç fonksiyonu ile tekrarlandı. Topoloji optimizasyon çalışmaları sonucunda, mevcut malzemenin %30'u kaldırıldığında eldeki CAD modelinin dayanım gücünün aynı kalabileceği anlaşılmıştır. Bu sonuçlar dikkate alınarak topoloji optimizasyon çalışması ile koltuk arkası ayağı için% 30 ağırlık ve malzeme tasarrufu yapılabileceği söylenebilir.

Gelecek çalışmalar için öneriler

Bu çalışma kapsamında bazı analizler yapılmış ve sonuçlar başarıyla alınmıştır. Ancak bazı aşamalar daha kapsamlı yapılabilir ve bu aşamalara ek çalışmalar yapılabilir. Bu bağlamda topoloji optimizasyonunda sınır koşulu olarak belirlenen yükler bir kabulden ibarettir. Bu kabul, istatistiksel analizlerden gelen yüklere ek olarak

bazı yükler eklenerek bulunmuştur. Önceki aşamada, topoloji optimizasyonundan önce, statik analize ek olarak dinamik analiz yapıldıysa, topoloji optimizasyonu için daha doğru sınır koşulları belirlenebilirdi. Topoloji optimizasyonu çalışmasında yaklaşık sonuçlar elde edilmiştir, ancak bu sonucu daha doğru bir şekilde elde etmek için söz konusu ek çalışma yapılabilir. Diğer bir konu da topoloji optimizasyonu çalışmasından sonra yapılabilecek olası yeni bir tasarımla ilgilidir. Bu bağlamda topoloji optimizasyonu çalışması tamamlandıktan sonra elde edilen sonuçların bir CAD programına aktarılması ile yeni bir CAD modeli oluşturulabilir. Bu, bir mühendislik tasarımı iterasyonunun başlatılabileceği anlamına gelir.

Ayrıca bu çalışmada bilgisayar destekli yapılan sonlu eleman analizi, test yöntemi ile doğrulanamamıştır. Çalışmanın güvenilir ve doğru sonuçlar vermesine rağmen, nihai ürüne dönüşmeden önce test edilmesi ve doğrulanması gerektiği bilinen bir gerçektir. Bu bağlamda ileride yapılacak çalışmalarda yapılan analizlerin uygun fiziki koşullar varsa test yöntemi ile doğrulanması daha güvenilirdir.

KAYNAKÇA

Bhonge, P.S. (2008). A methodology for aircraft seat certification by dynamic finite element

analysis. Diss. Wichita State University.

Düvenci, F. (2017). Araç yolcu koltuk ayaklarında farklı malzemelerin kullanımının sonlu

elemanlar yöntemi ve testler ile mekanik etkisinin karşılaştırılması. MS thesis. Uludağ

University.

Shivakumar, M. R., Kamat, A., & Prakash, G. S. (2016). "Comfort Design And Analysis Of Driver Car Seat Using Finite Element Analysis.".

Siefert, A., S. Pankoke, and H-P. Wölfel. "Virtual optimisation of car passenger seats:

Simulation of static and dynamic effects on drivers' seating comfort. (2008). " International

Aydıner, Ş.S. (2018). Yolcu koltuğu ayağının sonlu elemanlar yöntemi ile optimizasyonu. MS thesis. Uludağ University.

Bhonge, P., & Lankarani, H. (2008) Finite element modeling strategies for dynamic aircraft seats. No. 2008-01-2272. SAE Technical Paper.

Bulgur, A. (2006). Koltuk bağlanti elemanlarinin mukavemetinin; ilk hiz koşullari ve dummy etkisi ile crash testi esnasinda simülasyonu. MS thesis. Gebze Institute of Technology.

Görgün, G. (2019). Uçak Koltuğu Kompozit Sirtlik Sisteminin Modellenmesi Ve Sonlu

Elemanlar Analizi. MS thesis İstanbul Technical University.

Hutton (2004) , D. V., Fundamentals of Finite Element Analysis, 1. Edition, Mc Graw Hill Higher Education, USA. http://10.6.20.12:80/handle/123456789/24312.

Dede, G. (2016). 'Development Of Seat Design And Simulation Of Seating Systems' Tests According To European And Us Regulations For Seats. MS thesis. Çukurova University

Institute of Natural And Applied Sciences.

Altair University, (2014). Practical Aspects of Structural Optimization, A Study Guide.

Callister W. D. and Rethwisch, D. G., Materials Science and Engineering, 8. Edition,

WILLEY, USA.

Kelleci, Z. E., (2020), Personal Meeting, TSI Aviation Seats Company.taken in 16.01.2020

Journal of Industrial Ergonomics 38.5-6 410-424.

García Nieto, P. J., Vilan, J. V., Coz Diaz, J. D. (2009). "Analysis and study of an automobile

rear seat by FEM." International Journal of Computer Mathematics 86.4: 640-664.

İNTERNET KAYNAKÇASI

URL-1 Airplane Seat Types, <https://www.aircraftcompare.com/blog/types-of-airplane-seats/>

URL-2 http://www.value-design-consulting.co.uk/boundary-conditions.html. 20.01.2020

URL-3 Hypermesh Tutorials, < https://altairhyperworks.in/edu/contest/aoc/2013/tutorials-anddownloads. html#.XioHF8gzbIU > taken in 20.01.2020.

BÖLÜM 6
CP-Ti METALLERİNİN ERGİMELİ KAYNAK UYGULAMALARININ İNCELENMESİ

Doç. Dr. Memduh KURTULMUŞ[1], Ezgi DOĞAN[2]
[1]Marmara Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, İstanbul / TÜRKİYE
[2]Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul / TÜRKİYE

Öz: Titanyum, yüksek sağlamlığı ve hafifliği, paslanmaya karşı dirençliliği, yüksek ergime noktası özellikleriyle hava araçlarında, uzay araçlarında, roketlerde, arabalarda, kimyasal tesislerde, spor ekipmanlarında ve mimari uygulamalarda kullanılmaktadır. Toksik olmaması ve biyolojik uyumu nedeniyle ortopedik protez ve uygulamalarında, cerrahi implant ve medikal uygulamalarında vaz geçilmez maddelerden olmuştur. Dört ana guruba ayrılan titanyum alaşımlarının birinci grubunu ticari saf titanyum metalleri oluşturur. Bu literatür taraması yapılarak hazırlanan makalede ticari saf titanyum metalleri tanıtılmıştır. Bu metallerin ergimeli kaynak birleştirme detayları ve en yaygın uygulanan TIG kaynak yönteminin uygulamaları açıklanmıştır. Titanyum alaşımlarına uygulanan ergimeli kaynak yöntemlerinde kaynak enerji girdisine bağlı olarak kaynak dikiş genişliği, kaynak bölgesinin soğuması, kaynak bölgesinin mikro yapısı ve kaynak mekanik özellikleri değişmektedir. Endüstride klasik TIG kaynağı 2 mm kalınlığa kadar olan parçalara ekonomik olarak uygulanmaktadır. Daha kalın parçalara A-TIG, darbeli TIG veya keyhole TIG yöntemleri uygulanmaktadır. Kaynak bölgesi 450°C'nin altına kadar soğumasına kadar ortamdan koruma gazları ile çok iyi korunmalıdır. Aksi halde metale oksijen, azot ve hidrojen atomu girerek kaynağın sünekliğini ve tokluğunu düşürmektedir. Kaynak metaline giren oksijen atomları kaynak metal rengini değiştirmektedir. Kaynak dikişi renginden kaynak kalitesi hakkında bilgi sahibi olunmaktadır.

GİRİŞ ve KURAMSAL ÇERÇEVE

Titanyum yer kabuğunda bulunan elementlerin %0,6' sını oluşturan elementtir. Nadir bir element olarak zannedilen titanyum, aslında yerkabuğunda en çok bulunan 6. element olma özelliğine sahiptir. Titanyumunun oksijen, nitrojen ve

hidrojen ile kolaylıkla reaksiyona girmesi onun doğada metalik olarak bulunmasını olanaksız hale getirir ve genellikle mineraller halinde bulunur (Jaffee,1970). Ekonomik öneme sahip titanyum mineralleri rutil (TiO2) ve ilmenittir (FeTiO3). Bu minerallerin proses edilmesiyle sünger halde saf titanyum metali elde edilir (Nakamura, 2017). ABD hariç 2016-2017 yıllarında dünyada 170.000 ton titanyum süngeri üretilmiştir (Yücel, 2018).Titanyum, ABD'de ülke güvenliği ve ekonomik gerekliliği açısından kritik kabul edildiğinden, bu ülkenin üretim miktarı açıklanmamaktadır.

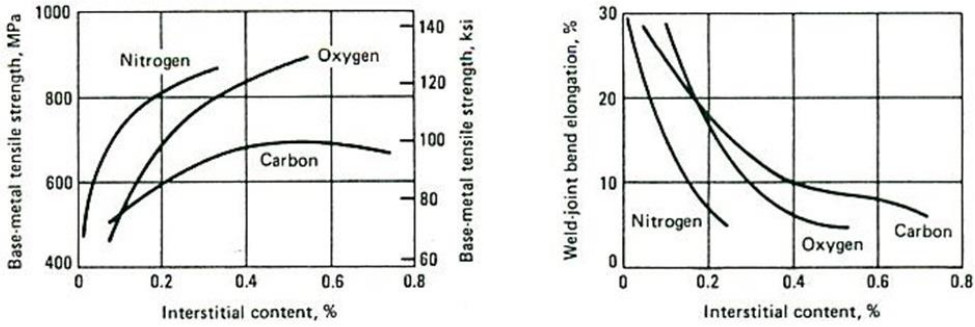
Titanyum ve titanyum alaşımları yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve iyi korozyon direncini bir arada bulunduran ender mühendislik malzemelerindendir. Bir arada bulundurduğu bu özelliklerden dolayı günümüzde birçok endüstriyel uygulamalarda titanyum metali veya alaşımları kullanılmaktadır. Hafifliği ve yüksek mukavemet özellik göstermesi nedeniyle havacılık alanında tercih edilen bir metaldir. Titanyum yüksek sıcaklıkta ergiyen bir metal olmasından ve yüksek sıcaklıklardaki dayanımından dolayı nikel ve kobalt içerikli alaşımlara özellikle askeri alanda alternatif bir malzeme olmuştur. Korozyona olan direnci ile de kimya endüstrisi ve denizcilik uygulamalarının vazgeçilmez bir parçasıdır (Leyens, 2003). Ayrıca ortopedik ve dişçilik uygulama alanlarında da kullanılmaktadır (İçdem, 2007). Titanyum doğada çok bulunan bir metal olmasına rağmen üretim maliyetinin çelik ve alüminyum alaşımlarından daha yüksek olması, bu metal alaşımlarının kullanımının yaygınlaşmasını engellemektedir (Boyer, 2010).

AMAÇ

Titanyumun özgül ağırlığı 4,5 g/cm3'dür. Bu nedenle hafif metaller gurubuna girmektedir. Titanyum alaşımlarının özgül mukavemeti yüksektir. Ergime sıcaklığı 1660oC olduğundan ısıya dayanıklı metaller gurubuna girer. Titanyum allotropik bir metaldir. Kristal yapısı 882oC sıcaklığa kadar hekzagonal sıkı paket iken bu sıcaklıkta kübik hacım merkeze dönüşür. Kübik hacım merkezli metallere Alfa titanyum ve kübik hacım merkezli olanlara Beta titanyum adı verilmiştir(Froes, 2015). İçerdiği alaşım elementleri titanyum alaşımlarının oda sıcaklığındaki mikroyapısını Alfa, Alfa+Beta veya Beta yapar. Titanyum alaşımı üretmekteki ana amaç metalin mekanik özelliklerini ve korozyon direncini arttırmaktır. Titanyumun temel kimyasal özelliği korozyona karşı gösterdiği müthiş direncidir. Titanyum alaşımlarının mükemmel korozyon direnci yüzeyinde oluşan kararlı koruyucu oksit filminden kaynaklanmaktadır. Titanyum ve alaşımları biyolojik uyumlu ve anti toksik olduğundan dişçilik ve biyomedikal uygulamalarda implant malzeme olarak kullanılmaktadır.

KAPSAM

Ticari saf titanyum (Commercially Pure) metallerine CP alaşımları adı da verilmektedir. Bu alaşımlar % 98,5-99,5 Ti içerir. Bu metallerin ASTM standartlarına göre kimyasal bileşimleri ve çekme deney sonuçları Tablo 1 ve 2'de sırayla gösterilmiştir. Tablo 2'ye sadece karşılaştırma yapmak maksadıyla saf titanyumun çekme deney sonuçları eklenmiştir. Ticari saf metallerde karbon, hidrojen, oksijen ve azot bulunur. Bunlar titanyumda arayer atomu olarak bulunur. Ara yer alaşım elementlerinin çekme mukavemeti ile çekmedeki kopma uzaması üzerindeki etkisi Şekil 1'de görülmektedir (Ouchi, 1998). Bu alaşım elementleri arayer katı eriyiği yaparak çekme mukavemetini arttırırken metalin sünekliğini (% Uzama) azaltarak gevrekliğe yol açmaktadır. En etkin olan element azottur. Ticari saf alaşımların dayanımları 240 ile 550 MPa arasında değişir. Bu metallerde arayer atom oranı ile metal mukavemetinin arttığını ve sünekliğin düştüğünü Tablo 1 ve 2'de görmekteyiz. CP1 metali en az yabancı element içerdiğinden akma ve çekme mukavemeti saf titanyuma çok yakındır. Arayer alaşım element oranı arttıkça metalin mukavemeti yükselmektedir. En büyük fark süneklikte olmaktadır. Saf titanyumda %50 olan uzama CP1'de sadece %24 değerindedir. Bu arayer alaşım elementlerinin, başta oksijen olmak üzere, titanyumda gevreklik yaparak sünekliği düsüreceği anlamına gelmektedir. CP 1, 2, 3 ve 4 metalleri sadece arayer atomları içerir. CP 7, 11 ve 12 metallerinde korozyon direncini arttırmak için az da olsa alaşımlama yapılmıştır. CP 7 ile 11 metaline Pd ve CP 12 metaline Mo ve Ni alaşım elementi ilavesi yapılmıştır.



Şekil 1. Alaşım Elementlerinin Ve Saflığı Bozan Maddelerin Titanyumun Mekanik Özellikleri Üzerinde Etkisi. (A) Arayer Katı Eriyikleri Oluşturan Elementlerin Titanyumun (A) Çekme Mukavemetine Ve (B) Çekme Deneyi Uzama Oranına Etkisi

Tablo 1. Ticari Saf Titanyum Alaşımların Kimyasal Bileşimleri

ASTM Sınıflaması	Elementlerin % maksimum ağırlık oranı					
	C	H	O	N	Fe	Diğerleri
ASTM 1	0,10	(a)	0,18	0,03	0,20	-
ASTM 2	0,10	(a)	0,25	0,03	0,30	-
ASTM 3	0,10	(a)	0,35	0,05	0,30	-
ASTM 4	0,10	(a)	0,40	0,05	0,50	-
ASTM 7	0,10	(a)	0,25	0,03	0,30	0,12-0,25 Pd
ASTM 11	0,10	(a)	0,18	0,03	0,20	0,12-0,25 Pd
ASTM 12	0,10	0,015	0,25	0,03	0,30	0,2-0,4 Mo, 0,6-0,9Ni

(a) Yassı ürünlerde 0,015 ve (b) çubuk ürünlerde 0,0125

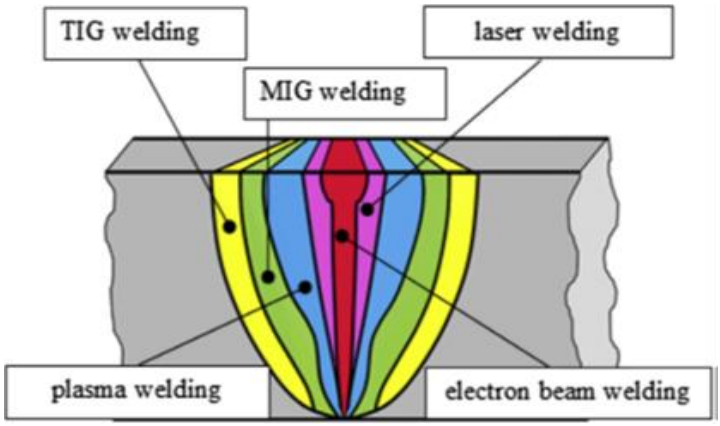
Tablo 2. Saf Titanyum ve Ticari Saf Titanyum Alaşımlarının Tipik Çekme Deney Sonuçları

ASTM Sınıflaması	Çekme Deney özellikleri		
	Akma mukavemeti	Çekme mukavemeti	Uzama
	MPa	MPa	%
Saf Ti (99,98Ti)	140	235	50
ASTM 1	170	240	24
ASTM 2	275	343	20
ASTM 3	377	440	18
ASTM 4	480	550	20
ASTM 7	275	343	20
ASTM 11	170	240	24
ASTM 12	380	480	12

YÖNTEM

Ticari saf titanyum parçaların kendi aralarında ve diğer metal parçaları ile birleştirilmesinde TIG, gazaltı (MIG), plazma ark, elektron ışın, lazer, melez, sürtünme kaynak ve elektrik direnç kaynak yöntemleri kullanılır (Yan, 2014). Bu tebliğde sadece ticari saf titanyum parçalara uygulanan ergimeli kaynak yöntemlerinin temel özellikleri ile TIG kaynak uygulamaları incelenecektir. Bu kaynak

yöntemleri ile alın kaynak birleştirmelerde elde edilen tipik dikiş kesitleri Şekil 2'de şematik olarak gösterilmiştir (Weglowski, 2016).



Şekil 2. Ergimeli Alın Kaynak Birleştirmelerinde Elde Edilen Dikiş Geometrileri

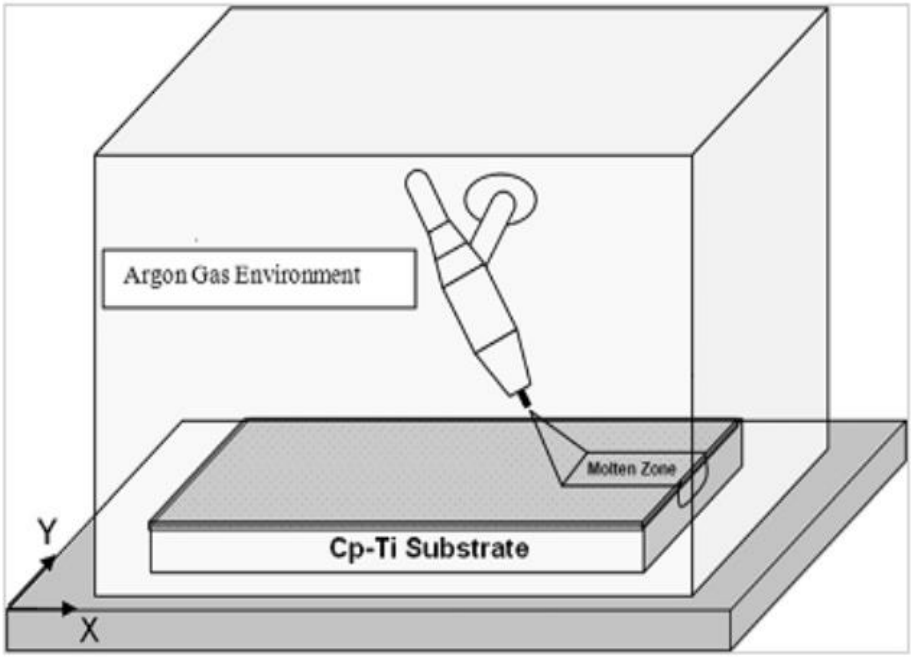
Kaynak yönteminin cinsine bağlı olarak kaynak enerji girdisi ve elde edilen dikiş geometrisi değişmektedir. Bunlara bağlı olarak kaynak bölgesi mikro yapısı ve mekanik özelliklerde farklılıklar olmaktadır. Elektron ışın kaynağında genellikle sarf malzemesi kullanılmadan ve çok düşük kaynak enerji girdisi ile kaynak yapıldığından çok ince bir dikiş elde edilmektedir. Kaynak enerji girdisi arttıkça dikiş kesiti büyüme göstermektedir. En küçük kaynak kesiti elektron ışın kaynağında ve en büyük kaynak dikiş kesiti TIG kaynağında elde edilmektedir. Kaynak kesiti büyüdükçe kaynak metalinin soğuma hızı azalmaktadır. Lazer kaynağında kaynak metalinin soğuma hızı 1000oC/s civarındayken olurken TIG kaynağında soğuma hızı 30oC/s kadar olmaktadır (Baeslack, 1982). Hızlı soğumalar metalde su verme etkisi yapmaktadır. B taneleri hızla soğuduğunda difüzyona zaman kalmadığından, iş parçasında martenzite dönüşümü olmaktadır (Murthy, 1998). Mikro yapıda masif martenzit meydana gelmektedir. Bu olay elektron ışın ve lazer kaynağında meydana gelmektedir. TIG kaynağında ise soğuma düşük hızda olduğundan martenzit dönüşümü gerçekleşmemektedir.

Kaynak metalinin kesit alanı arttıkça ve dikişin ağırlık merkezi ile sac ağırlık merkezi arasındaki mesafe uzadıkça kaynaklı parçada meydana gelen iç gerilmeler ve açısal çarpılmalar büyümektedir (Yukler, 2018). Elektron ışın kaynağında kaynak metal kesit alanı çok küçük olduğundan kaynak katılaşması ve soğuması sırasında oluşan büzülme gerilmeleri az oluşacaktır. Ayrıca dikişin üst ve alt genişlikleri arasında fark az olduğundan kaynakta meydana gelecek distorsiyonlar ve çarpılmalar çok az olacaktır. Dikiş kesiti büyüdükçe kesit uzunluğunda kalınlık

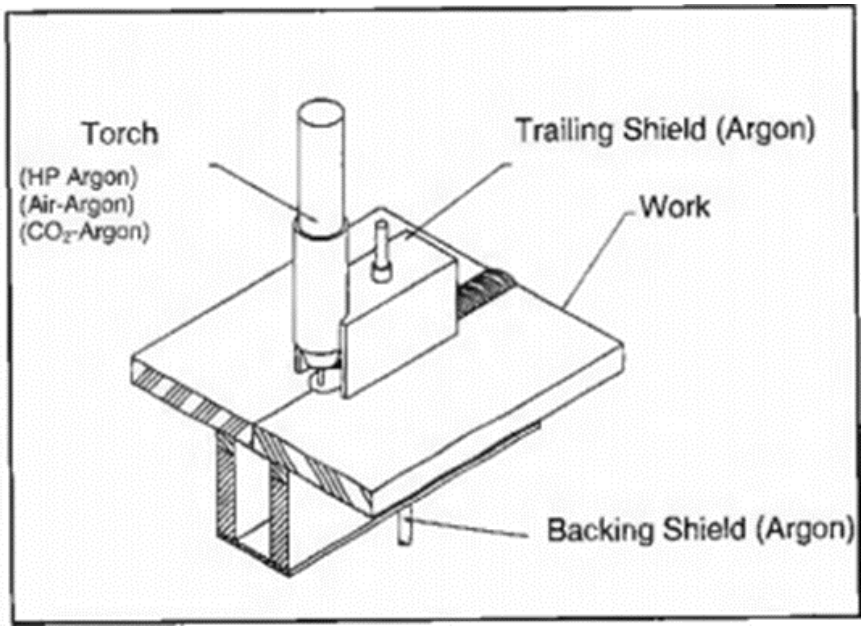
farkı arttıkça kaynaklı parçada çarpılmalar artacaktır. Bu nedenle TIG kaynağından çarpılma riski daha fazla olmaktadır.

Titanyum çok reaktif bir metal olmasından dolayı oda sıcaklığında bile yüzeyinde oksit film tabakası oluşturur. Birkaç nanometre kalınlığında olan bu oksit film tabakası, metali, yüzeyde oluşacak reaksiyonlara ve korozyona karşı korur (Komotori 2001). Titanyumun farklı stokimetrilerde titanyum oksitleri vardır. Bunlar içinde en kararlı yapıya sahip olan TiO2'dir (Brunette, 2001). Titanyum malzemesi üzerinde bulunan koruyucu titanyum oksit filmi, 535oC'nin altındaki sıcaklıklarda korozyona karşı mükemmel bir direnç sağlar. Ancak, 535oC'nin üzerindeki sıcaklıklarda bu tabaka kırılır ve ortamda bulunan O, N ve H atomları malzemeye difüze olarak kırılganlaşmaya sebep olur (Kaya, 2011). Sıvı halde titanyum katı halinden daha reaktiftir. Ortamda mevcut olan O, N ve H atomları sıvıda kolayca çözünürler ve gevrekliğe sebep olurlar. Titanyum içerisinde %30 kadar oksijen çözebilir (Kofstad, 1988). Titanyumun ara yer atomlarına karşı hassaslığı bu malzemelere çeşitli kaynak yöntemlerinin kullanılmasını sınırlandırmaktadır (Şirin, 1997). Ayrıca kaynak yapılırken bilhassa oksitlenmeye karşı bir dizi ek önlemler alınmasını zorunlu kılmaktadır. Ergitmeli kaynaklar vakum ortamda veya mükemmel gaz korumalı ortamlarda yapılmaktadır. Koruma gazı olarak çok saf argon, helyum veya argon+helyum gaz karışımları kullanılmaktadır (Vinoth 2016). Kaynakta kullanılan sarf malzemelerinde gevrekliğe yol açan ara yer atomların en alt seviyede olmasına dikkat edilmektedir (AWS, 2013). Ticari saf titanyum metallerine soğuk deformasyon sertleştirilmiş halde değil, tavlanmış koşulda kaynak yapılmaktadır (Oğuz, 1990). Ergimeli kaynaklarda alınan temel tedbirler aşağıda kısaca açıklanmıştır:

Kaynak sırasında havada bulunan O, N ve H sıvı veya sıcak haldeki metale difüze olmaması için iş parçalarının mükemmel korunması için Şekil 3'teki gibi koruyucu gaz içeren bir hücrede kaynak edilir (Nemani, 2017). Bu hücrelerde sadece küçük parçalar kaynak edilebilir. Daha büyük parçalarda kaynak bölgesinin gaz koruması arttırılır. Şekil 4'te ergitmeli kaynaklarda gaz koruması şematik olarak görülmektedir (Harwig, 2000). Klasik torçtan üflenen koruma gazının yanı sıra soğumakta olan kaynak bölgesine üstten ve iş parçasının alt tarafından koruma gazı üflenmektedir. Gaz koruması yeteri kadar başarılı olmazsa kaynak metaline ve oradan yayınan O, N ve H atomları kaynağın sertliğini arttırırken sünekliğini azaltır.



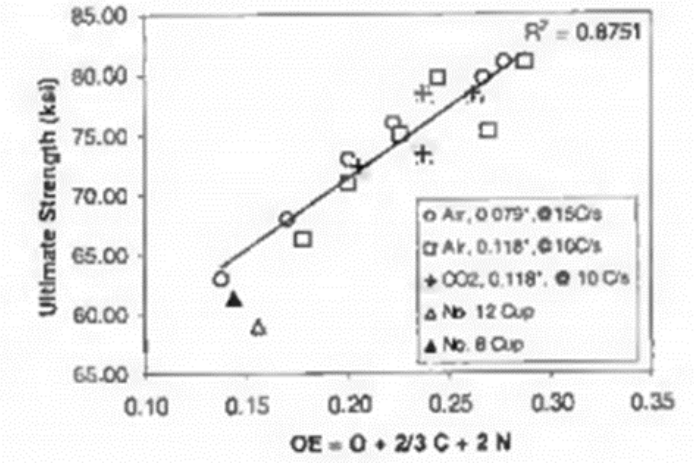
Şekil 3. Koruyucu Gaz İçeren Şeffaf Kaynak Hücresi



Şekil 4. Titanyum Alaşımlarının Ergitmeli Kaynaklarında Kaynak Bölgesine Koruma Gaz Üfleme Teknikleri

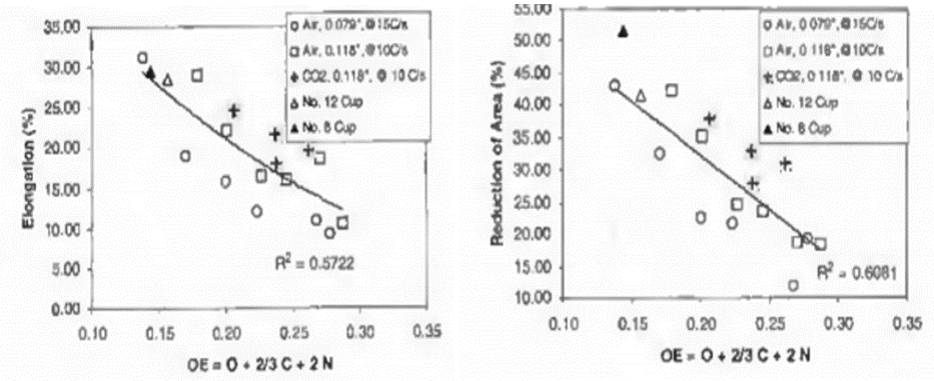
Ticari saf titanyum metalleri için oksijen eşdeğeri (OE) adı verilen ve 1 Numaralı denklemde gösterilen formül geliştirilmiştir. Kaynak metalinin oksijen eşdeğerine bağlı olarak kaynağın çekme mukavemeti artarken sünekliği (%uzama ve %kesit daralma) azalmaktadır.

$$O_E = O + 2/3C + N \quad (1)$$



Şekil 5. Ticari Saf Titanyumlarda Kaynak Metali Oksijen Eşdeğeri ile Kaynak Çekme Mukavemetinin Değişimi

Kaynak edilen ticari saf titanyum ve titanyum alaşımlarının kaynak dikiş rengi içerdiği oksijen miktarı ile değişiklik gösterir. Bu renkler dikiş yüzeyindeki oksijen miktarı ile değişmektedir. Tablo 3'de titanyum kaynak metalinin renkleri ve bunlara bağlı olarak kaynaklar hakkında elde edilen bilgiler görülmektedir. Kaynak rengi kesin bir bilgi kaynağı değildir. Sadece metal yüzeyindeki oksijen oranının bir göstergesidir. Kaynak metali yüzeyinden içeri doğru girildikçe metalde çözünen oksijen oranı azalır (Li, 2005).



Şekil 6. Ticari Saf Titanyumlarda Kaynak Metali Oksijen Eşdeğeri ile Kaynak % Uzama Ve % Kesit Daralma Oranının Değişimi

Tablo 3. Titanyum Kaynak Metal Renkleri ve Kaliteleri

KAYNAK RENGİ	KAYNAK KALİTESİ	KAYNAK RENGİ	KAYNAK KALİTESİ
Parlak gümüş	Kabul edilir	Menekşe	Kabul edilmez
Gümüş	Kabul edilir	Koyu mavi	Kabul edilmez
Açık saman	Kabul edilir	Açık mavi	Kabul edilmez
Koyu saman	Kabul edilir	Yeşil	Kabul edilmez
Bronz	Kabul edilir	Gri	Kabul edilmez
Kahverengi	Kabul edilir	Beyaz	Kabul edilmez

Ticari saf titanyum metallerine kaynak yapılırken kullanılan sarf malzemeleri, bunların kimyasal bileşimleri ve kaynak metalinin mukavemet özellikleri Tablo 4 ve 5'de görülmektedir. Kaynak edilen metalin kimyasal bileşimi ve mekanik özelliklerine uygun sarf malzeme seçimi yapılmalıdır.

Tablo 4. Ticari Saf Titanyum Metalleri İçin AWS A5.16 Standardında Önerilen Sarf Malzemelerinin Adları ve Kimyasal Bileşimleri

Element	ERTi-1	ERTi-2	ERTi-3	ERTi-4
% Karbon	0.03 max	0.03 max	0.03 max	0.03 max
% Oksijen	0.03-0.10	0.08-0.16	0.13-0.20	0.18-0.32
% Azot	0.012 max	0.015 max	0.02 max	0.025 max
% Hidrojen	0.005 max	0.008 max	0.008 max	0.008 max
% Demir	0.08 max	0.12 max	0.16 max	0.25 max

Tablo 5. Ticari Saf Titanyum Metalleri İçin AWS A5.16 Standardında Önerilen Sarf Malzemelerinin Kaynak Metalinin Tipik Akma ve Çekme Mukavemet Değerleri

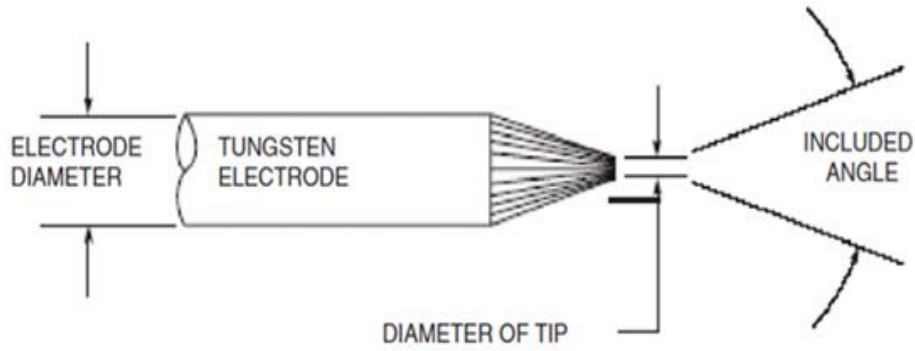
Mukavemet	ERTi-1	ERTi-2	ERTi-3	ERTi-4
Akma, MPa	140	280	385	490
Çekme, Mpa	245	350	455	560

BULGULAR

Titanyum TIG kaynaklarında genellikle kırmızı kod rengi olan %2 toryumlu tungsten elektrot kullanılır. Elektrotlara Şekil 7'de gösterilen 30-40° kaynak açısı

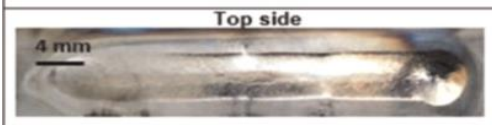
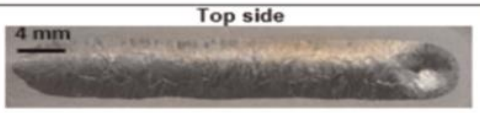
açılır (Sutherlin, 2007). Elektrot ucu küt yapılır ve uç çapı elektrot çapının 1/3 değerinde olur. Kalınlığı 2 mm ve altında kalan saçlara tek pasoda küt alın kaynak birleştirmesi yapılır. Daha kalın parçalara kaynak ağzı açılır ve çok paso ile kaynak yapılır (Otani, 2007). Fakat kalın parçalara klasik TIG kaynağı ekonomik olmadığından, genellikle bu parçalara klasik TIG yöntemi uygulanmaz.

Koruma gazı olarak saflığı en az %99,995 olan argon veya helyum gazı kullanılır. Argonun ark kararlığı helyumdan daha fazla olduğundan kaynak torcunda çok fazla olarak kullanılmaktadır. Argon helyumdan daha ağır olduğundan yatay konumda kaynak yapılırken iş parçası üzerini battaniye gibi kaplayarak kaynak bölgesini havanın menfi etkilerinden daha iyi korumaktadır. Bu nedenle yatay pozisyondaki birleştirmelerde, soğumakta olan kaynak bölgesine üflenen gazında argon olması tercih edilir. Genellikle doğru akımla ve elektrod pozitif kutuba bağlı olarak kaynak yapılır.



Şekil 7. Tungsten Elektrod Ucu Şekli

Farklı gaz koruma koşullarında elde edilen dikişlerin görüntüsü Şekil 8'de görülmektedir (Karpagaraj 2015). En düşük gaz koruması altında yapılan dikişin üst ve alt kısımlarında mavi renk görülmektedir. Bu renkler yetersiz koruma sonunda metal yüzeyinde fazla oranda oksijen yayınması olduğunu göstermektedir. Elde edilen dikiş kabul edilemeyen hatalı bir dikiştir. Kaynak torcundan 15, kaynağı takip eden torcdan 25 ve parçanın alt tarafından 10 Litre/dakika hızında gaz üflenmesi sonunda elde edilen dikişin rengi parlak gümüş rengidir. Bu renk kaynağın mükemmel olarak koruma gazı ile korunduğunu, kaynak metaline başta oksijen olmak üzere azot ile hidrojen yayınması olmadığını ve dikişin kaliteli olduğunu gösterir. Şekil 8'in orta sırasındaki kaynak gümüş rengindedir. Bu renk kaynak bölgesinin hava ortamından iyi korunduğunu gösterir.

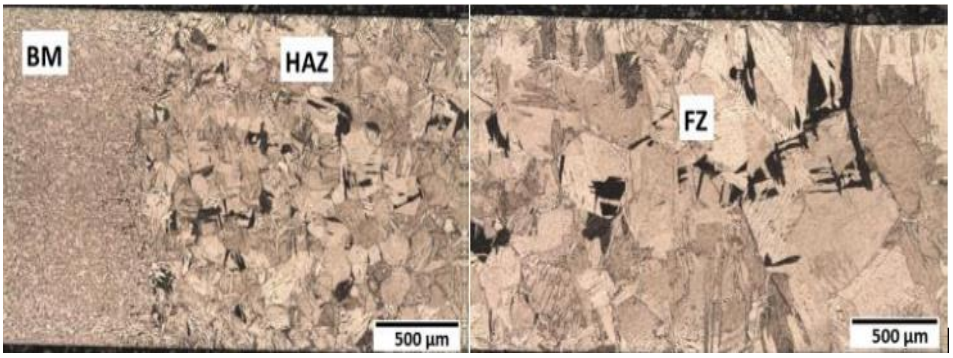
Weld bead surface	Primary gas flow rate l/min.	Secondary gas flow rate l/min.	Bottom purging gas flow rate l/min.
 	10	15	5
	15	20	10
	15	25	10

Şekil 8. Farklı Hızlarda Üflenen Argon Gazı ile Korunan TIG Kaynaklarında Kaynak Metalinin Renkleri

TIG yöntemi ile alın kaynak birleştirilmesi yapılmış ticari saf titanyumun kaynak bölgesi Şekil 9'da ve optik mikroyapı ise Şekil 10'da görülmektedir (Pasang, 2017). Mikroyapı Ana metal (BM), Isının tesiri altında kalan bölge (HAZ) ve Kaynak metalinden (FZ) oluşmaktadır. Bu 3 bölgenin metalografik görüntüsü Şekil 10'da görülmektedir.



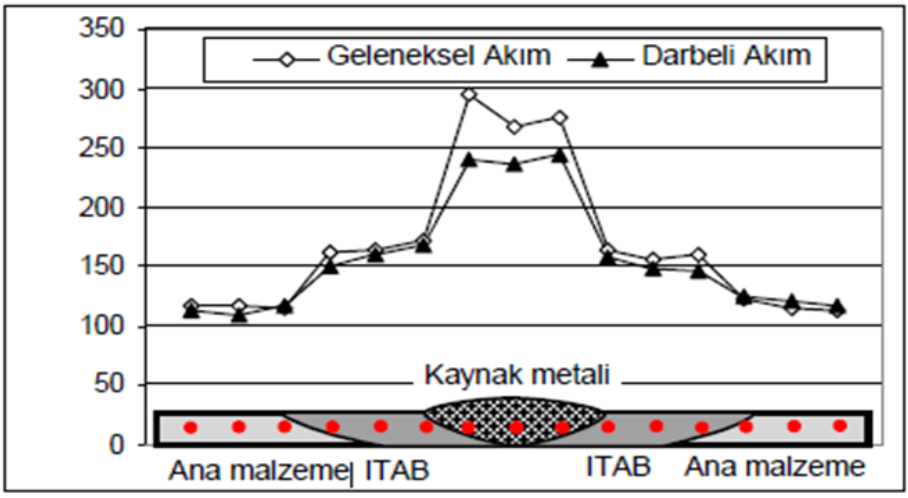
Şekil 9. TIG Alın Kaynağın Makro Görüntüsü



Şekil 10. TIG Kaynak Yöntemi ile Alın Kaynak Birleştirilmesi Yapılmış Olan Ticari Saf Titanyum Metalinin Kesidi. BM: Ana Metal, HAZ: ITAB Ve FZ: Kaynak Metali

Kalın titanyum parçalarının tek pasoda TIG yöntemi ile kaynak edilebilmesi için farklı özelliklerde TIG yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler: (1) Darbeli TIG yöntemi (Niagaj, 2012), A-TIG yöntemi (Kurtulmus, 2019) ve keyhole (Anahtar delikli) TIG yöntemidir (Ahmed, 2005). Bu yöntemlerin ortak özelliği TIG kaynak kaynak dikiş derinliğini arttırmaktır(Lathabai, 2001). Darbeli TIG kaynak yönteminin önemli avantajlarından birisi, darbeli akım kullanılarak düşük ısı girdisiyle mükemmel kaynaklı bağlantılar elde edilebilmesidir. Ancak bu yöntemle dikiş derinliğinde artış %50-70 arasında kalmaktadır (Mishra, 2017). A-TIG kaynak yönteminde MgF2, NaF, AlF3 gibi tozlar kullanılmaktadır. Bu yöntemde dikiş derinliği %300 kadar artabilmektedir. Keyhole TIG yöntemi ile 17 mm kalınlığa kadar parçalar tek pasoda tam nufüziyetli olarak bileştirilebilmektedir (Patil 2019).

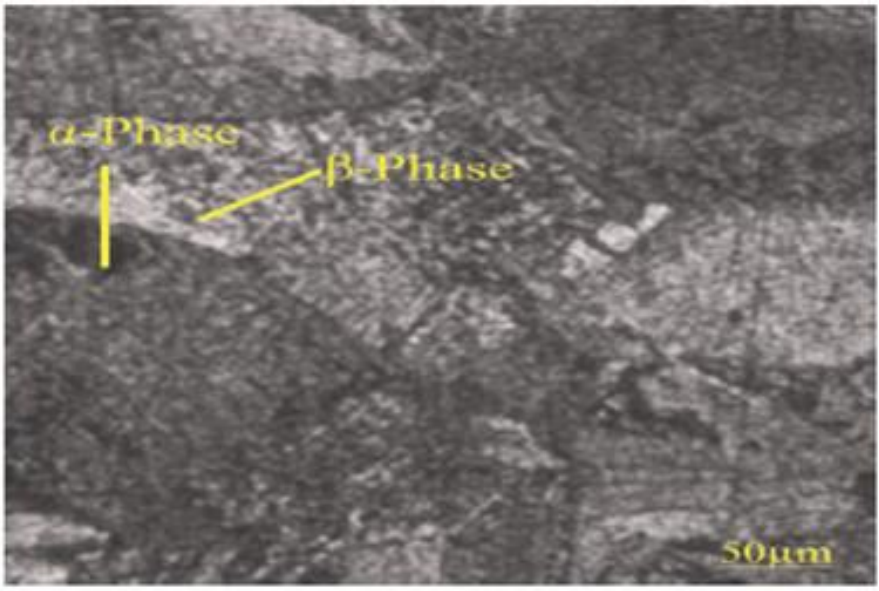
Kaynaklanan ticari saf titanyum metal parçalarının ve kaynakta kullanılan sarf malzemesinin kimyasal bileşimine bağlı olarak kaynak metalinin karbon oranı değişmektedir. Ayrıca kaynak sırasında sıvı metal ortama karşı yeteri kadar korunmazsa sıvı metale O, N veya H atomu girer. Tablo 6'da CP 2 metalinin laser kaynağında arayer elementlerinin değişimini görmekteyiz (Liu, 2011). Kaynak metalinde bütün arayer element miktarı artmış olduğunu görüyoruz. Kaynak metalinin içerdiği arayer atomlarının orannı arttıkça dikişin sertliği ve mukavemeti artar. Şekil 11'de Klasik (geleneksel) TIG ve Darbeli kaynak yöntemi yapılan CP 2 metalinin kesidinde mikrosertlik dağılımını görmekteyiz. Titanyum kaynak metalinin soğuma hızı kaynak metali mikroyapısını etkilemektedir. Normal koşullarda kaynak metali alfa tanelerinden meydana gelmelidir. Ancak soğuma hızına bağlı olarak mikroyapıda farklılıklar olmaktadır. Şekil 12'de TIG kaynağı yapılan CP 2 metalinin dikiş mikroyapısında bulunan beta tanesi görülmektedir. Kaynak edilen ticari saf titanyum metalinin kaynak metalinde ve ITAB bölgesinde tane yapısının çok iri olduğunu Şekil 10'da görülmektedir. Bu iri taneler sertliği ve kaynak mukavemetini düşürmek isteyecektir. Fakat kaynak metalinin içerisinde oluşan asiküler (İğne şeklinde ince) alfa taneleri sertiğin artmasına yardım etmektedir.



Şekil 11. Klasik ve Darbeli TIG Yöntemi İle Kaynak Edilen CP 2 Metalinde Kaynak Kesitinde Sertlik Dağılımı

Tablo 6. Laser Kaynağı Yapılmış CP 2 Metalinde Arayer Element Oranları

BÖLGE	C, ppm	H, ppm	O, ppm	N, ppm
Ana metal	37	10	601	25
Kaynak metali	41	11	651	29



Şekil 12. CP 2 TIG Kaynağında Kaynak Metalinin Mikroyapısı

Farklı araştırmacıların kaynaklı ticari saf titanyum metallerinin çekme deney sonuçları aşağıdaki Tablo 7, 8 ve 9'da görülmektedir. Tablo 7'de kaynak yapılamamış, elektron ışın ve TIG kaynağı yapılmış CP 2 metalinin çekme deney sonuçları görülmektedir. Kaynaklı parçaların akma ve çekme dayanımları ana metalden daha az çıkmıştır. Tablo 8 ve 9'da ise kaynaklı parçaların çekme mukavemetleri ana metalden yüksek olduğu görülmektedir. Bu farklı sonuçlar kaynak metali kimyasal bileşimi ve mikroyapısının mukavemet değerlerini tayin ettiğini kanıtlamaktadır. Tablo 7 ve 8'de kaynaklı parça sünekliğinin (% Uzama) ana metalin sünekliğinin altında kaldığını göstermektedir. Bütün çalışmalar kaynaklı parça sünekliğinin ana metalden daha az olduğunu bildirmektedir. Kaynak bölgesi tokluğunun süneklik gibi ana metal tokluğu altında kaldığı Şekil 13'de görülmrektedir.

Tablo 7. TIG ve Elektro Işın Yöntemi ile Kaynak Edilmiş CP 2 Metalinin Çekme Deney Sonuçları Ve Sertlik Değerleri (Gupta, 2018)

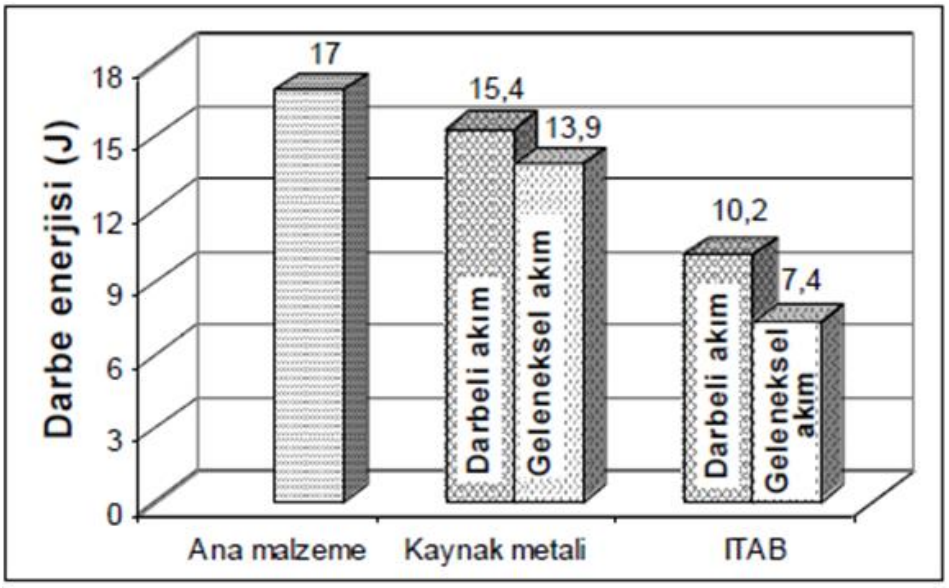
METALİN HALİ	Akma Mukavemeti MPa	Çekme mukavemeti, MPa	% Uzama
Kaynaksız hal	373	435	31
Elektron ışın kaynaklı	328	389	30
TIG kaynaklı	278	361	30

Tablo 8. Klasik TIG ve Darbeli TIG Kaynak Yöntemi ile Kaynak Edilmiş CP 2 Metalinin Çekme Mukavemet Ve % Uzama Değerleri

METALİN HALİ	Çekme mukavemeti, MPa	% Uzama
Kaynaksız hal	290	32
Klasik TIG	293	21
Darbeli TIG	294	26

Tablo 9. TIG Yöntemi ile Kaynak Edilmiş Bazı Ticari Saf Titanyum Metallerinin Çekme Mukavemeti ve Sertlik Değerleri (URL-1)

MAL-ZEME CİNSİ	Ana Metal Çekme muka-vemeti, MPa	Ana Metal Vickers Sertlik	Kaynak Metali Çekme muka-vemeti, MPa	Kaynak metali Vickers Sertlik
ASTM 2	375	145	419	155
ASTM 3	530	185	562	218
ASTM 12	401	153	405	178



Şekil 13. Farklı TIG Kaynak Yöntemleri ile Birleştirilen CP 2 Metalinin Tokluk Özellikleri

SONUÇ

Ticari saf titanyum metalleri ve onlara uygulanan TIG kaynak işlemlerini anlatan yayınların incelenmesinden elde edilen genel sonuçları şöyle özetlemek mümkündür:

(1) Titanyum alaşımlarına uygulanan kaynak yönteminin enerji girdisine bağlı olarak kaynak dikiş genişliği, kaynak bölgesinin mikroyapısı ve kaynak mekanik özellikleri değişmektedir.

(2) TIG kaynaklı parçaların mukavemeti dikişe absorbe olan oksijen ile azot atom oranına ve oluşan mikroyapıya bağlı olarak ana metalden az veya çok olabilmektedir.

(3) TIG kaynağı yapılan parçaların sünekliği ve tokluğu ana metalden her zaman düşük olmaktadır.

KAYNAKÇA

Ahmed, N., (2005). New developments in advanced welding, Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Abington, Cambridge.

AWS A5.16/A5.16M (2013). Specification for Titanium and Titanium-Alloy Welding Electrodes and Rods, AWS.

Baeslack, W., Mullins, F., (1982). Phase transformations in a welded near-alpha titanium alloy—IMI 829, Journal of Materials Science Letters, 1: ss. 371–373.

Boyer, R., (2010). Attributes, characteristics, and applications of titanium and its alloys, JOM, 62 (5): ss 21-24.

Brunette, D., Tengwall, B., Textor, M., Thomsen, P., (2001) Titanium in Medicine, Springer Verlag, Heidelberg.

Froes, F., (2015). Titanium : Physical metallurgy, Processing and Applications, ASM, Materials Park.

Gupta, R., Kumar, V., Xavier, X., (2018). Mechanical Behavior of Commercially Pure Titanium Weldments at Lower Temperatures, Journal of Materials Engineering and Performance, 27: ss. 2192-2204.

Harwig, D., Fountain, C.,. Ittiwattana, W., Castner, H., (2000). Oxygen Equivalent Effects on the Mechanical Properties of Titanium Welds, Welding Journal, 79: ss. 305-316.

İçdem, C., (2007). Saf titanyum, Ti6Al4V ve Ti6Al7Nb alaşımlarının akışkan yatak ortamında termal oksidasyonu, İTÜ Yüksek Lisans Tezi.

Jaffee RI, Promisel NE., (1970). The Science Technology and Application Of Titanium, Pergamon Press, Oxford.

Karpagaraj, A., Sivashanmugam, N., Sankaranarayanasamy, K., (2015). Some studies on mechanical properties and microstructural characterization of automated TIG welding of thin commercially pure titanium sheets, Materials Science and Engineering, A640: ss.180-189.

Kaya, Y., Durgutlu, A., Kahraman, N., Gülenç, B., (2011). Titanyum Levhaların TIG Kaynağı ile Birleştirilmesinde Akım Türünün Mikroyapı ve Mekanik

Özellikler Üzerine Etkisi, Paper presented at 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey.

Kofstad, P., (1988). High temperature corrosion. Elsevier Applied Science Publishers Ltd., London.

Komotori, J., Lee, B., Dong, H., Dearnley, P., (2001). Corrosion Response of Surface Engineered Titanium Alloys Damaged by Prior Abrasion,Wear, 251: ss. 1239-1249.

Kurtulmus, M., Yukler, I., Dogan, E., (2019). Activated flux TIG welding of nonferrous metals, Indian Journal of Chemical Technology, 26: ss. 164-169.

Lathabai, S., Jarvis, B., Barton, K., (2001). Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium, Materials Science and Engineering, A299: ss. 81–93.

Leyens, C., Peters, M., (2003). Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, Weinheim.

Li, X., Xie, J., Zhou, Y., (2005). Effects of oxygen contamination in the argon shielding gas in laser welding of commercially pure titanium thin sheet, Journal of Materials Science, 40: ss. 3437-3443.

Liu, H., Nakata, K., Yamamoto, N., Liao, J., (2011). Mechanical properties and strengthening mechanisms in laser beam welds of pure titanium, Science and Technology of Welding and Joining, 16: ss. 581-585.

Mishra, D., Manjunath, A., Parthiban, K., (2017). Interpulse TIG welding of Titanium Alloy, Indian Welding Journal, 50: ss. 56-71.

Murthy, K., Sundaresan, S., (1998). Phase transformations in a welded near-α titanium alloy as a function of weld cooling rate and post-weld heat treatment conditions, Journal of Materials Science, 33: ss. 817–826.

Nakamura, K., Iida, T., Nakamura, N., Araike T., (2017). Titanium Sponge Production Method by Kroll Process at OTC, Materials Transactions 58 : ss. 319-321.

Nemani, A., Ghaffari, M., Saleh, N., Tazikeh, H., (2017). Improving the Tribological Behavior of Commercially Pure Titanium Using TIG Surface Alloying, Journal of Environmental Friendly Materials, 1: ss. 26-31:

Niagaj, J., (2012). Peculiarities of A-TIG welding of titanium and its alloys, Archives of Metallurgy and Materials, 57: ss. 39-44.

Oğuz, B., (1990). Demir dışı metallerin kaynağı, Oerlikon Yayını, İstanbul.

Otani, T., (2007). Titanium Welding Technology, Nippon Steel Technical Report No. 95.

Ouchi, C., Iizumi, H., Mitao, S., (1998). Effects of ultra-high purification and addition of interstitial elements on properties of pure titanium and titanium alloy, Materials Science and Engineering A, 243: ss. 186 – 195.

Pasang, T., Tao, Y., Azizi, M., Kamiya, O., Mizutani, M., Misiolek, W., (2017). Welding of titanium alloys, paper presented at International Conference on Precision Machinery and Manufacturing Technology 2017, Kending, Pingtung, Taiwan, May 19-21, 2017.

Patil, H., Patel, D., Patil, C., (2019). Characterizations of TIG welded joints of unalloyed commercially pure Titanium Gr-2 for weld process parameters, Frattura ed Integrità Strutturale, 48: ss. 377-384.

Sutherlin, R., (2007). The Welding of Titanium and Its Alloys, Welding Alloys, 86(12): ss. 40-45.

Şirin, S., Sarı, N., Kaluç, E., (1997). Titanyum ve alaşımlarının kaynağı 1, Makine Magazin, 19: ss. 62-70.

Şirin, S., Sarı, N., Kaluç, E., (1997). Titanyum ve alaşımlarının kaynağı 2, Makine Magazin, 20: ss. 52-62.

Vinoth, A., Prabu, L., Gokul, B., Ajith, A., (2016). Effect of Shielding Gas on Titanium CP (Gr- 2) by using Gas Tungsten Arc Welding, International Journal of Engineering Research and Technology, 5: ss. 294-300.

Weglowski, M., Błacha, S., Phillips, A., (2016). Electron beam welding – Techniques and trends – Review, Vacuum, 130: ss. 72-92.

Yan, M., Xu , W., Dargusch, M., Tang, H., Brandt, M., Qian, M., (2014). Review of effect of oxygen on room temperature ductility of titanium and titanium alloys, Powder Metallurgy, 57: ss. 251-257.

Yukler, İ. Kurtulmus, M., Dogan, E., (2018). Angular distortion in butt arc welding, International Journal of engineering science and application, 2: ss. 137-144.

Yücel, M., (2018). Dünyada ve Türkiye'de Titanyum, MTA Raporu, İstanbul.

İNTERNET KAYNAKLARI

URL-1 https://www.kobelco.co.jp/english/titan/files/details.pdf (E.T. 01.01.2018)

BÖLÜM 7
VİNÇ SİSTEMLERİNDE KULLANILAN KANCALARIN TASARIMI, İMALATI VE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Ömer ŞENGÜL[1], Dr. Öğr. Üyesi Menderes KAM[2]
[1]Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce / TÜRKIYE
[2]Düzce Üniversitesi, Dr. Engin PAK Cumayeri MYO, Düzce / TÜRKIYE

Öz: Yük tutma elemanlarından olan kancalar, vinç sistemlerinde kullanılan son derece önemli bir makine elemanıdır. Kancalar, işlev bakımından birbirlerinden çok farklı özellikler gösterebilmektedirler. Vinçler çalışma esnasında, yükleme ve boşaltma durumlarında birçok risk de oluşturabilmektedir. Bu durumda çok tehlikeli hatta ölümle sonuçlanan iş kazalarına bile neden olmaktadır. Tasarımı ve imalatı yapılan kancalar, birbirlerinden çok farklı ve çeşitli olduklarından dolayı meydana gelen arızaların sebepleri de tespit edilememektedir. Bazı özel tasarımı yapılan kancalarında karmaşık birçok mühendislik problemleri çözülememektedir. Bu çalışmada, vinç sistemlerinde kullanılan yük tutma elemanlarından olan karmaşık yapıdaki kancaların çeşitli tasarımı, imalatı ve sonlu elemanlar yöntemi ile çözümlenmesi (malzemede meydana gelen kritik gerilimleri deformasyon biçimlerini ve güvenirlilikleri) incelenmiştir. Sonuç olarak, herhangi bir tasarım yapıldığı zaman imalatı yapılmadan önce sonlu elemanlar yöntemi ile imalatta ortaya çıkabilecek hatalar önlenmiş olacaktır. Bu sayede, maliyetten avantaj sağlanacağı ve ortaya çıkabilecek iş kazalarının da önceden saptanabileceği düşünülmektedir.

GİRİŞ

Yük kancaları, vinçler gibi kaldırma sistemlerinde yükün güvenli bir şekilde asılmasını ve kaldırılmasını sağlayan makina elemanlarıdır.

Günümüzde çok yüksek ağırlıklara sahip yüklerin kullanıldığı denizcilik sektörü, gemi yük taşımacılığında gemi içindeki ambar bölümlerinin kapaklarını açıp/kapamada, inşat sektöründe, madencilik sektörlerinde ve daha birçok alanda kancalar kullanılmaktadır (Adams ve Askenazi 1998).

Günümüzde kullanılan yük kancalarının ve özel tasarımları yapılmış kancaların geometrik yapıları ve kesitleri çok karmaşık olarak yapılmaktadır. Özellikle kancaların gövde kısımları aşırı eğri şeklindedirler ve bu yapıların mukavemet hesap çözümlemede gerçek durumdan çok farklı değerde çıkmakta ve güvenilir olmayan sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu nedenle kancaların yüklenme ve boşaltma durumlarındaki gerilmeleri ve kancanın bazı bölümlerinde meydana gelen gerilme birikmelerini ve kritik noktalarını analitik yöntemlerle hesaplamak çok zordur. Bazı durumlarda analitik hesap yöntemleri de yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda, sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method-FEM), karmaşık mühendislik hesaplamalarının hassas ve doğru olarak çözümlenmesinde etkin olarak kullanılan bir sayısal yöntemdir (Karabulut, 2010).

Bu çalışmada, kaldırma elemanlarının en önemli parçalarından olan kancalar ile ilgili literatürde yapılmış; çeşitli kanca tasarımları, bu kancaların imalat işlemleri ve sonlu elemanlar yöntemi ile nümerik olarak çözümlenmesi incelenmiştir. Ayrıca, analitik hesaplama yöntemleri ile çözümleme işlemi yapılamayan farklı kanca türlerinin statik ve dinamik yükleme koşullarında oluşacak gerilmeleri, kancanın kritik noktalarındaki gerilim değerlerinin iyileştirilme gereksinimleri ve analiz türlerindeki teoremler incelenmiştir.

KANCALARIN TASARIMI, ÜRETİM YÖNTEMLERİ ve SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Teknolojik gelişmelerle birlikte ülkelerin birbirleri ile olan rekabetleri tasarım ve imalatta büyük yenilikler oluşturmuştur. Yük taşıma boşaltma gibi görevleri olan çeşitli vinç türleri vardır. Bu vinçler için artık eskisi gibi standart kancalar kullanılmamaktadır (Karabulut, 2010). Bu makine elemanlarının modellenmesi için SOLIDWORKS, CATIA gibi tasarım programları kullanılmaktadır. Tasarımı yapılan modelin sonlu elemanlar yöntemi ile nümerik mühendislik hesaplamaları; ANSYS, ALGOR, ABAQUS, NASTRAN, SAP 2000 ve COSMOS analiz programları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Kancaların tasarımları, imalatları ve analizleri çeşitli yöntemlerle yapılmaktadır.

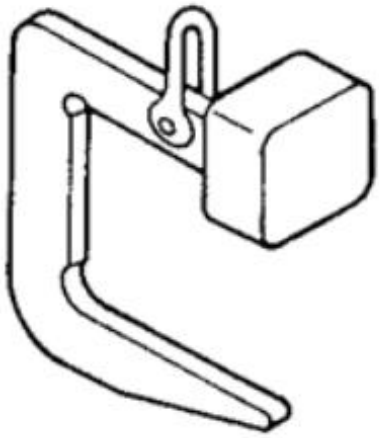
Kancaların Bilgisayar Destekli Tasarımı

Kaldırma makinelerinin en önemli makine elemanı olarak kullanılan kancalar, yapılan işleve göre isimler alırlar. Kancaların tasarımları yapılırken işlevlerine dikkat edilmektedir.

Kanca tasarımı yapılırken birçok tasarım programı kullanılmaktadır. Günümüzde tasarımı yapılan kancalar genellikle SOLIDWORKS ve CATIA yazılımları kullanılarak tasarımları yapılmaktadır. Yapılan çalışmalarda, Sascha (2002) C

kanca tasarımı, vinç kancalarına tutturulmuş ağır yükleri taşımak ve vinç kancalarını dengelemek için yapılmıştır. Modelin tasarımı CATIA programı ile yapılmıştır. Şekil 1, Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da literatür çalışmalarında tasarımı yapılmış kancalar gösterilmiştir.

Şekil 1'de Sascha (2002), C-Tipi yük kaldırma kancaları, CATIA tasarım programı ile tasarlanmıştır. Bu tip kancalar ağır rulo şeklindeki ürünleri ve elektrik bobinlerini kaldırmak için kullanılmaktadır.



Şekil 1. C -Tipi Kanca Yük Kaldırma Kanca Tasarımı (Sascha, 2002)

Şekil 2'deki Vanporia, Pandyo ve Kaisha (2016) tarafından özel tasarlanmış vinç kancaları, endüstride ağır yükleri kaldırmak için kullanılan bir modeldir. Bu tip kancalar tel halatlarla vince monte edilen bir kanca türüdür.



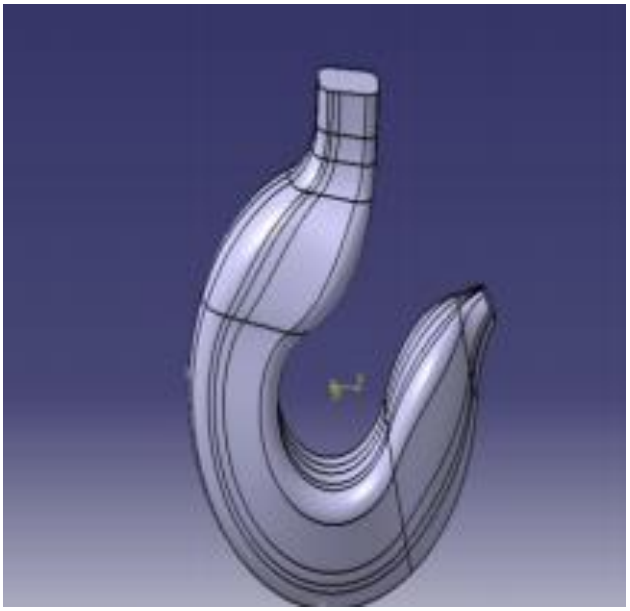
Şekil 2. Özel Vinç Kancası Tasarımı (Vanporia, Pandyo Ve Kaisha, 2016)

Şekil 3'te Nakka, Florence, Maisuria ve Patel (2017) tarafından tasarımı yapılmış vinç kancası, zincir veya baklalar yardımıyla yükü kaldırmak için kullanılır. Bu kanca tipinde çok hassas bileşenler vardır ve kaldırma anında çok çabuk kırılmaya maruz kalmaktadır. Bu tip kanca da CATIA tasarım programı ile modellenmiştir.



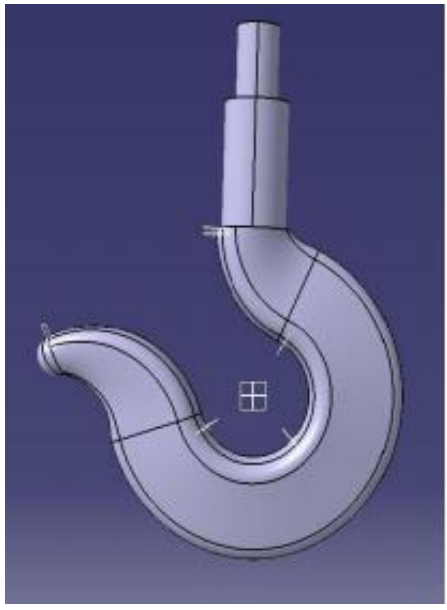
Şekil 3. Özel Vinç Kancası (Nakka, Florence, Maisuria Ve Patel, 2017)

Şekil 4'te Pawar, Wagh ve Munde (2019) tarafından tasarımı yapılmış vinç kancası, büyük vinçlerde çok ağır yüklerin kaldırılması için tasarlanmış bir makine elemanıdır. Bu kanca SOLIDWORKS tasarım programı ile modellenmiştir.



Şekil 4. Trapez Kesitli Vinç Kancası (Pawar, Wagh ve Munde, 2019)

Şekil 5'te gösterilen tipik vinç kancası (Reddy, 2015) genel endüstriyel amaçla kullanılan bir türdür. Bu tasarım SOLIDWORKS yazılımı ile yapılmıştır



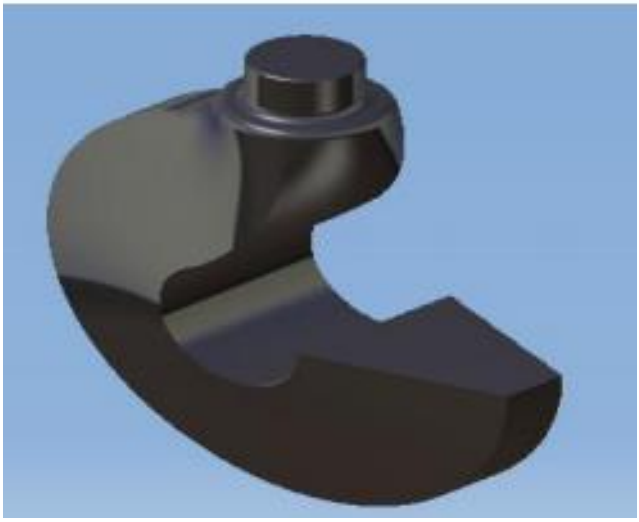
Şekil 5. Özel Tasarlanmış Kaldırma Yük Kancası (Reddy, 2015)

Şekil 6'da gösterilen özel trapez kesitli vinç kanca modelidir. CATIA yazılım programı ile modellenmiştir.



Şekil 6. Özel Tasarlanmış Vinç Kancası (Reddy, 2015)

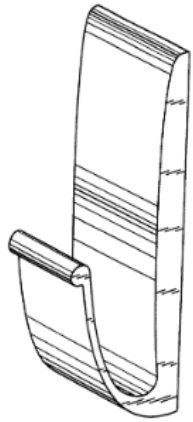
Şekil 7'de özel bir tel halatlı vinç kanca (Reddy, 2015), tasarımı CATIA tasarım programı ile modellenmiştir. Şekil 8'de CATIA tasarım programı ile modellenmiş vinç kancası gösterilmiştir. Şekil 9'da ise Tarale, Dalavir ve Patil (2017) tarafından dekoratif amaçlı kanca tasarımı SOLIDWORKS tasarım programı ile yapılmıştır.



Şekil 7. Trapez Kesitli Vinç Kancası (Reddy, 2015)



Şekil 8. Özel Tasarlanmış Vinç Kancası (Tarale, Dalavir ve Patil 2017)



Şekil 9. Dekoratif Kanca (Sascha, 2002)

Kanca Malzemeleri ve Kancaların Üretim Yöntemleri

Kancaların imalatı için kullanılan çeşitli malzemeler ve üretim yöntemleri vardır. Literatürde farklı türde tasarımı ve imalatı yapılmış kancalar için St-37, St-52, St-70, Alüminyum 6061 ve AISI 4140 ıslah çeliği malzemeler kullanılmıştır. Üretim yöntemi olarak da kalıpta veya serbest dövme yöntemi, sıcak presleme yöntemi, birleşik kalıplama yöntemi ve döküm yöntemi kullanılmıştır (Angkasa, Prastya, Puspitasari, Aminnudin ve Phase 2020). Tablo 1'de kancalarda kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Kancalarda Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri [10-15-17]

Malzeme	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HB)
St-37 Çeliği	340-470	215	25	125
St-52 Çeliği	490-630	255	21	143
St-70 Çeliği	340-470	345	10	210
AISI 4140 Çeliği	900-1100	750	12	190
Alüminyum 6061	55-124	103-218	26	65

St-37 yapı çeliği günümüzde pek çok makine elemanının imalatında kullanılmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda Reddy (2002), basit bindirmeli yapıştırma bağlantılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzeme sıcak üretim işlemi yapıldıktan sonra tekrardan işleme alınarak soğuk çekme işlemlerinde kullanıma elverişlidir (Reddy 2002), Bu malzemenin hem kaynaklı bağlantılarda hem de sökülebilir bağlantı elemanları ile uygun birleştirme işlemi yapılmaktadır. Bu gibi özelliklerden dolayı da yapılan yeni çalışmalarda inşaat sektöründe kullanım sıklığının arttığı görülmüştür.

St-52 yapı çeliği, endüstriyel yapılarda, bina yapımında, köprü yapımında, gemi yapımında ve denizde yapılan dalgakıranda yaygın olarak kullanılmaktadır.[1] Daha çok inşaat sektöründe ve yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılır. Yapılan son çalışmalarda, Saraç (2020), St-52 çeliği ile kompozit malzeme yaparak bu yeni kompozit malzeme ile katmanlı şekilde üretilen ürünlerde iç kısmının mukavemeti çok yüksek çelik ile dış kısmını da bu kompozit malzeme ile üretim yapmıştır. Güncel literatür çalışmalarında St-52 çeliğini lamine ile kompozit yaparak katmanlı olarak üretimlerde kullanılmıştır (Saraç 2020). St-70 yapı çeliği yaygın olarak perçin, özel cıvata, kama ve iyi mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılır. Son yapılan çalışmalarda (Angkasa, Prastya ve Aminnudin, 2020 syf 53-60), elektrik ark korumalı elektrotlar kullanılarak kaynak yapılmış ve bu kaynak sonrasında ısıl işlem uygulanmıştır. Isıdan etkilenen bölgedeki kırınım fazı analizi sonuçlarından, gerilme giderme tavlama işleminde sıcaklıktaki artışla birlikte tane boyutunun gelişiminin düzenli olarak arttığını saptamışlardır.

Alüminyum 6061; iyi korozyon direncine sahip, yaygın olarak savunma sanayi, uçak sanayi, gemi inşaat sektöründe kullanılmaktadır. [2] Termoform vakum kalıplama yöntemi, düşük sayıda imalatı, otomotiv malzemesi, uçak yedek parçaları, gemi yapımı için yedek parçaları, hidrolik pistonlar gibi uygulama alanları mevcuttur. Ayrıca çok fazla mukavemet gerektirmeyen kanca imalatında da kullanılmıştır (Angkasa, Prastya ve Aminnudin, 2020 ss. 53-60).

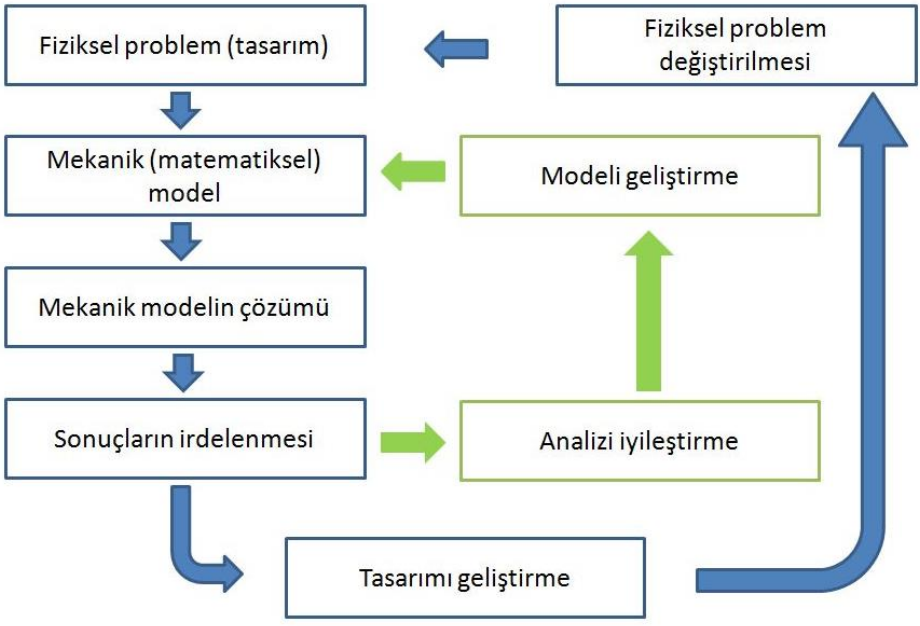
AISI 4140 çeliği, yüksek çekme dayanımlı yüksek gerilmeler altında çalışan miller, dişliler ve makine parçalarında kullanılan, sanayide ıslah çeliği olarak bilinen malzemedir. Yapılan çalışmalarda, bu malzemelerden imal edilen millere ısıl işlemler uygulanmış ve dinamik davranışları incelenmiştir (Tripathi ve Jashi, 2013).

[1] https://www.seykoc.com.tr/icerik/6061?dil=tr SGT: 29.10.2020
[2] (https://www.seykoc.com.tr/icerik/6061?dil=tr SGT: 29.10.2020

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yönteminde, nümerik hesaplamalar olduğu için hızlı bir sonuç elde etmek için bilgisayar ortamında analizlerin yapılması gerekmektedir. Analiz için özel yazılımlar bilgisayar ortamında, sonlu elemanlar yöntemi için hız ve güvenilir sonuç elde edilmesini sağlamaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminde karmaşık geometriye sahip elemanların küçük elemanlara bölünerek bunların yapısal özelliklerinin analizleri doğruluk derecesini belirlemektedir. Analizi yapılacak modelin geometrik yapısı ve işlevsel özelliklerine göre sonlu eleman seçilir. Karmaşık sınır şartlarına sahip sistemlerde, düzgün yapıda olmayan elemanlarda, lineer ve lineer olmayan problemlerin çözümlenmesinde de doğru sonuçlar vermektedir (Tripathi ve Jashi, 2013).

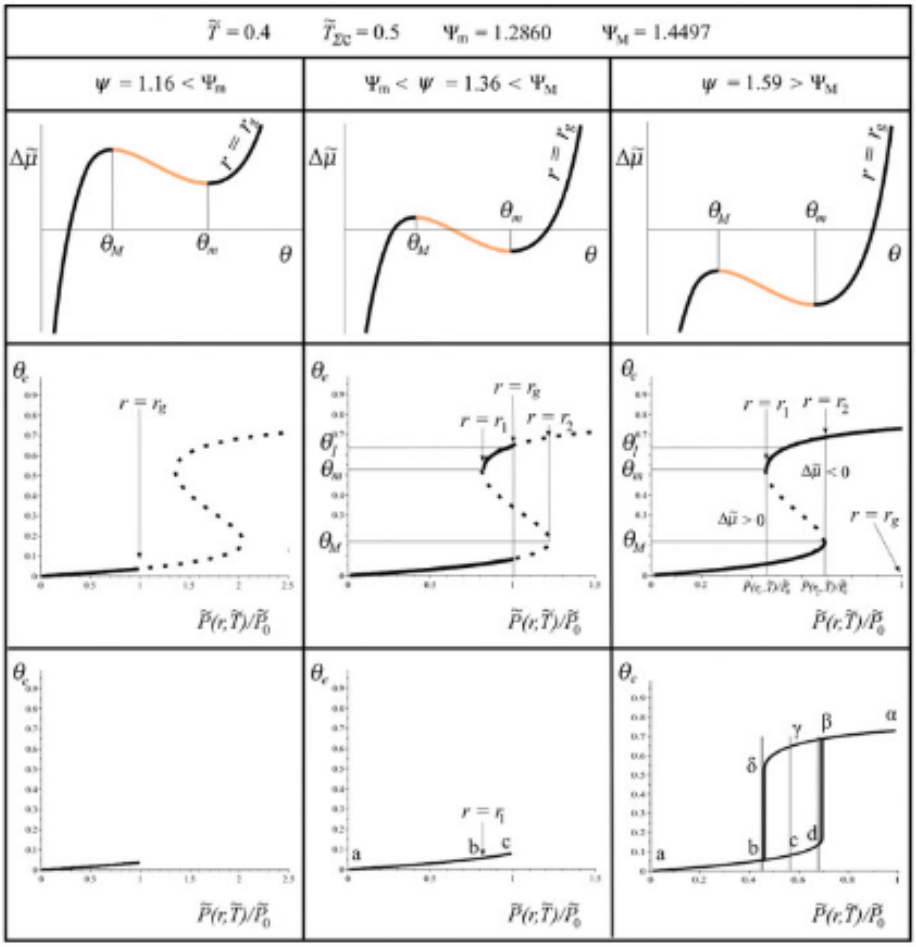


Şekil 10. Sonlu Elemanlar Yöntemi Çözüm Aşaması[3]

Şekil 10'da ki şemada görüldüğü gibi bir tasarıma analiz yapımına başlarken belirli aşamalar gerekmektedir. Bunların en başında tasarımdaki problem belirlenmedir. Buradaki problem bizim yapacağımız analizin çeşidini de belirlememizi sağlayacaktır. Saptanan problemin matematik mekanik sistemler içinde belirleme-

[3] https://artunbotke.com/2012/05/09/sonlu-elemanlar-analizi-fea-nedir-2-teori/ SGT: 29.10.2020

miz bize yapılacak mekanik çözüm yönteminde hangi prensiplerle sonuca varacağımızı sağlayacaktır. Mekanik sonuçlar irdelendikten sonra meydana gelebilecek hataları saptayarak tasarımda düzeltmeler veya tasarımda gelişmeler yapmamızı sağlayacaktır. Matematik modellemeden kaynaklanan bir sonuç çıkması durumunda matematik modelleme de düzeltmelere gidilmelidir. Düzeltilen matematik modelin tekrar çözümü yapıldıktan sonra tasarımda da düzeltmeye gidilirken, tasarımda bir düzenlemeye gidememiz durumunda fiziksel problemde (Tasarımda) değişiklik yapılmalıdır. Bu döngüsel sistem yapılacak imalatta optimum düzeyde verim sağlamış olacaktır.



Şekil 11. Nümerik Analiz Yöntemleri[4]

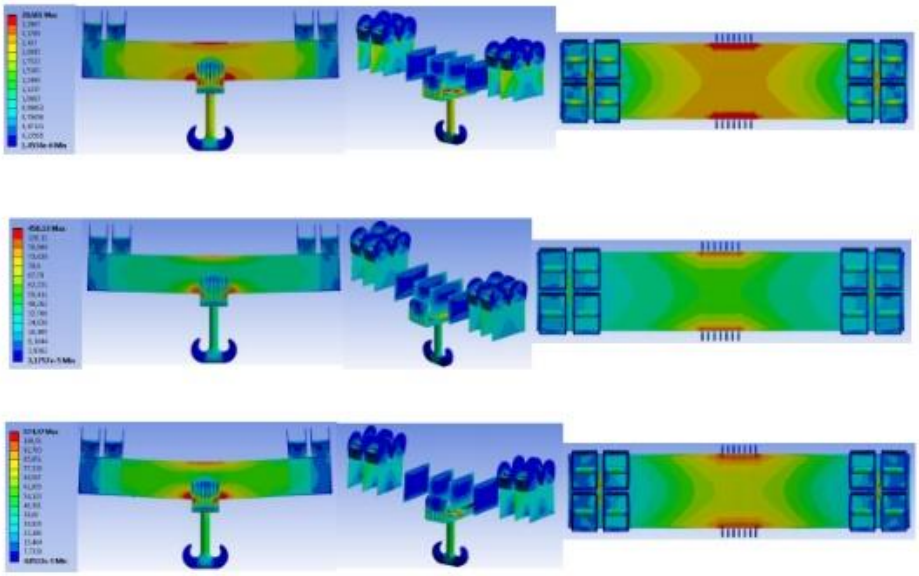
[4] https://www.engr.uvic.ca/~mech410/lectures/FEA_Theory.pdf (SGT: 29.10.2020

Nümerik hesaplama, yani sayısal çözümleme işlemi matematiksel modellerin sayısal olarak çözümlerini elde etmek için kullanılır. Özellikle karmaşık problemlerin çözümü için kullanılır. Sonlu elemanlar analizi (Finite Element Analysis-FEA), sonlu farklar analizi, diğer birçok nümerik analiz çözümleri ve birçok mühendislik alanlarında kullanılmaktadır (Gerdemeli, Kurt ve Akgün, 2013). Bilgisayar destekli tasarım aşamasında yapılan modellerin nümerik hesaplamalar yardımı ile yapılan tasarımı doğrulama işlemi gerçekleştirilebilir, geometrik ve hatta topoloji optimizasyonu ve çeşitli optimizasyon işlemlerini de çözümleyebilmektedir (Tripathi ve Jashi, 2013).

Sonlu Elemanlar Analizi Yapılmış Kancalar

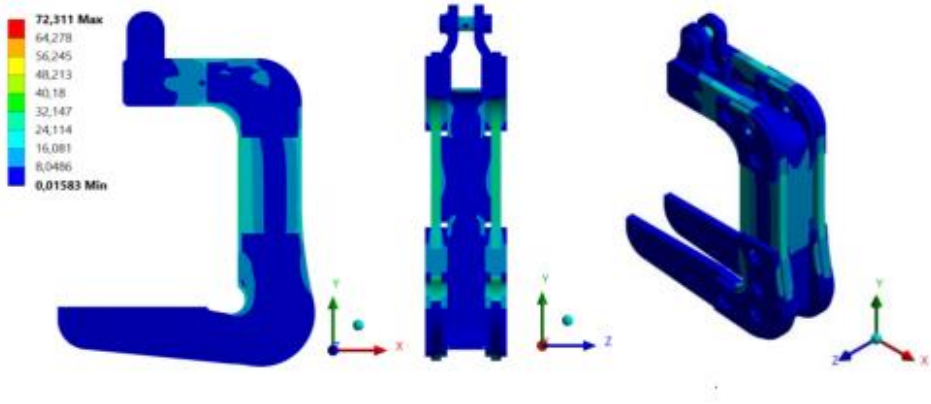
Kancaların statik ve dinamik yükler altında meydana gelen gerilme değerleri ve nümerik çözümleri günümüzde yaygın olarak ABAQUS ve ANSYS analiz programları ile yapılmaktadır (Gerdemeli, Kurt ve Akgün, 2013). Geometrik olarak doğrusal olmayan yapılar için indirgenmiş sıralı modeller türetmek için de yaklaşık yirmi yıldan beri, sonlu bir elemanda önceden belirlenmiş yer değiştirmelerin statik ve dinamik uygulamalarında da sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır (Gerdemeli, Kurt ve Akgün, 2013). Sonlu elemanlar analizi ile ilgili bazı çalışmalar incelenmiş ve Şekil 12, Şekil 13, Şekil 14, Şekil 15, Şekil 16, Şekil 17, Şekil 18'de verilmiştir.

Şekil 12'de yapılan çalışmada (Angkasa, Prastya ve Aminnudin, 2020 syf 53-60), vinç kancası incelenmiştir. Bu çalışmada vincin hareket esnasında kancada statik ve dinamik yüklemelerde meydana gelen gerilmeler saptanmıştır. Elde edilen gerilme değerleri, analitik hesaplamalardan elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu değerler birbiri ile örtüşmüştür.



Şekil 12. Sayısal Çözümleme Yöntemi ile Vinç Kanca Analizi (Angkasa, Prastya ve Aminnudin, 2020)

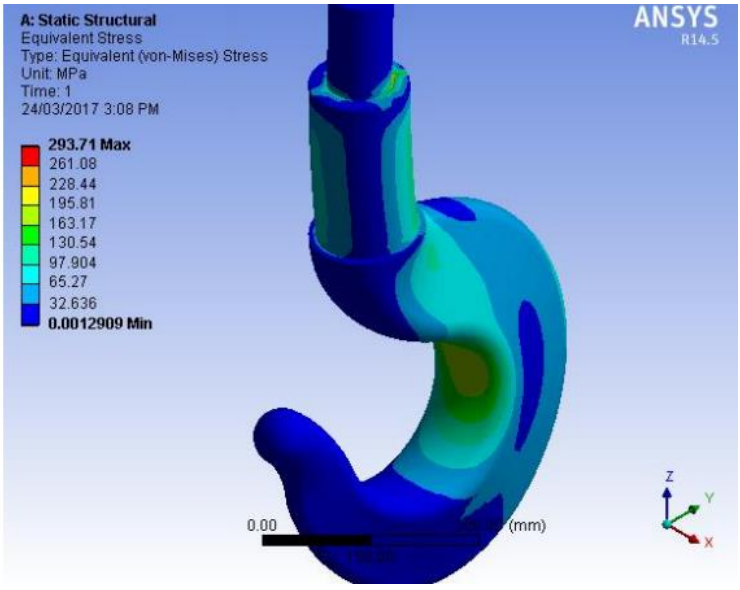
Şekil 13'de yapılan çalışmada (Lengvarsky, Mantic ve Hunady 2020), özel C-kanca türü tasarımı yapılmış bu özel kancada dinamik yükleme şartları altında malzemenin yorulma analizi ve kancanın ömür hesaplamaları sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır.



Şekil 13. C-Tipi Kancanın Statik Analizi (Lengvarsky, Mantic Ve Hunady 2020)

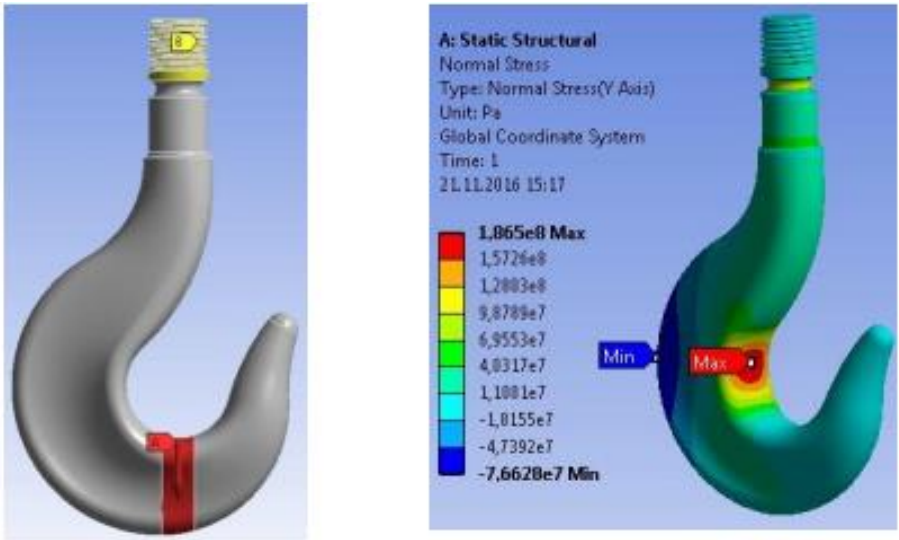
Şekil 14'de yapılan çalışmada (Khan, Kardile, Pravin, Hakane, Gore ve Mahajan, 2017), gri döküm, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çeliklerde, yapısal çelik malzeme verileri kullanılarak farklı yükleme koşullarında işlem yapılmıştır.

Bu farklı statik ve dinamik yüklemeler altında oluşan gerilme değerleri ve gerilmelerin nerelerde biriktiği sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir.



Şekil 14. Özel Vinç Kancası (Khan, Kardile, Pravin, Hakane, Gore Ve Mahajan, 2017)

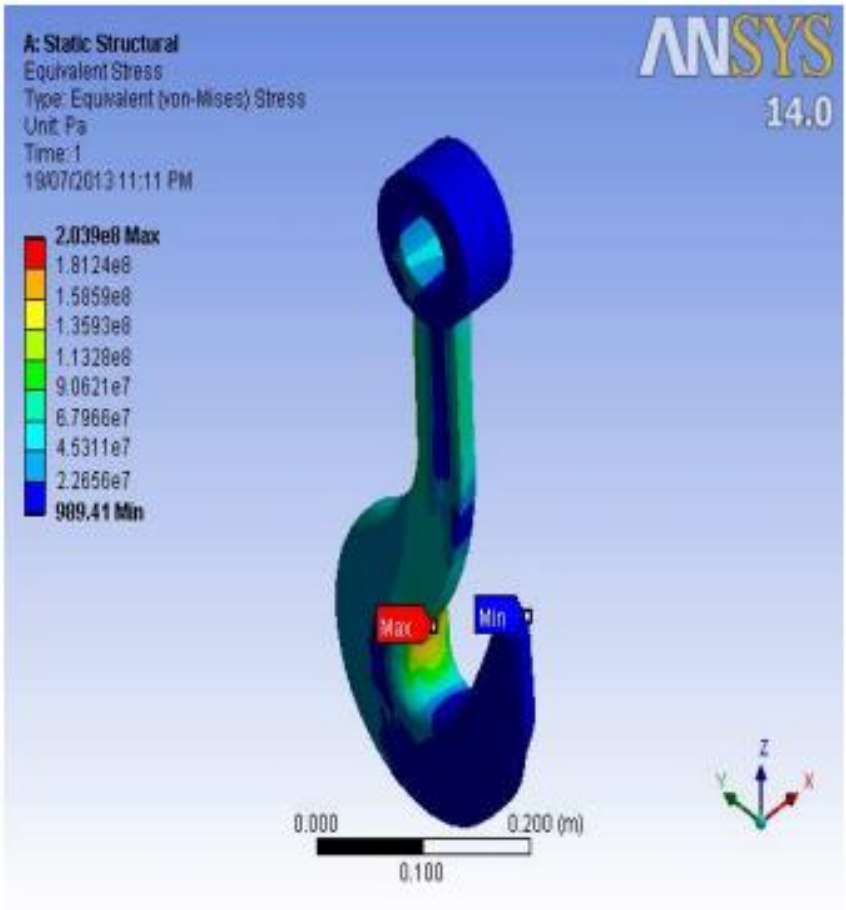
Şekil 15'te yapılan çalışmada (Onur, 2018), 50 KN kaldırma kapasiteye sahip bir kaldırma kancasının farklı malzemelerdeki statik yükleme koşulları altındaki gerilme değerleri ve kritik noktalar sonlu elemanlar analizi ile belirlenmiştir. Bu kritik noktaların gerilme değerleri eğri kirişler teorisi ile kıyaslanmıştır.



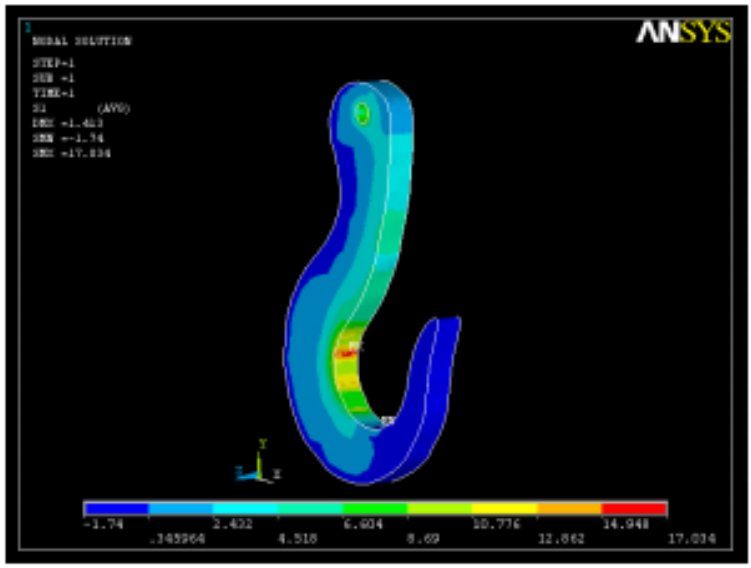
Şekil 15. Özel Yük Kancası (Onur. 2018)

Şekil 16'da yapılan çalışmada (Tripathi ve Jashi 2013), vinç kancasının gerilim dağılımları incelenmiştir. Winkler-Bock teorisi ile gerilim değerinin ölçülmesi için sonuçlar sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 17'de çalışmada Uddanwadiker (2011), akrilik malzemesi verileri kullanılarak statik ve dinamik yükleme koşulları altında malzemedeki çekme gerilmeleri ve eş değer gerilmelerin hesaplamaları yapılmıştır. Yükleme esnasında kancadaki gerilim birikmesi olan kısımlar belirlenmiş ve tasarımda iyileştirmeler yapılmıştır. Modelim sonlu elemanlar analizi ile ömür hesabı yapılmıştır.

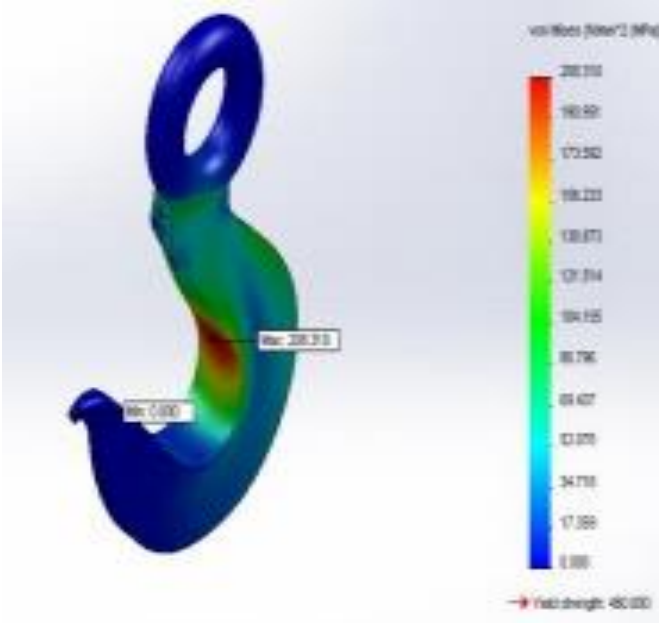


Şekil 16. Trapez Kesitli Vinç Kancası (Tripathi Ve Jashi 2013)



Şekil 17. Özel Vinç Kancası (Uddanwadiker, 2011)

Şekil 18'de Abergaley ve Purohit (2013) tarafından yapılan çalışmada, statik ve dinamik yükleme koşullarında kancada meydana gelen gerilme değerleri incelenmiştir. Ayrıca, kancadaki deformasyon bölgeleri incelenmiş ve bu bölümlerde meydana gelecek arızaların giderilmesi için modelde iyileştirmelere gidilmiştir.



Şekil 18. Özel Vinç Kancası (Abergaley Ve Purohit, 2013)

Literatürde yapılan çalışmalarda çeşitli işlevlere ve modellere sahip kanca tasarımları incelenmiş, bu çalışmalarda genel olarak yapı çeliği, ıslah çeliği, alüminyum ve akrilik malzemeleri kullanılmıştır.

Sonlu Elemanlar Analizi ile yükleme koşullarında malzemedeki eşdeğer gerilmeler, gerilmelerin biriktiği noktalar ve malzemede oluşan toplam deformasyon yerleri incelenmiştir.

Yapılan literatür çalışmalarında daha çok kavisli vinç kancaları ve bu kancalarda da hep aynı malzemelerin kullanıldığı sonucuna varılmıştır. Bu yapıdaki kancalar özel yapım vinçlerde maksimum verim sağlayamamaktadır. Lama tipi özel kancaların yapılmasına gerek vardır.

Vinçlerin karmaşık bir geometrileri vardır. Bundan dolayı analitik hesaplamaların yapılamadığı bunun yerine sonlu elemanlar analizi ile nümerik hesaplamaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda, bu numerik analiz hesaplamaları deneysel verilerle kıyaslanmadığı görülmüştür. Bu nedenle, bunun için çalışmalarda deneysel verilerle matematiksel verilerin örtüşmeleri ile ilgili çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Kancaların imalatında çeşitli üretim yöntemleri kullanılmış fakat lama tarzı kancalar ve özel kancalar için lazer kesim, plazma kesim ve talaşlı imalat yöntemlerinin de kullanılmasına gerek vardır.

Kanca malzemelerinde daha çok yapı çelikleri kullanıldığı görülmüştür. Weldox ve hardox tarzı yüksek mukavemetli malzemelerinde kanca imalatı için kullanılmasının ve hatta bu tip malzemelerde dayanımların artması için işlemlerin yapılması gerekmektedir. Bu tip literatür çalışmalarının eksik olduğu tespit edilmiştir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, literatürde yapılan araştırmalarda kancaların tasarımı, üretim yöntemleri ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi incelenmiştir. Elde edilen sonuç ve öneriler maddeler halinde sunulmuştur.

- Yapıların mukavemeti, yük taşıma kabiliyetleri için çok önemli bir göstergedir. Güvenlik açısından kancaların arızalarını azaltmak ve arızanın nerelerden kaynaklandığını saptamak oldukça önemlidir.
- Kancalarda meydana gelen gerilim değerleri ve kancanın bazı bölgelerinde biriken kritik gerilim noktaları belirlenip buralarda iyileştirmelere gidilmelidir.
- Yapılan literatür çalışmalarında daha çok kavisli vinç kancaları ve bu kancalarda da genel olarak aynı malzemelerin kullanıldığı sonucuna varılmıştır.

- Özellikle yük ve kargo taşıma gemilerinin ambarlarını kapatmak için özel tasarımı yapılmış ambar kapaklarını açıp / kapatmak için imalatı yapılan vinçler için özel kancaların tasarımının ve imalatının yapılmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, klasik kancaların bu görevi doğru bir şekilde yerine getiremeyeceği düşünülmektedir. Bu nedenle daha kapsamlı araştırmalar yapılmalıdır. Bu bağlamda, ambar kapaklarını açıp / kapatmak için yapılmış vinçler için özel kancaların tasarımına ve imalatına da ihtiyaç vardır.
- Kanca tasarımı yapılıp sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılarak gerilme değerleri incelenmeli ve yığılma gerilme noktalarının da sonlu elemanlar yöntemi ile saptanıp güvenilir olarak bir imalat yapılmalıdır.
- Yapılan literatür çalışmalarında lama tipi kancaların üretim yöntemleri için alternatif üretim yöntemlerine yer verilmemiştir. Lama tipi kancalarda, plazma, lazer kesim yöntemi ve talaşlı imalat yöntemleri ile de üretim yapılabilir.
- Kanca malzemesi olarak da yapı çeliklerinden olan St-37 ve ıslah çeliklerinden olan AISI 4140 çeliğinin uygun olacağı sonucuna varılmıştır.
- Sonuç olarak, herhangi bir tasarım yapıldığı zaman imalatı yapılmadan önce sonlu elemanlar analizi ile imalatta ortaya çıkabilecek hatalar önlenmiş olacaktır. Bu sayede, maliyetten avantaj sağlanacağı ve ortaya çıkabilecek iş kazalarının da önceden saptanabileceği düşünülmektedir. Ekonomik, uzun ömürlü ve yüksek mekanik özelliklere sahip kanca tasarımı ve imalatının yapılması ile optimum şartlar sağlanmış olacaktır.

TEŞEKKÜR

Düzce Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne BAP-2020.22.01.1124 kodlu projeye katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

ABergaley, A., Purohit, A., Structural Analysis of Crane Hook Using Finite Element Method, International Journal of Science and Modern Engineering (IJISME) ISSN: 2319-6386, Volume-1, Issue-10, September 2013.

Adams, V. Askenazi, A., (1998). Building Better Products with Finite Element Analysis, The USA.

Angkasa, S., Prastya, W.S.B., Puspitasari, A., Aminnudin, A., Phase Identification and Mechanical Properties on Post Weld Heat Treatment of Steel St.70, Key Engineering Materials Vol. 851, pag. 53-60, July 2020.

http://www.steelss.com/Carbon-steel/st37-3u.html. (SGT: 26.10.2020).

Karabulut, S., (2010). Mobilya Köşe Birleştirmelerinde Kullanılan Farklı Bağlantı Elemanlarının Sonlu Elemanlar Metodu İle Mukavemet Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Khan, E.R., Kardile, V.S., Pravin, hakane, D.D., Gore, A.P., Mahajan Student of. Mechanical, B.E., Raisoni, G., Chas, C.E., Raisoni G.H., Chas, C.O., Design and Analysis of Crane Hook With Different Materials , International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering Volume 4, Issue 3, 2017.

Lengvarský, P., Mantič, M., Huňady, R., Design and strength analysis of C-hook for load using the finite element method, MATEC Web Conf. Volume 313, Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering – DYN-WIND'2020, 16 April 2020.

Nakka, S., Florence, M., Maisuria, M., Patel, D., Finite element analysis of crane hook, National Conference on Progress, Research and Innovation in Mechanical Engineering, March, 2017, SCET, Surat, Gujarat, India.

Onur, Y.A., Computer Aided Lifting Hook Modeling and Stress Analysis, Erzincan University, Journal of Science and Technology, 2018, 11(2), 231-236, DOI: 10.18185/erzifbed.371751.

Pawar, R.A., Wagh, V.W., Munde, K.H., Stress Analysis of Crane Hook with Different Cross Section Using Finite Element Method, 2019 JETIR January 2019, Volume 6, Issue 1, SSN-2349-5162.

Reddy, A., Static Analysis of Crane Hook with T-Section Using Ansys, July 2015, nternational Journal of Engineering Trends and Technology 25(1):53-58.

Sascha M., (2002). Cost Modeling and Design for Manufacturing Guidelines for Advanced Composite Fabrication (PhD Thesis). Massachusetts Institute of Technology (MIT).

Tarale, R., Dalavi,R., Patil, S., Patil, A., Structural and Modal Analysis Of Crane Hook With Different Materials Using FEA, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 04 Issue: 06 | June-2017.

Tripathi, Y., Jashi, U.K., Comparison of Stress Between Winkler-Bach Theory and Ansys Finite Element Method for Crane Hook with A Trapezoidal Cross-Section, International Journal of Research in Engineering and Technology eISSN: 2319-1163 | pISSN: 2321-7308, 09 Sep-2013.

Tripathi, Y., Jashi, U.K., Comparison of Stress Between Winkler-Bach Theory and Ansys Finite Element Method for Crane Hook with A Trapezoidal

Cross-Section, International Journal of Research in Engineering and Technology eISSN: 2319-1163 | pISSN: 2321-7308, 09 Sep-2013.

Tripathi, Y., Joshi, U.K., Comparison of Stress Between Winkler-Bach Theory And Ansys Finite Element Method For Crane Hook With A Trapezoidal Cross-Section, IJRET, eISSN: 2319-1163, Volume: 02 Issue: 09 | Sep-2013.

Uddanwadiker, R., Stress Analysis of Crane Hook and Validation by Photo-Elasticity, ***Engineering*, 2011, 3, 935-941** doi:10.4236/eng.2011.39115 Published Online September 2011 (http://www.SciRP.org/journal/eng).

Vanporia, K.B., Pandyo, V., Kaisha, J., Design Analysis And Weight Optimization Of Lifting Hook, Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR), December 2016, Volume 3, Issue 12.

İNTERNET KAYNAKÇALARI

https://www.seykoc.com.tr/icerik/6061?dil=tr (SGT: 29.10.2020).

https://artunbotke.com/2012/05/09/sonlu-elemanlar-analizi-fea-nedir-2-teori/ (SGT: 29.10.2020).

https://www.engr.uvic.ca/~mech410/lectures/FEA_Theory.pdf SGT: 29.10.2020).

https://marsisinovasyon.com/numerik-hesaplamalar/ (SGT: 27.10.2020).

BÖLÜM 8
KAPALI OTOPARKLARDA JET FANLI HAVALANDIRMA SİSTEMLERİ

Doç. Dr. Ayhan ONAT[1], Sinem SULTANSU[2]
[1]Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İstanbul / TÜRKİYE
[2]Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul / TÜRKİYE

ÖZ: Binaların genellikle bodrum katları kapalı otopark alanı olarak kullanılmakta ve otoparklarda bulunan araçlardan yayılan egzozun içerisinde insan sağlığına zarar verecek gazlar bulunmaktadır. Genellikle yer altında konumlandırılan kapalı otoparkların, fiziki açıdan incelendiğinde doğal yollar ile havalandırılması mümkün değildir. Bu nedenle zararlı gazların yoğunluğunu belirli sınırların altında tutabilmek için havalandırma sistemlerinin kullanılması gerekmektedir. Kapalı otoparklarda yangın ihtimaline karşı, bu sistemlerin sadece günlük havalandırma için değil, aynı zamanda yangın esnasında acil durum havalandırma sistemi olarak da çalışması gerekmektedir. Bu sistemlerden birisi de, geleneksel havalandırma kanallarına ihtiyaç olmadan tasarlanmış ve havayı sistemdeki fanların itme gücünün etkisi ile hareketlendiren jet fan sistemidir. Örnek uygulamada alanı 2033 m² olan kapalı bir otopark için jet fan sistemi tasarlanmış Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ile simülasyonları yapılmıştır. Jet fan sistemi, günlük havalandırma ihtiyacına hizmet verirken, yangın esnasında da çalışacak şekilde tasarlanmıştır. CFD analizlerinde günlük havalandırma için CO ve hava hızı olmak üzere iki ayrı parametre, yangın simülasyonlarında ise CO_2, CO, sıcaklık, duman konsantrasyonu ve hava hızı olmak üzere beş ayrı parametre değerlendirilmiştir.

GİRİŞ

İç ortamdaki kirli, kalitesiz ve konfora uygun olmayan havanın daha iyi koşullardaki dış hava ile değiştirilmesi işlemine havalandırma denilir. Yaşayan bütün canlılar özellikle insanlar için havalandırma, oksijen sağlanması, CO_2 oranın istenilen seviyede tutulması ve sıcaklığın kontrolü gibi yaşamsal fonksiyonları düzenler. Konfor amaçlı havanın sıcaklığını, nemini, hızını istenilen değere getirmek için yapılan havalandırma işlemi, istenmeyen kokuları da azaltarak daha rahat ve hijyenik yaşam koşulları sağlar. Endüstriyel işlemler için yapılan havalandırma

ise makineler ve endüstriyel tesis ortamındaki atık gazları, zehirliliği ve olası patlama risklerini minimize ederek kontrol altına alma işlemidir (Özceviz, Tari, Onat, 2018).

Kapalı otopark havalandırma sisteminin amacı ise kapalı otoparkın herhangi bir noktasında tehlikeli CO gazının birikmesini engellemek ve duman görüş mesafesini istenilen değerde tutabilmektir. Havalandırma ile araçlardan yayılan diğer kirletici maddeler de dışarı atılmaktadır. Bir diğer önemli amaç ise, yangın durumunda ortaya çıkabilecek dumanların Binaların Yangından Korunması Yönetmeliğine uygun olarak dışarı atılmasını sağlamaktır.

Son yıllarda, jet fanlı otopark havalandırma ve duman kontrol sistemleri, sağladığı avantajlar nedeniyle, kanallı havalandırma sistemlerine oranla daha fazla tercih edilmektedir. Kanallı sistemlerde, kanal uygulaması sebebiyle maliyetler yüksektir ve kanaldaki sürtünme sebebiyle oluşan basınç kayıpları sistemde kullanılan fanların boyutlarını ve motor güçlerini arttırmaktadır. Bu nedenle kanallı sistemlerde kullanılan fanlar daha çok enerji tüketmektedirler.

Jet fanlar genellikle yüksek miktarlardaki havanın, yüksek bir hız ile taşınması gereken durumlarda örneğin otoparklarda ve tünellerde kullanılırlar (Giesen, Penders, Loomans, Rutten, Hensen, 2011). Otoparklarda jet fan kullanımı, tünellerde havalandırma için kullanılan jet fanların kapalı otoparklara uygulanmasıyla ortaya çıkmıştır. Jet fanlı sistem otoparklarda iki farlı amaç için kullanılmaktadır.

- Günlük havalandırmada zehirli gazların yoğunluğunu seyreltmek,
- Yangın esnasında ise duman yoğunluğu azaltmak ve görüş mesafesini arttırmak.

Olası bir yangında, yanma sonucu meydana gelen toksik etkili gazlar ve duman, hızlı bir şekilde otopark içerisine yayılarak görüş mesafesini kısıtlamaktadır. Bunun sonucunda eğer mahalde havalandırma sistemi kurulu değil ise itfaiye ekiplerinin yangına müdahalesi ve insanların otoparktan tahliyesi zorlaşmaktadır. Hayati önem taşıyan otopark havalandırması ile ilgili ülkemizde ve dünyada yönetmelikler yayınlanmış, bu sistemlerin dizaynı için uluslararası standartlar getirilmiş ve gelişen teknolojiye bağlı olarak da standartlar sürekli yenilenmektedir.

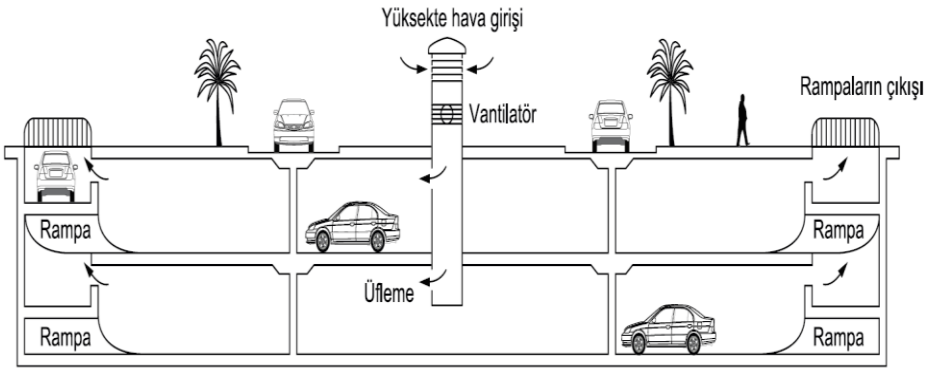
KAPALI OTOPARK HAVALANDIRMA SİSTEMLERİ

Uygulanan sistem hangisi olursa olsun, daha önce verilen kriterlerin sağlanabilmesi için havalandırma debisinin uygun olması gerekmektedir. Kapalı otoparklarda uygulanan sistemler aşağıda verilmektedir. Son yıllarda yapılan uygulamalarda jet fanlı sistemlerin çok daha fazla kullanıldığı bilinmektedir.

KANALLI KAPALI OTOPARK HAVALANDIRMA SİSTEMLERİ

Sadece Üflemeli (Beslemeli) Kanallı Havalandırma Sistemi

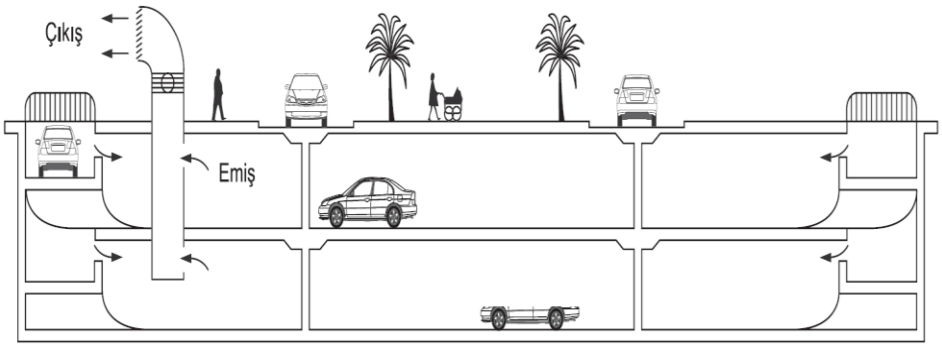
Bu sistemin en önemli farkı, üflenen havanın doğrudan dışarıdan temiz hava olarak alınmasıdır. Bu uygulama ile otopark içerisinde pozitif basınç oluşturulur. İçerideki kirli hava, otopark içerisinden dışarı açılan rampalardan dışarı çıkar. Dışarı çıkan (atılan) ve içerisinde yüksek oranda CO bulunan bu kirli hava, yaşam alanlarına, park ve caddelere kontrolsüz bir şekilde yayılabilir. Bununla birlikte duman tahliyesi gerektiren uygulamalarda bu yöntem kullanılmaz. Şekil 1'de sadece üflemeli (beslemeli) kapalı otoparkın havalandırma sistemleri verilmektedir.



Şekil 1. Sadece üflemeli (beslemeli) kapalı otoparkın havalandırma sistemleri

Sadece Emişli (Egzoz) Kanallı Havalandırma Sistemleri

Hala kullanılan bu kanallı sistemin temel avantajı; yürürlükteki yönetmeliklere göre, uygun bir yüksekliğe kadar kontrol altına alınan çıkış havasının kanallar aracılığıyla kontrollü bir şekilde dışarıya atılabilmesidir. Özellikle yönetmelik de tanımlanan çıkış baca yüksekliklerin uygulanması, dış yaşam alanlarının olumsuz etkilenmesini azaltır. Bir otopark için hacmin büyüklüğüne bağlı olarak birden fazla giriş noktası ve her giriş için emiş fanlarının kullanılması önerilmektedir Bu tür sistemlerde, emiş ve üflemeli sistemlerin birlikte uygulandığı kanallı sistemlere göre çok daha az hava kanalı kullanılmaktadır. Şekil 2'de sadece emiş (egzoz) kanallı kapalı otoparkın havalandırma sistemi verilmektedir.



Şekil 2. Sadece emiş (egzoz) kanallı kapalı otoparkın havalandırma sistemi

Üflemeli ve Emişli (Basma ve Emiş Birlikte) Kanallı Havalandırma Sistemi

Bu sistemle, bütün noktalara ulaşılarak, kapalı otoparkın içindeki havanın en uygun biçimde dağıtılması sağlanır. Bu sistemlerde emiş ile basma fanının aynı anda birlikte çalışması istenir. Genelde nötr basınç olarak tasarlanan bu uygulamalarda, emiş ve basma fanlarının debileri eşit olmalıdır. Emiş sistemi, fan ve kanallarda dahil olmak üzere, yangın durumunda dumanı boşaltmayı sağlamalı ve bu sebeple en az 90 dakika boyunca 400 °C sıcaklığa dayanabilmelidir. Günümüzde yangın esnasında oluşan dumanın tahliye edilmesi için yüksek debili jet fanlar kullanılmaktadır. Bu sistemde önemli olan noktalar emiş menfezi, çıkış menfezi ve gürültü seviyeleridir (Özceviz, Tari, Onat, 2018). Şekil 3'de üflemeli ve emişli (basma ve emiş birlikte) kanallı kapalı otoparkın havalandırma sistemi verilmektedir.



Şekil 3. Üflemeli ve emişli (basma ve emiş Birlikte) kanallı kapalı otoparkın havalandırma sistemi

JET FANLI KAPALI OTOPARK HAVALANDIRMA SİSTEMLERİ

Jet Fan Sistemi ve Temel Bileşenleri

Jet fan sisteminin doğru ve etkin çalışabilmesi için aşağıda verilen temel bileşenlerin belirlenmesi ve uygun kapasitelerde seçilmesi önemlidir.

- Jet fanlar
- Aksiyel fanlar
- Damperler
- Sistem kontrol panosu

Jet Fanlar

Jet fanlar, kapalı ve yarı açık tipte otoparkların havalandırılması, tünellerin havalandırılması ve yangın durumunda duman tahliyesi için tasarlanmıştır. Bu fanlar, aksiyel ve radyal olmak üzere iki ayrı tipte üretilirler.

a) Aksiyel Jet Fanlar

Aksiyel jet fanlar tünel tavanlarında yer alan jet fanların kapalı otoparklara uyarlanmış halidir. Bu jet fanlar aksiyel fan, yangın dayanımı olan motor, emiş-atış ağızlarında susturucu, deflektör ve tel kafesten meydana gelirler. Şekil 4'de aksiyel jet fan ve egzoz fanı görseli verilmektedir.



Şekil 4. a)Aksiyel jet egzoz fanları b)Aksiyel Jet fan c) Egzoz fanı

Yangın esnasında çalışabilmeleri için bu jet fanların motorları Avrupa normlarına göre sınıflandırılmıştır. Tablo 1 'de EN 12101-3 standardına göre fanların sıcaklık dayanım sınıfları verilmiştir.

Tablo 1. EN 12101-3 standardına göre fanların sıcaklık dayanımları

Sınıf	Sıcaklık (°C)	Süre (dakika)
F 200	200	120
F 300	300	60
F 400	400	120
F 600	600	60

Aksiyel jet fanlar isimlerini eksenel atıştan alır. Aksiyel pervane yapısı ile bir eksen etrafında dönen mile paralel hava emilir ve hava aynı eksende dışarı atılır.

Jet fanların üzerinde yer alan susturucular fanların emiş ve atış ağızlarına yerleştirilerek gürültüyü azaltır. Üretici kataloglarında genel olarak jet fanların belirli mesafelerdeki ses basınç seviyeleri yer almaktadır. Bu verilere göre susturuculu jet fanların, 3 metre mesafedeki ses basınç seviyesi, jet fanın itme gücü ile orantılı olarak 60 dB(A) ile 80 dB(A) aralığına kadar düşebilmektedir. Aksiyel fanlar, jet fan sistemleri içerisinde egzoz veya taze hava gereksinimini karşılamak için kullanılır. Jet fan sisteminin en önemli ana ekipmanları arasındadır. Kapalı otopark alanında rampalardan ve doğal açıklıklardan gelen hava yetersiz olduğunda sistemde taze hava ve egzoz havası için aksiyel fanların kullanımı zorunlu hale gelir. Ülkemizde duman tahliye sistemlerinde kullanılacak olan aksiyel fanların debileri için binaların yangından korunması hakkında yönetmelikte sınırlar getirilmiştir. Bu yönetmeliğe göre duman tahliye sisteminin binanın diğer bölümlerine hizmet veren sistemlerden bağımsız olması ve saatte en az 10 hava değişimi sağlaması gereklidir (T.C. Resmi Gazete, sayı 12937, 2007).

Gerekli olan egzoz hava debisi Q_e (m³/h), Eşitlik 1'de verilen formül ile hesaplanır.

$$Q_e = A \times h \times ACH \qquad (2)$$

Burada,

A (m²), otopark alanını,

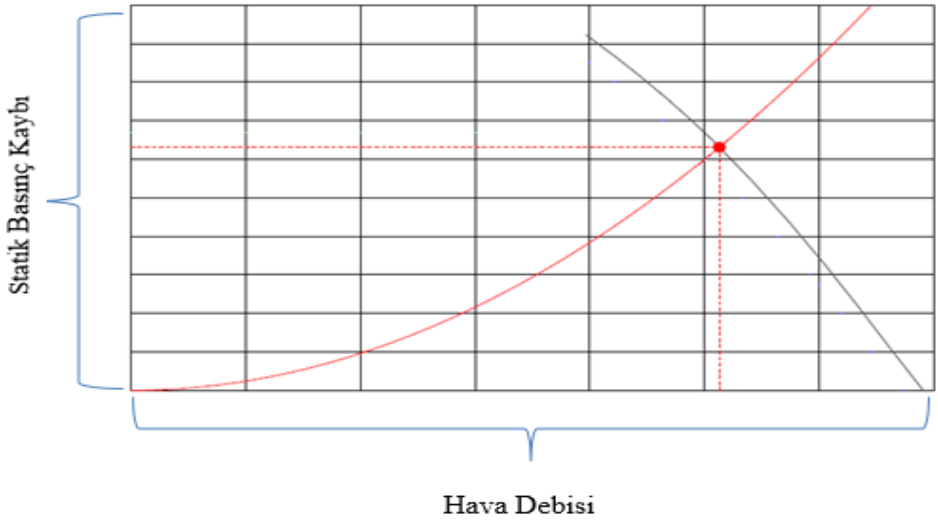
h (m), otopark yüksekliğini,

ACH, saatlik hava değişim sayısını ifade eder.

Aksiyel Fanların Seçimi

Egzoz debisi hesaplandıktan sonra cihaz dışı toplam basınç belirlenerek fan seçimleri yapılabilmektedir. Cihaz dışı toplam basınç, hava iletilirken havaya

karşı oluşan dirençtir. Sürtünme basınç kayıpları ve dinamik basınç kayıpları olmak üzere bu direnci oluşturan iki farklı etken vardır. Sürtünme basınç kaybı, kanalın iç yüzeyine temas eden havanın oluşturduğu kayıpları ifade eder. Dinamik basınç kayıpları ise kanal kesit değişiklikler, dirsekler, kullanılan ekipmanlar (örneğin susturucu) gibi fiziksel etmenlere bağlı olarak artan kayıplardır. Aksiyel fanlar seçilirken fana ait debi ve basınç kayıplarını gösteren eğriler kullanılır. Fan üreticileri kendi ürettikleri fanların, basınç değerlerini, debilerini ve ses seviyelerini ölçerek bu eğrileri oluşturur (Kılıç, 2017). Şekil 5'te örnek bir fan eğrisi verilmiştir.



Şekil 1. Örnek bir fan eğrisi

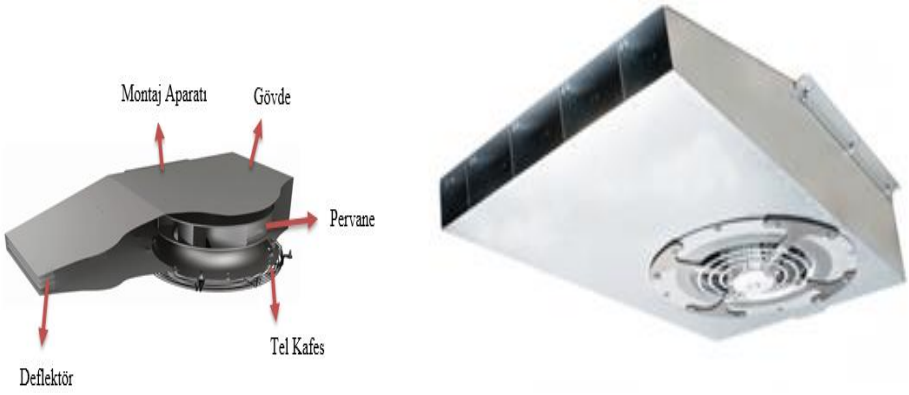
Aksiyel Fanlarda Test ve Sertifikalandırma

Acil durumlarda yüksek sıcaklıkta kullanılan, duman ve ısıyı tahliye eden fanlar EN 12101-3 standardına göre test edilmek ve CE sertifikalandırılmak zorundadır. Fanların olası bir yangında, ısı ve dumanı ortamdan tahliye edebilmesi için bu engellere karşı dayanımı olması gerekmektedir. Bu testte ilk olarak, motor normal çalışma sıcaklığına ulaşana kadar ısıtılır ve en az 1 saat çalıştırılır. İkinci olarak ise, 15 dakikalık süre boyunca, acil durum için belirtilen yüksek sıcaklık değerinde çalıştırıldıktan sonra 2 dakikalığına kapatılır ve yeniden devreye alınır. Daha sonra fan yüksek sıcaklıkta çalıştırılır. Fan yeniden devreye alındığı süreden itibaren geçen süre, fanın dayanım sınıfında belirtilen süredir (Kılıç, 2017).

Radyal Jet Fanlar

Radyal jet fanların yükseklikleri aksiyel jet fanlara kıyasla daha düşüktür. Bu sayede düşük kat yüksekliklerinde kullanım avantajı sağlarlar. Şekil 6'da radyal

jet fan gösterilmektedir. Aksiyel jet fanlarda olduğu gibi radyal fanların da Tablo 1 ’de belirtilen sıcaklıklara dayanabilmeleri istenmektedir.



Şekil 6. Radyal jet fan

Radyal jet fanları aksiyel jet fanlardan ayıran en belirgin özelliği pervanesidir. Hava fan miline paralel girer ve fan miline dik bir şekilde dışarı atılır (Alarko Carrier Sanayi ve Ticaret A.Ş., 2007). Radyal çark ve hava giriş ve çıkışlarına ait görsel Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Radyal çark ve hava giriş-çıkış yönleri

Jet fanların itme güçleri, üretici kataloglarında 15 ile 85 N arasında otopark ihtiyacı ve jet fan tasarımına göre farklılık göstermektedir. Jet fanların itme güçleri fan içerisinden geçen hava debisine, havanın özgül ağırlığına ve fanın atış hızına bağlıdır.

Jet fanın itme gücü F (N) Eşitlik 2’de verilmektedir.

$$F = \dot{Q} \times V \times \rho \qquad (2)$$

Burada;

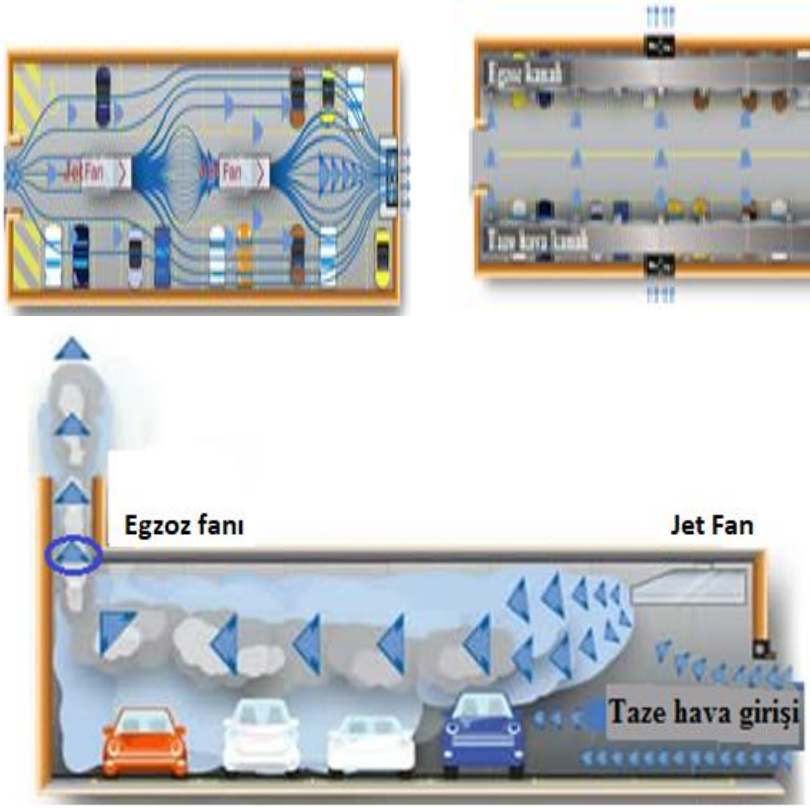
F (N), jet fanın itme gücünü,

$\dot{Q}$ (m³/s), fan debisini,

V (m/s), atış ağzındaki hava hızını,

ρ (kg/m³), havanın özgül ağırlığını

ifade etmektedir. Şekil 8'de Jet fanlı havalandırma sistemi görsel olarak verilmektedir.



Şekil 8. Jet fanlı havalandırma sistemi

KAPALI OTOPARKLARDA GÜNLÜK HAVALANDIRMA VE DUMAN KONTROLÜ

Jet fanlar olası bir yangında açığa çıkan duman ve zararlı gazları egzoz açıklıklarına taşıyabilmek için gereken itme gücünü sağlamaktadır (Viegas, 2010). Jet fanlar taze hava şaftlarından veya var ise otopark içerisindeki taze hava kaynaklarından (açıklık, rampa vb.) aldığı taze havayı hızlandırarak, itme gücü etkisiyle kirli hava ve dumanı egzoz fanlarına iletirler. Egzoz fanları tarafından emilen kirli hava ve duman şaftlardaki egzoz fanları aracılığı ile emilerek kapalı otopark dışına atılır.

Günlük Havalandırma

Kapalı otoparkları doğal yollar ile havalandırmak zordur, bu nedenle otoparklarda motorlu araçlardan yayılan kirli egzoz havasının seyreltilmesi ve uzaklaştırılması için özel havalandırma sistemlerinin kurulması gereklidir. Araç motorlarından yayılan kirli gazlar genellikle CO, hidrokarbonlar ve nitrojen oksitlerdir. İnsan sağlığı açısından hayati önem taşıyan faktör CO yoğunluğu olduğu için, genel olarak otoparklarda hava kalitesini arttırmaya yönelik çalışmalar CO gazı üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak azot oksitler, kükürt oksitler, diğer kokulu ve kirli gazlar da otoparkların hava kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır (Goel, Singh, Jian, 2012).

CO, kokusuz, renksiz ve zehirli bir gazdır. Bu gazı görmek, tatmak veya koklamak mümkün olmadığından, hissetmeden bu gaza maruz kalmak mümkündür. CO gazı hemoglobin ile oksijenden daha hızlı bir şekilde birleşir ve oksihemoglobin oluşturarak oksijenin vücuda girişine engel olur (United States Environmental Protection Agency, 2019). Genellikle havalandırma sistemlerinde gaz konsantrasyonları belirtilirken birim olarak ppm kullanılır. Örneğin, CO ve hava karışımında toplam miktarın milyonda biri, 1 ppm olarak belirtilir.

Özellikle kapalı otoparklarda araç egzozlarından salınan CO gazının yoğunluğu yüksektir. Yüksek konsantrasyonlarda ölümcül olan CO gazının tahliyesi ve seyreltilmesi için otoparklarda CO yoğunluğuna göre çalışan havalandırma sistemlerinin kurulması şarttır. ASHRAE Araştırma Projesi RP-945 kapsamında yapılan çalışmada kapalı bir otopark için gerekli havalandırma oranının dört faktöre bağlı olduğu belirtilmiştir;

- Kapalı otoparkta kabul edilebilir kirletici seviyesi,
- En yoğun koşullarda kullanılan araç sayısı,
- Kapalı otoparkta seyahat süresi ve araçların çalışma süresi,
- Çeşitli koşullar altında tipik bir aracın emisyon oranı.

Dünya çapında birçok kurum zehirli gazlar için kabul edilebilir konsantrasyon seviyeleri ile ilgili kriterler yayınlamıştır. ACGIH (1998) 8 saatlik bir maruziyet için 25 ppm CO sınırını önermektedir. US EPA ise deniz seviyesinde ve deniz seviyesine yakın yüksekliklerde 1 saatlik maruziyet için 35 ppm CO konsantrasyonu sınır değer kabul eder. Deniz seviyesinden 1000 m yukarıda konumlanan kapalı otoparklar için daha düşük limitler gerekmektedir. Avrupa'da ise ortalama 35 ppm ve maksimum 200 ppm CO konsantrasyon değerleri sınır olarak kabul edilir (ASHRAE, 2007). Ülkelere göre kabul edilebilir CO seviyeleri

farklılık göstermektedir. Tablo 2'de farklı kurumlar tarafından yayınlanan kapalı ortamlar için CO gazı sınır değerleri verilmektedir.

Tablo 2. Kapalı ortamlar için CO gazı sınır değerleri

Kurum	CO (ppm)	Maruziyet süresi (saat)
NAAQS/EPA	9 35	8 1
WHO	90 50 25 10	0,25 0,5 1 8
OSHA	50	8

Otoparkın hizmet ettiği binaya göre, kapalı otopark alanında çalışan araç yoğunluğu değişkenlik göstermektedir. Sürekli kullanılan apartman ve alışveriş merkezlerinin otoparklarında bu oran %3 ile %5 arasında değişirken havaalanı ve stadyum gibi yerlerde bu oran %15 ile %20 arasında değişiklik gösterebilir.

Bir araçta iki durumda CO emisyonu olur. Bunlardan ilki motor yeni çalıştırıldığında oluşan soğuk emisyon, ikincisi ise motor ısınmış halde iken oluşan sıcak emisyondur. Araçlar otoparka girdiğinde çoğunlukla düşük hızda hareket ederler ve motorları sıcaktır. Otoparktan çıkarken ise, motor genellikle soğuk olur ve zengin bir yakıt karışımıyla düşük viteste çalışırlar. ASHRAE 2007 El Kitabında, sıcak ve soğuk emisyon değerlerini mevsimlere göre 1991 ve 1996 yılları için tablo halinde yayınlamıştır. Bu tabloda yer alan değerlere göre soğuk emisyon değerleri sıcak emisyon değerlerine göre daha yüksektir (ASHRAE, 2007)**.** Tablo 3'de motorlar için sıcak ve soğuk emisyon değerleri yaklaşık olarak verilmektedir.

Tablo 3. Motorlar için sıcak ve soğuk emisyon değerleri (ASHRAE, 2007)

Mevsim	Yıl	Sıcak Emisyonlar (mg/s)	Soğuk Emisyonlar (mg/s)
Yaz	1991	42,33	71,17
Kış	1991	60,17	345,67
Yaz	1996	31,5	61
Kış	1996	56,33	316

Toplam CO emisyonu C_T (mg/s), Eşitlik 3'de verilen formül ile hesaplanır;

$$C_T = N \times E \quad (3)$$

Toplam CO konsantrasyonu C_c (mg/m²s) ise Eşitlik 4'de verilen formül ile hesaplanır

$$C_c = \frac{C_T}{A} \quad (4)$$

Burada,

N, araç sayısını,

E, (mg/s), araç başına CO emisyonunu,

A (m²), bölgenin alanını ifade etmektedir.

Duman Kontrolü

Kapalı otoparklarda duman kontrol sistemleri, yangın sırasında ve yangının bastırılmasından sonra dumanın temizlenmesi, itfaiye ekiplerinin yangına müdahalesi, kolaylıkla arama kurtarma yapılabilmesi, yolcuların tahliyesi için bina çıkışına giden yol ve merdiven boşluklarının korunması amaçları ile kurulmaktadır. Dünya genelinde yayınlanan standartlar ile duman kontrol sistemlerinin tasarım kriterleri belirlenmiştir.

Bu standartlardan biri olan İngiliz BS 7346-7 standardına göre, duman kontrol sistemlerinin tasarımı, itfaiyecilerin büyük ölçüde temiz olan dumansız hava içerisinden geçebilecekleri ve yangına 10 metre yaklaşabilecek şekilde olmalıdır. Merdiven boşluklarının, kaçış koridorunun ve mevcut geçiş kapılarının bulunduğu yerlerin, duman girmesine neden olabilecek dinamik basınç etkilerine maruz kalmaması için jet fan konumlarının ve jet yönlendirmelerinin yapılması gerekmektedir. Jet fanların otopark üzerindeki dağılımları günlük havalandırmada hiçbir ölü alan kalmayacak şekilde olmalıdır. Kaçış yollarındaki havanın hızı, insanların kaçışını engellememek için en fazla 5 m/s olmalıdır. Duman sirkülasyonuna engel olmak için ise taze hava girişlerinde hava hızı 2 m/s'yi aşmamalıdır. Aktif olarak

çalışan jet fanların harekete geçirdiği hava, egzoz fanları aracılığı ile tahliye edilen hava miktarından fazla olmamalı ve sistem yangının park içinde meydana gelebileceği her yerde duman akışını kontrol edebilmelidir. Aynı standarda göre kararlı halde yangın tasarımı için ısı salınım oranları aşağıda verilen Tablo 4'e uygun olmalıdır (British Standards Instutition, 2006).

Tablo 4. Kararlı hal yangın tasarımı (British Standards Instutition, 2006).

Yangın Parametreleri	Kapalı otopark (sprinksiz)	Kapalı otopark (sprinkli)
Boyutlar (mxm)	5x5	2x5
Görüş mesafesi	20	14
Isı salınım oranı (MW)	8	4

Yanma Ürünleri ve Tehlikeleri

Yanma, yakıtın oksijen ile birleştiği ve sonucunda büyük miktarda enerjinin oluştuğu kimyasal bir reaksiyondur. Bir yakıtın oksijenle yakın temasa getirilmesi yanmanın başlaması için yeterli değildir. Yanmanın başlaması için tutuşma sıcaklığına gelmesi gerekir. Yanma işleminde yakıt içindeki karbonun tümü CO_2, hidrojenin tümü H_2O ve kükürdün tümü (eğer varsa) SO_2 maddelerine dönüşüyorsa bu tam yanma olarak adlandırılır. Yanma ürünleri arasında C, H_2, CO ve OH gibi bileşenler varsa yanma işlemi eksik yanma olarak tanımlanır. (Çengel, Boles, 2008). Araçlarda yakıt olarak kullanılan oktana ait tam ve eksik yanma formülleri sırasıyla Eşitlik 5 ve 6'da verilmektedir.

$$C_8H_{18}+12{,}5(O_2+3{,}76\ N_2) > 8\ CO_2 + 9\ H_2O +47{,}25\ N_2 \quad (5)$$

$$C_8H_{18} + 8{,}5(O_2 + 3{,}76\ N_2) > 8CO + 9\ H_2O +31{,}96\ N_2 \quad (6)$$

Yangınların çoğunda ölümlerin boğulma ile gerçekleştiği tespit edilmiştir (Aydoğdu, 2009). Bu nedenle yangın ürünleri arasında yer alan, kandaki oksijeni tüketerek boğulmaya sebep olan CO gazının tahliyesi hayati önem taşımaktadır.

Şaft Yerleşimi ve Damperler

Damperler, jet fanlı sistemlerde egzoz ve taze hava şaftlarına yerleştirilerek, dumanın ve zehirli gazların diğer bölgelere yayılmasını engellemek amacı ile kullanılmaktadır. Jet fanlı sistemlerde yangın esnasında duman ve zehirli gazlar, jet fanların itme gücünün etkisiyle, egzoz şaftına sürüklenir ve ortama taze hava bes-

lemesi yapılır. Bu esnada diğer katlarda, egzoz şaftlarında bulunan damperler kapanır ve taze hava şaft damperleri açılır. Bu sayede dumanın diğer katlara yayılması engellenmiş olur. Şekil 9'da şaft damperi ve şaftların konumlandırılması verilmektedir.



Şekil 9. Şaft yerleşimleri ve damperi

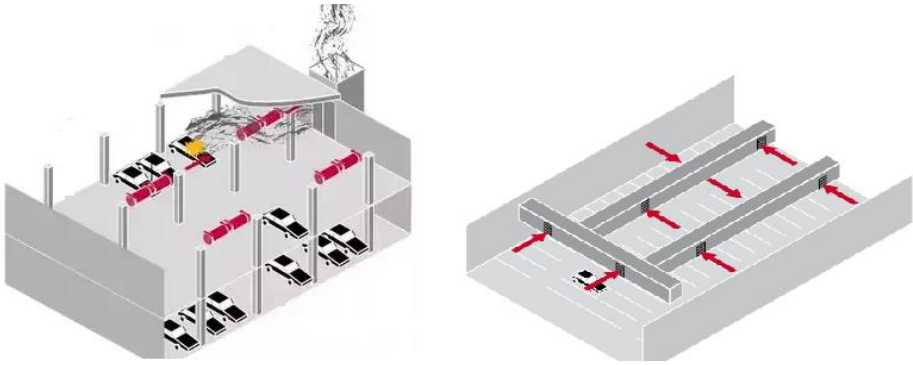
Sistem Kontrol Panosu

Sistem kontrol panosu, jet fan sisteminde yer alan tüm ekipmanları, şaftlarda bulunan aksiyel fanları ve jet fanları birbirinden bağımsız olarak, istenilen hızda, istenilen yönde, farklı zamanlarda programlanabilir şekilde kontrol eden panodur. Pano içerisinde CO, yangın sensörlerinin sinyalizasyonları ve sistemde herhangi bir arıza durumunda uyarı veren göstergeler bulunur.

Jet Fan Sisteminin Kanallı Duman Egzoz Sistemi ile Karşılaştırılması

Jet fan sistemleri herhangi bir kanal döşemesi olmadan, otopark içinde tavana yerleştirilmiş jet fanlar aracılığı ile günlük ve yangın durumunda duman tahliyesi yapmak amacıyla kullanılır. Geleneksel kanallı duman egzoz sistemleri ile jet fanları ayıran en büyük özellik jet fan sisteminde kanallara ihtiyaç olmamasıdır. Kanallı sistemlerde dumanı dış atmosfere taşımak için sacdan imal edilmiş kanallar kullanılır. Bu kanallarda havaya karşı oluşan direnç, taze ve egzoz havası fanlarını doğrudan etkilemektedir. Basınç kayıpları arttıkça fanın harcadığı güç artar ve sağladığı debi azalır. Bu yüzden fan kapasitelerinin artırılması ve boyutunun büyütülmesi gerekir. Jet fanlı sistemlerde bu kayıplar olmadığı için seçilen fanlar daha az enerji tüketir ve daha küçük boyutlarda daha fazla debi sağlarlar.

Mimari açıdan bakıldığında kapalı otoparklara büyük kanalların yerleştirilmesiyle, kat yükseklikleri azalır bu da otoparkın basık olmasına neden olur ve dizayn aşamasında kat yükseklikleri kanallar hesaba katılarak belirlenir. Jet fanlarda böyle bir durum söz konusu olmadığı için inşaat ve işçilik maliyetleri düşük olmaktadır. Şekil 10'da jet fanlı ve kanallı havalandırma sistemlere ait görsel yer almaktadır.



a) *b)*

Şekil 10. Otoparklarda havalandırma sistemleri a) jet fanlı b) kanallı

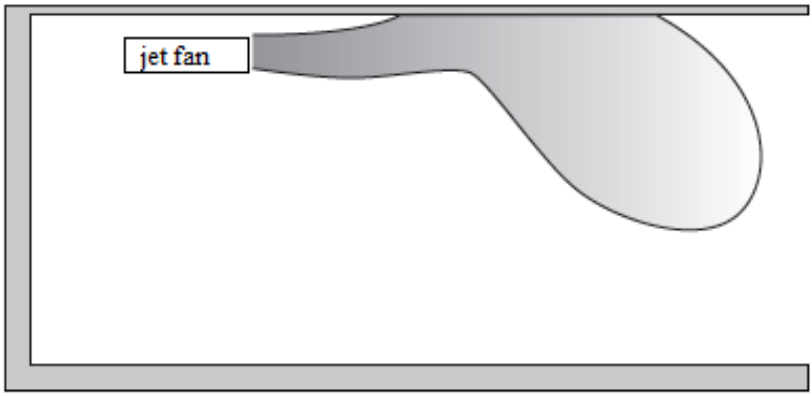
Yangın durumunda meydana gelen duman ve zehirli gazlar, yer seviyesinden tavana doğru hızlı bir şekilde yükselir, bir süre sonra tavanda yoğunlaşan duman otoparkın her yerine dağılma eğilimi gösterir. Kanallı sistemlerde, tavan seviyesinde bulunan menfezler öncelikli olarak duman tahliyesinde etkili olacaktır. Ancak yer seviyesindeki menfezler duman tahliyesinde etkili olana kadar duman otoparkın alt seviyelerine yayılmış olacaktır (ATC, Air Trade Centre, 2011). Jet fan sistemleri ise otoparkın tüm yüksekliklerine etki ettikleri için duman tahliyesinde menfez etkisinin azalması söz konusu değildir.

Jet fan ve kanallı sistemler arasındaki bir diğer önemli fark ise kanallı sistemlerin tamamen duman tahliyesine hizmet vermesidir. Jet fanlar ise hem duman tahliyesi hem de duman kontrolü yapabilmektedir. Duman kontrolü jet fanlar aracılığı ile sağlanmakta, kanallı sistemlerde ise bu mümkün olmamaktadır. Duman kontrolünde amaç, dumanı otopark içerisinde belirli bir bölgeye hapsederek yayılmasını engellemek, bu esnada artan görüş mesafesi sayesinde itfaiye ekibinin yangına müdahalesine yardımcı olmak ve otoparkın duman yoğunluğunun az olduğu bölgelere insanların kaçmasını sağlamaktır. Jet fanlı sistemlerde dumanı doğru şekilde kontrol edebilmek için dizayn aşamasında otopark zonlara bölünür. Zonlara yerleştirilen sensörler sayesinde CO yoğunluğunun arttığı zon tespit edilerek yalnızca bu bölgeye hitap eden fanlar ve ekipmanlar çalıştırılır. Bu sayede enerji tüketimi azaltılmış olur.

Jet Fan Sistemlerinde Coanda Etkisi

Fanların üfledikleri hava tavana yaklaştıkça, Şekil 11'de görüldüğü üzere hava tavana yapışık akış oluşturur. Jet fanların duvarlara çok yakın olduğu durumlarda, indüklenen hava, tek yönlü akış ve düşük basınç nedeniyle yakın olduğu

yüzeye yapışır. Yüzeye yapışan havanın hızı sürtünme kayıpları nedeniyle düşer ve hız profilleri bozulur. Bu duruma coanda etkisi denir.



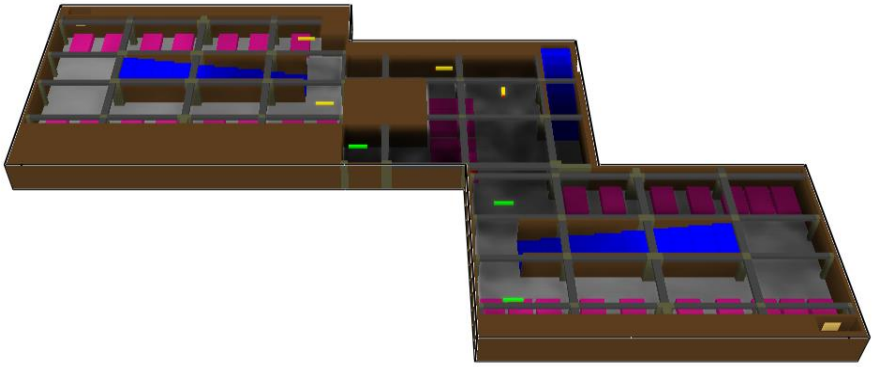
Şekil 11. Jet fan sistemlerinde coanda etkisi

Tünellerde kullanılan jet fanlarla ilgili olarak yapılan bir çalışmada geleneksel jet fanlar ile emiş ve atışındaki susturucu kısmı belirli açı ile bükülen jet fanlar ile karşılaştırılmıştır. Bükme işlemi sayesinde, hava akışı tavandan uzaklaşarak, tavan ile hava akışı arasındaki sürtünme kaybı etkilerinin azaldığı gözlemlenmiştir (Witt, Schütze, Witt&Sohn, 2008).

Kapalı Otoparklar için CFD Analizi

CFD analizi prensibi akış alanının, küçük kontrol hacimlerine ayrılarak, sayısal çözüm ağı içinde kalan her bir hücre için Navier-Stokes denklemlerinin yakınsanmış bir çözüm ortaya çıkana kadar iteratif bir şekilde çözülmesine dayanır. CFD analizine başlamadan önce otoparkın 3 boyutlu çiziminin yapılması gereklidir. Modelleme, hareket takibi, video düzenleme, oyun oluşturma, animasyon ve simülasyon oluşturma gibi üç boyutlu çalışmaların bütününü destekleyen yazılımlar mevcuttur.

Üç boyutlu tasarımı yapılan modelin, CFD analizinin yapılabilmesi için yazılıma ihtiyaç vardır. Bu yazılımlar Navier-Stokes denklemlerini nümerik olarak çözer. Kapalı otoparklar için *CFD analizi ile 3 boyutlu modelleme yapılarak, sıcaklık, gaz, duman konsantrasyonu ve hava hızları deney yapmaya ihtiyaç olmadan tasarım aşamasında görülür. Bu sayede otoparka yerleştirilen jet fanların konumlarının doğruluğu, olası bir yangın durumunda meydana gelecek olan dumanın yayılım şekli, fan kapasitelerinin yeterliliği, otopark içerisinde bulunan engellerin hava hızına etkisi, rampa ve açıklıklardan gelen havanın dağıtılması gibi birçok konuda öngörü sahibi olunmasına yardımcı olur.* Şekil 12'de CFD analizi ile yapılan otoparkın duman yayılımına ait bir görsel verilmektedir.



Şekil 12. Otoparkta duman yayılımı

ÖRNEK UYGULAMA

Örnek Otoparkın Genel Özellikleri

Hesabı yapılan otoparkın net alanı 2033 m² ve yüksekliği 4,75 metredir. Bu bilgiler doğrultusunda otoparkın toplam hacmi 9656,75 m³ olmaktadır. Otopark iki ayrı zona bölünmüş ve yangın senaryoları bu zonlara göre oluşturulmuştur. Otopark zonlarının alanları Tablo 5'de yer almaktadır.

Tablo 5. Zon-1 ve Zon-2 alanları

Zon	Alan (m^2)
1	1006
2	1027

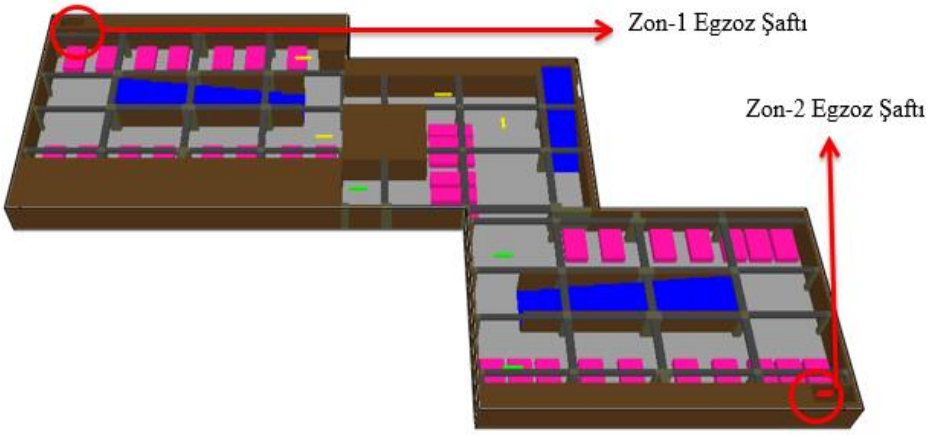
JET FAN SİSTEMİ EKİPMAN SEÇİMİ VE HESAPLARI

Egzoz hava debisi ihtiyacı

Türkiye'de binaların yangından korunması hakkında yönetmelikte saatte en az 10 hava değişimi sağlaması gerekmektedir. Otoparkın ihtiyacı olan egzoz debisi Eşitlik 1'de verilen formül ile saatte 10 hava değişimi şartına göre belirlenmiştir. Taze hava ihtiyacı, rampalardan sağlanacak şekilde dizayn edilmiş ve bu sebeple taze hava fanı (üfleme/basma fanı) kullanılmamıştır. Zon-1 ve Zon-2 için hesaplanan egzoz hava debisi ihtiyaçları Tablo 6'da verilmiştir. Zon-1 ve Zon-2'ye ait egzoz şaftlarının otopark üzerindeki yerleşimleri ise Şekil 13'de verilmiştir.

Tablo 6. Zon-1 ve Zon-2 için egzoz hava debisi ihtiyacı

Parametre	Zon-1	Zon-2
Alan (m^2)	1006	1027
Yükseklik (m)	4,75	4,75
Hacim (m^3)	4778.5	4878.2
Saatteki hava değişim sayısı (ACH)	10	10
Minimum egzoz hava debisi (m^3/h)	47785	48782



Şekil 13. Egzoz ve taze hava şaftları

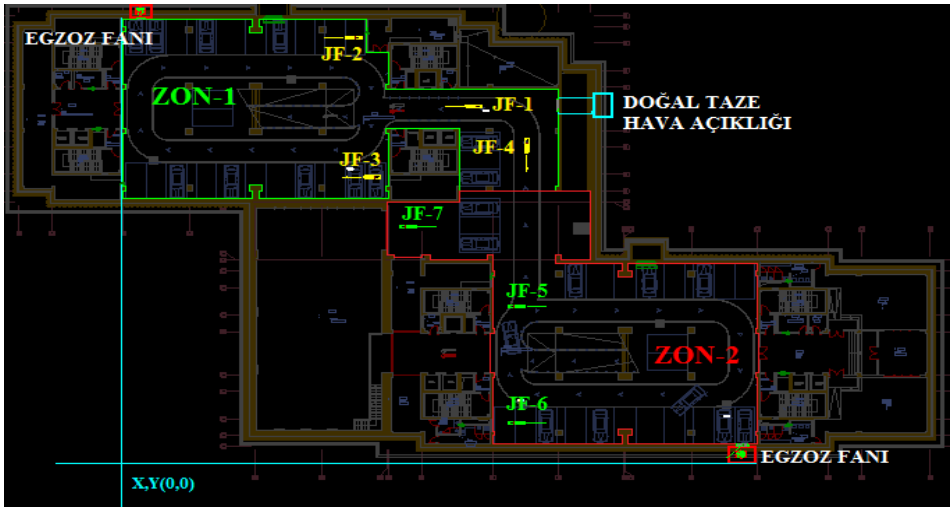
Jet Fanların Yerleşimi

Jet fanlar, otopark genelinde tüm havayı hareket ettirmeli bu sayede havalandırılmayan ölü alan kalmayacak şekilde yerleştirilmelidir. Örnek otoparkta jet fan sistemi için 7 adet jet fan, üfleme mesafelerine göre otoparkta ölü alan kalmayacak şekilde yerleştirilmiştir. 1, 2 ve 3 numaralı jet fanlar Zon-1 bölgesi, 4, 5, 6 ve 7 numaralı jet fanlar Zon-2 bölgesi için çalıştırılmıştır. Kullanılan jet fanların itme güçleri, üfleme mesafeleri, debileri ve çizim üzerindeki koordinatları (x,y) Tablo 7' de verilmiştir.

Tablo 7. Jet fan yerleşimi

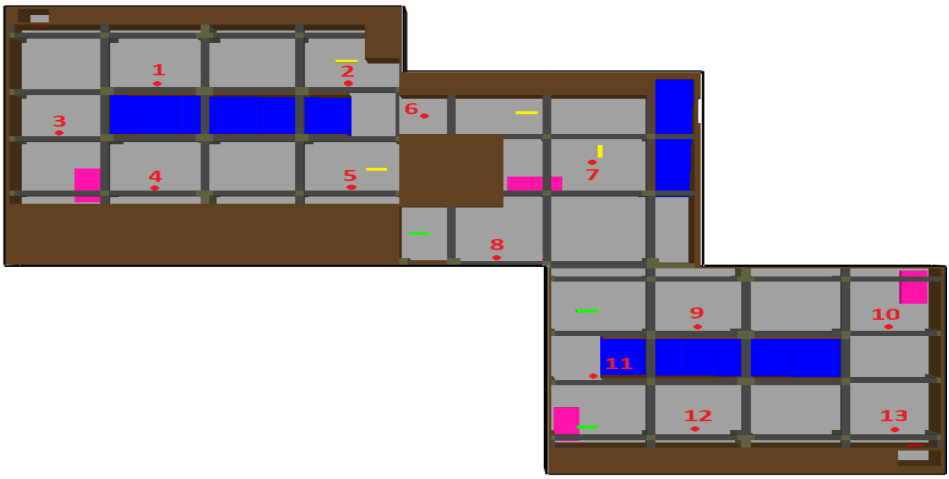
Jet fan No	X-Y koordinatları (m)	İtme gücü (N)	İtme mesafesi (m)	Debi (m^3/h)
1	43,38 - 49,50	50	34	8064
2	28,26 - 56,70	50	34	8064
3	30,78 - 41,58	50	34	8064
4	49,50 - 44,10	50	34	8064
5	48,42 - 21,78	80	50	11016
6	48,42 - 5,58	80	50	11016
7	34,38 – 32,58	80	50	11016

Jet fan, otopark zonları, taze hava açıklığı ve egzoz fanı yerleşimleri Şekil 14'de yer almaktadır.



Şekil 14. Jet fan sistem ekipmanları yerleşimi

Egzoz fanları yerleştirildikten sonra günlük havalandırma ve yangın senaryoları için otoparkın 13 farklı noktasına ölçüm noktaları yerleştirilmiştir. Bu ölçüm noktaları ile günlük havalandırma için CO ve hava hızı parametreleri 900 saniyelik simülasyon boyunca her iki saniyede bir ölçülmüştür. Yangın senaryolarında ise, yangına en yakın ölçüm noktasından CO, CO_2, hava hızı, duman ve sıcaklık değerleri ölçülmüştür (Sultansu, Onat, 2019). Ölçüm noktalarının otopark üzerindeki yerleşimleri Şekil 15'de verilmiştir.



Şekil 15. Ölçüm noktaları yerleşimleri

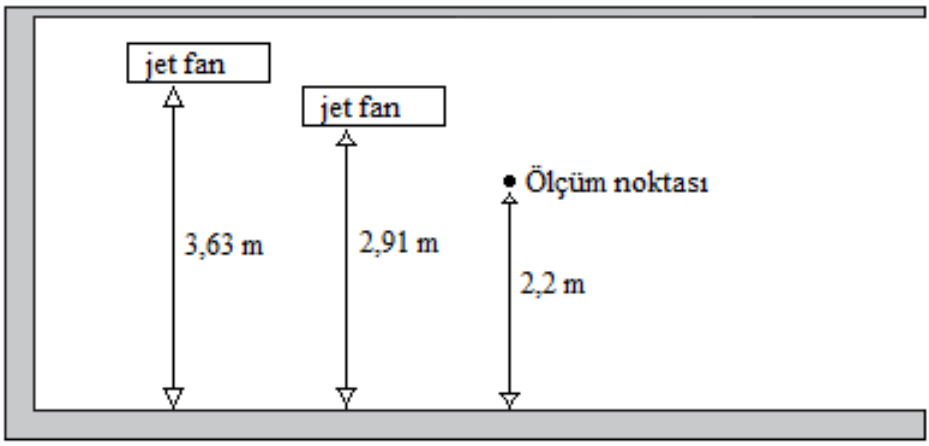
Günlük havalandırma ve Duman senaryoları

Alanı 2033 m² ve maksimum araç kapasitesi 38 olan otopark, günlük havalandırma senaryosu için başlangıçta 50 ppm CO ile doldurulmuştur. 7 adet jet fan, 2 adet ana egzoz fanı, bir taze hava açıklığından oluşan havalandırma sisteminin günlük havalandırmada CO yoğunluğu ve hız parametreleri otoparkın %10, %25, %50, %100 olmak üzere 4 ayrı araç doluluk oranına göre incelenmiştir. Günlük havalandırma senaryolarında Tablo 3'de yer alan soğuk ve sıcak emisyon değerleri dikkate alınmıştır. Tablo 3'e göre motor soğuk iken emisyon 61 mg/s ısınmış iken ise 31,5 mg/s olmaktadır. Tüm günlük havalandırma senaryolarında, araçlardan yayılan emisyon değerlerinin yarısı sıcak, yarısı soğuk emisyon kabul edilmiş olup ortalaması hesaplanmıştır. E, araç başına emisyon değeri,

E=(31,5+61)/2 = 46,25 mg/s

Yangın esnasında otopark alanında meydana gelen CO_2, CO, sıcaklık, duman yoğunluğu ve hava hızı parametrelerini deneysel olarak ölçmek zordur. CFD analizi ile bu parametreler herhangi bir deneye ihtiyaç olmadan, olası bir yangın durumunda meydana gelecek olan değişikliklerin önceden tahmin edilebilmesine yardımcı olmaktadır.

Jet fanlar yerden 2,91 metre ve 3,63 metre olmak üzere, 2 farklı yüksekliğe konumlandırılarak; jet fan yüksekliğinin CO_2, CO, sıcaklık, duman ve hava hızı parametrelerine etkisi incelenmiştir. Jet fanların asılma ve ölçüm noktalarının yerden yüksekliği Şekil 16'da verilmiştir (Sultansu, Onat, 2020).



Şekil 16. Jet fanlar ve ölçüm noktalarının konumlandırıldığı yükseklikler

GÜNLÜK HAVALANDIRMA ANALİZLERİ

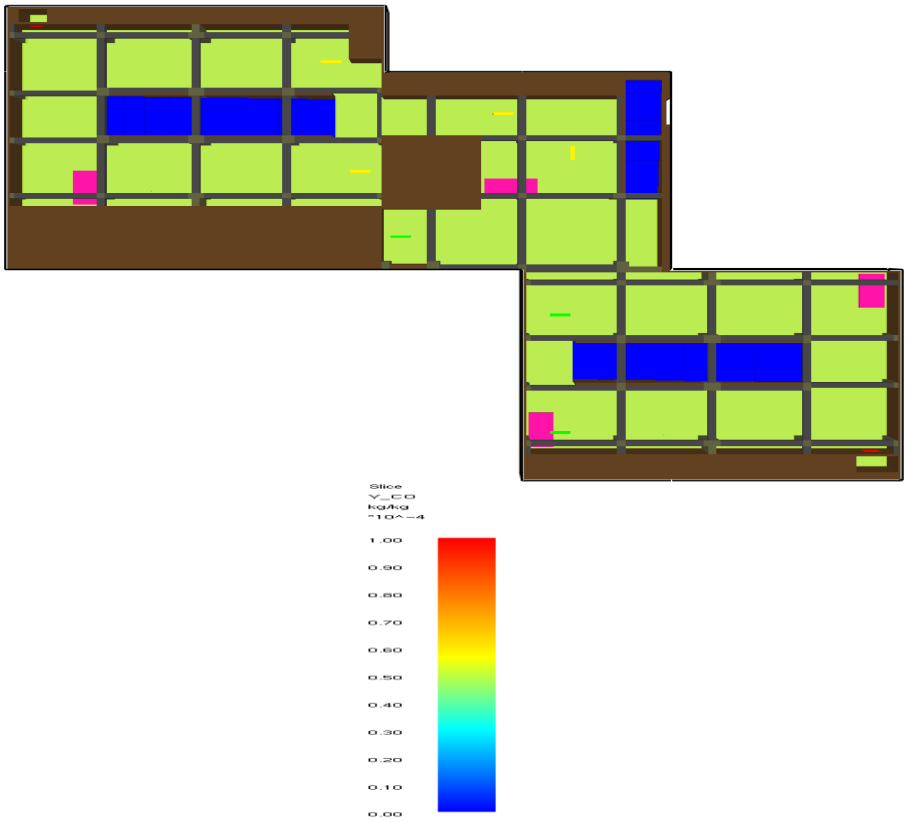
CO Yoğunluğu Değişimi

Yapılan bu senaryolara göre otopark araç kapasitesinin %10, %25, %50 ve %100'ü dolu varsayılarak Eşitlik 3 ve 4'de verilen formüller ile CO emisyonu ve CO konsantrasyonu hesaplanmış, sonuçlar Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. CO emisyon ve konsantrasyon değerleri

Oto-park alanı (m^2)	Otopark araç kapasi-tesi (adet)	Araç yoğun-luğu	E (mg/s)	C_T (mg/s)	C_c (mg/m^2s)
2033	38	10%	46,25	175,75	0,086448598
2033	38	25%	46,25	439,38	0,216121495
2033	38	50%	46,25	878,75	0,432242991
2033	38	100%	46,25	1757,50	0,864485981

Günlük havalandırma için yapılan tüm senaryolarda Şekil 17'de görüldüğü üzere başlangıçta tüm otopark hacmi 50 ppm CO ile doldurulmuş analiz işlemi daha sonra başlatılmıştır.



Şekil 17. Başlangıç koşullarında otopark alanında CO yoğunluğu

CO emisyonu modele otoparkın döşemesinden verilmiştir. Toplam simülasyon süresi 900 saniyedir. Jet fanlar simülasyonun başlangıcından itibaren aktif olarak çalıştırılmıştır. %10, 25, 50 ve 100 araç doluluk oranında, otopark döşemesinden itibaren 0,55, 1,65 ve 2,91 metre yüksekte alınan kesitlerde oluşan CO konsantrasyonları Tablo 9, Tablo 10, Tablo11 ve Tablo 12'de verilmiştir. Şekil 18'de ise CO konsantrasyonları karşılaştırılması gösterilmektedir (Sultansu, Onat, 2019).

Tablo 9. %10 araç doluluk oranına göre görülen maksimum CO değerleri

Döşemeden itibaren yükseklik (m)	**180.saniye CO_{max} (ppm)**	**540.saniye CO_{max} (ppm)**	**900.saniye CO_{max} (ppm)**
0,55	53	26	16
1,65	51	26	15
2.91	49	25	15

Tablo 10. %25 araç doluluk oranına göre görülen maksimum CO değerleri

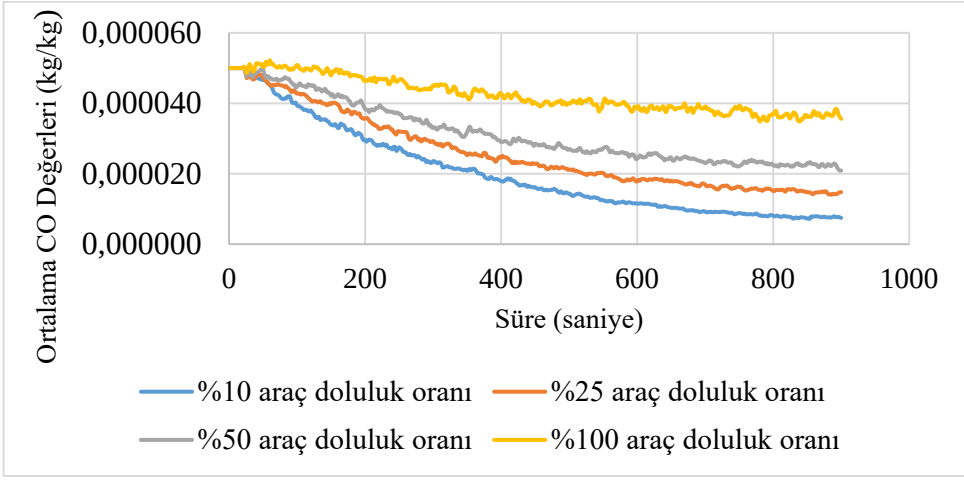
Döşemeden itibaren yükseklik (m)	**180.saniye CO_{max} (ppm)**	**540.saniye CO_{max} (ppm)**	**900.saniye CO_{max} (ppm)**
0,55	59	42	31
1,65	58	37	29
2.91	54	35	27

Tablo 11. %50 araç doluluk oranına göre görülen maksimum CO değerleri

Döşemeden itibaren yükseklik (m)	**180.saniye CO_{max} (ppm)**	**540.saniye CO_{max} (ppm)**	**900.saniye CO_{max} (ppm)**
0,55	73	62	52
1,65	65	53	45
2.91	63	49	42

Tablo 12. %100 araç doluluk oranına göre görülen maksimum CO değerleri

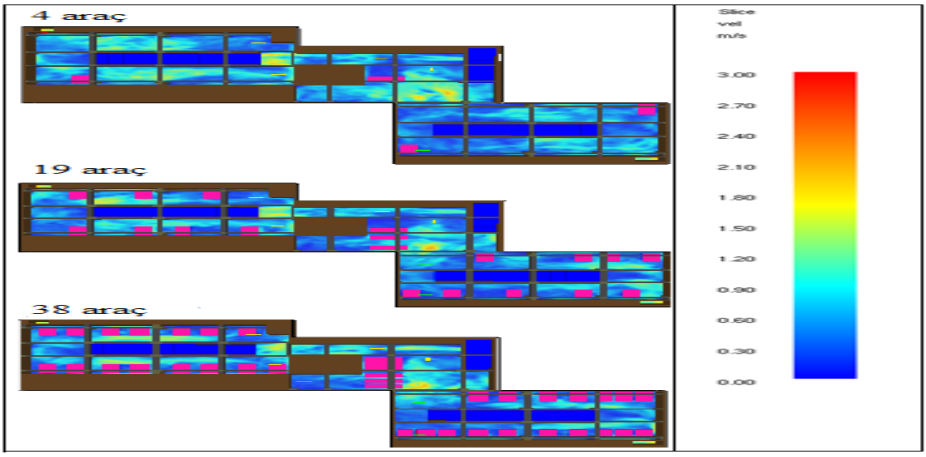
Döşemeden itibaren yükseklik (m)	**180.saniye CO_{max} (ppm)**	**540.saniye CO_{max} (ppm)**	**900.saniye CO_{max} (ppm)**
0,55	100	92	85
1,65	89	73	67
2.91	76	71	63



Şekil 18. Ortalama CO değerleri

Hava Hızı Dağılımı

Günlük havalandırma için farklı araç sayılarına göre otopark genelinde oluşan hava hızı dağılımları CFD analizi ile incelenmiştir. Otoparka sırasıyla 4, 19 ve 38 adet araç model olarak konumlandırılmıştır. Araçlar analizde 1,1 metre yüksekliğinde engel olarak tanımlanmış ve 0,55 metre yükseklikte elde edilen hız dağılımları Şekil 19'da verilmiştir. CFD sonuçlarına göre araçların yerleştirildiği bölgelerde hız profilleri incelendiğinde, araçların yoğun olduğu bölgelerde havanın durgun olduğu ve hızların düştüğü gözlemlenmiştir. Araçların bulunmadığı boş bölgelerde ise hava akışının hareketli olduğu ve hızların yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Sultansu, Onat, 2019).

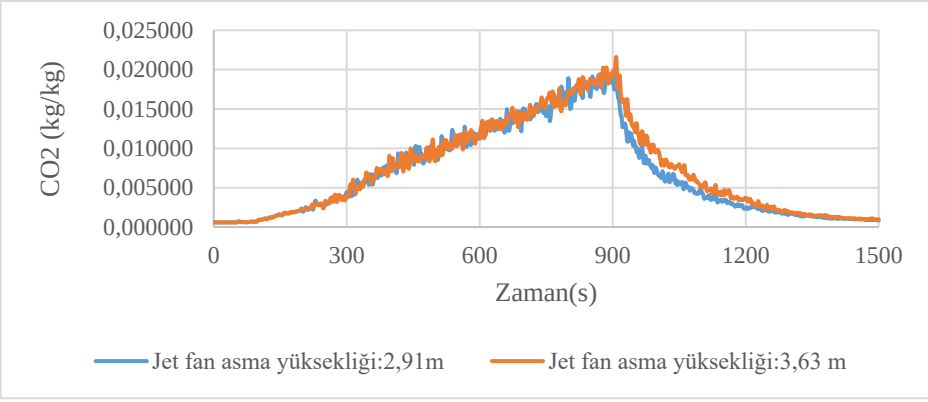


Şekil 19. Farklı araç sayılarına göre 0.55 metre yükseklikte hız dağılım profilleri

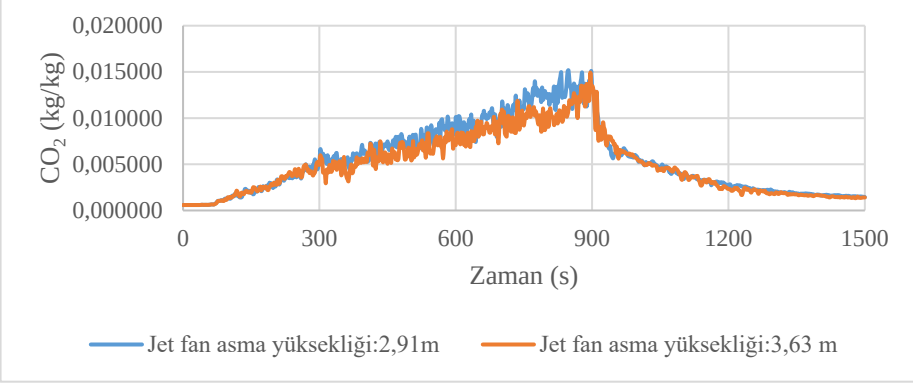
YANGIN VE DUMAN HAVALANDIRMASI ANALİZLERİ

CO_2 Yoğunluğu Değişimi

Yangın maksimum seviyeye ulaştığı anda Zon-1 ve Zon-2 alanları için yangın senaryolarında 2,91 m ve 3,63 m olmak üzere farklı iki jet fan asma yüksekliğinde, CO_2 gazının otopark içerisindeki dağılımları simülasyonda yerden 2,2 metre yüksekte bulunan ölçüm noktaları için, 1500 saniye süresi boyunca her iki saniyede bir CO_2 yoğunluğu ölçülmüş ve zamana bağlı değişimleri Zon-1 ve Zon-2 için sırasıyla Şekil 20 ve Şekil 21'de verilmiştir.



Şekil 20. Zon-1 yangın senaryosu/ Ortalama CO_2 yoğunluğunun zamana bağlı değişimi

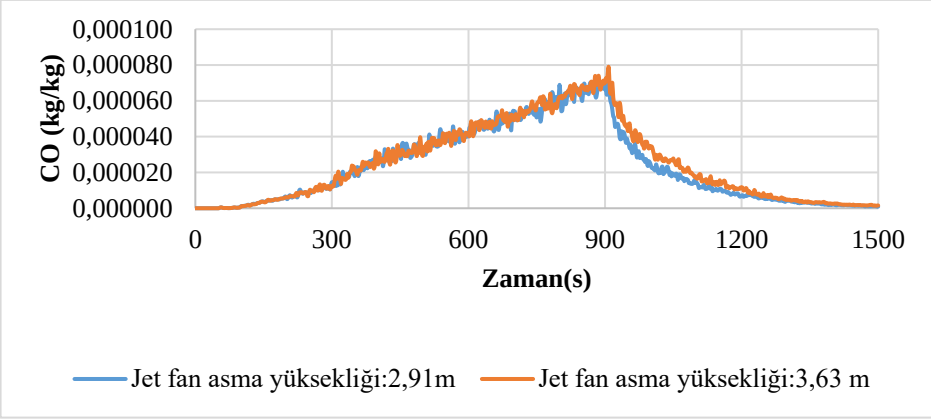


Şekil 21. Zon-2 yangın senaryosu/ Ortalama CO_2 yoğunluğunun zamana bağlı değişimi

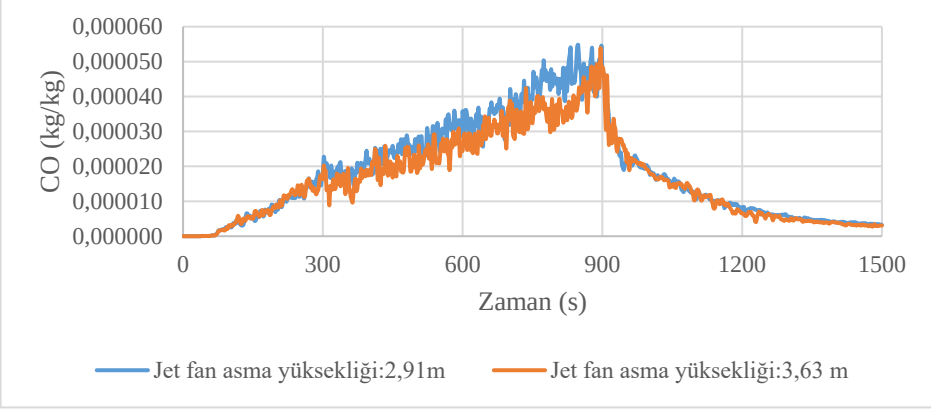
CO Yoğunluğu Değişimi

Yangın maksimum seviyeye ulaştığı anda Zon-1 ve Zon-2 alanları için yangın senaryolarında 2,91 m ve 3,63 m olmak üzere farklı iki jet fan asma yüksekliğinde, CO gazının otopark içerisindeki dağılımları simülasyonda yerden 2,2 metre yüksekte bulunan ölçüm noktaları için, 1500 saniye süresi boyunca her iki saniyede

bir CO yoğunluğu ölçülmüş ve zamana bağlı değişimleri Zon-1 ve Zon-2 için sırasıyla Şekil 22 ve Şekil 23'de verilmiştir.



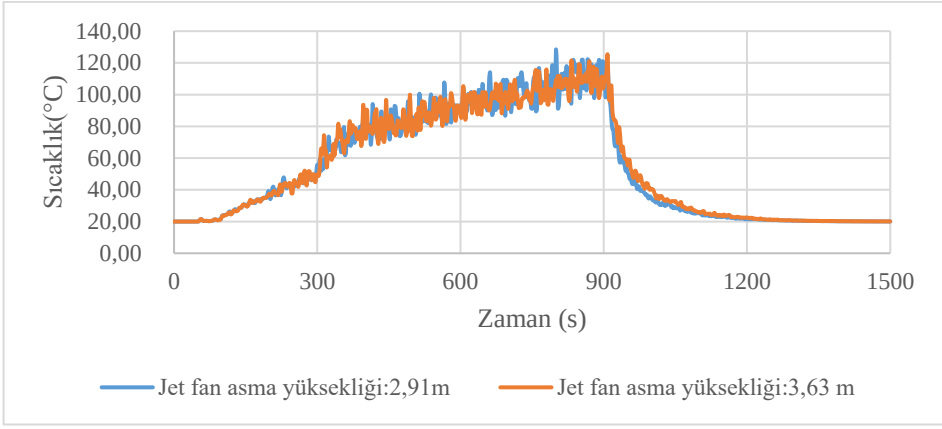
Şekil 22. Zon-1 yangın senaryosu/ Ortalama CO yoğunluğunun zamana bağlı değişimi



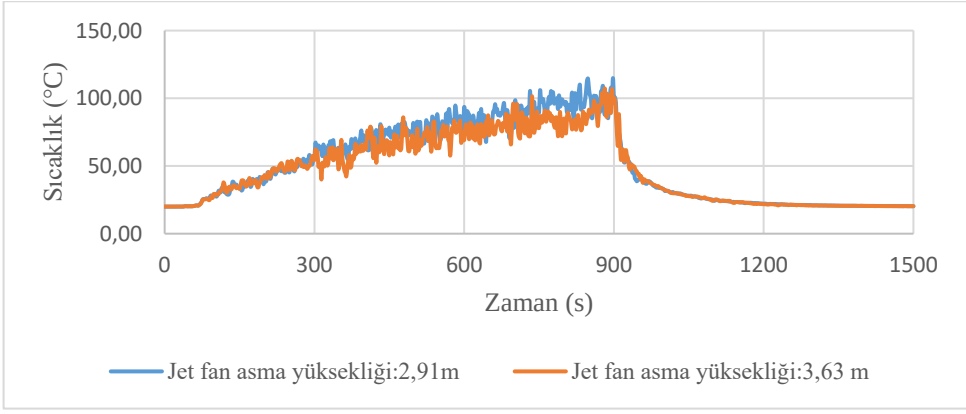
Şekil 23. Zon-2 yangın senaryosu/ Ortalama CO yoğunluğunun zamana bağlı değişimi

Sıcaklık değişimi

Yangın maksimum seviyeye ulaştığı anda Zon-1 ve Zon-2 alanları için yangın senaryolarında 2,91 m ve 3,63 m olmak üzere farklı iki jet fan asma yüksekliğinde, sıcaklığın otopark içerisindeki dağılımları simülasyonda yerden 2,2 metre yüksekte bulunan ölçüm noktaları için, 1500 saniye süresi boyunca her iki saniyede bir sıcaklık değerleri ölçülmüş ve zamana bağlı değişimleri Zon-1 ve Zon-2 için sırasıyla Şekil 24 ve Şekil 25'de verilmiştir.



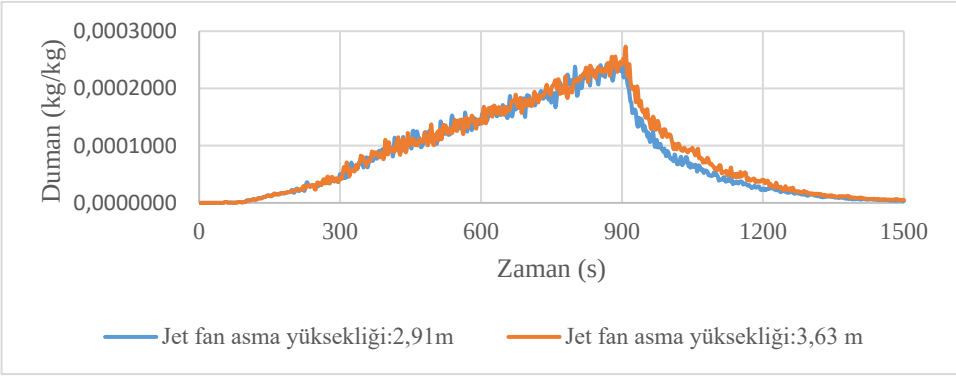
Şekil 24. Zon-1 yangın senaryosu/ Ortalama sıcaklığın zamana bağlı değişimi



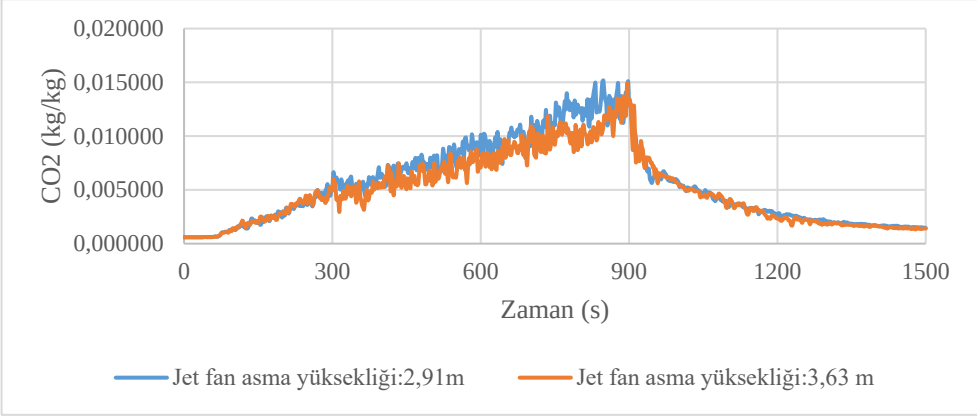
Şekil 25. Zon-2 yangın senaryosu/Ortalama sıcaklığın zamana bağlı değişimi

Duman Yoğunluğu Değişimi

Yangın maksimum seviyeye ulaştığı anda Zon-1 ve Zon-2 alanları için yangın senaryolarında 2,91 m ve 3,63 m olmak üzere farklı iki jet fan asma yüksekliğinde, dumanın otopark içerisindeki dağılımları simülasyonda yerden 2,2 metre yüksekte bulunan ölçüm noktaları için, 1500 saniye süresi boyunca her iki saniyede bir duman yoğunluğu ölçülmüş ve zamana bağlı değişimleri Zon-1 ve Zon-2 için sırasıyla Şekil 26 ve Şekil 27'de verilmiştir.



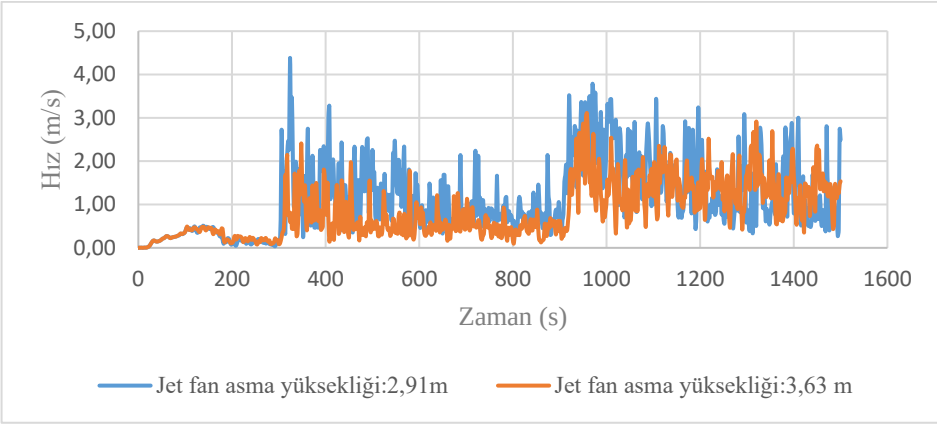
Şekil 26. Zon-1 yangın senaryosu/ Ortalama duman yoğunluğunun zamana bağlı değişimi



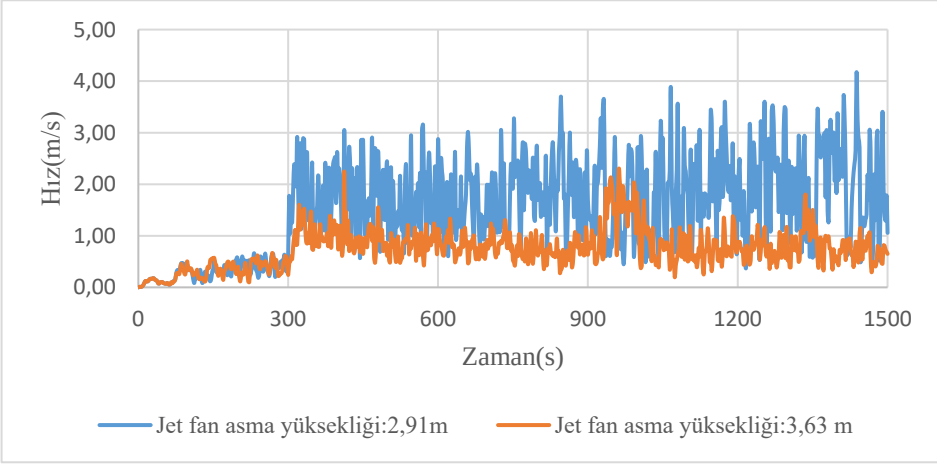
Şekil 27. Zon-2 yangın senaryosu/ Ortalama duman yoğunluğunun zamana bağlı değişimi

Hava hızı değişimi

Yangın maksimum seviyeye ulaştığı anda Zon-1 ve Zon-2 alanları için yangın senaryolarında 2,91 m ve 3,63 m olmak üzere farklı iki jet fan asma yüksekliğinde, hız profillerinin otopark içerisindeki dağılımları simülasyonda yerden 2,2 metre yüksekte bulunan ölçüm noktaları için, 1500 saniye süresi boyunca her iki saniyede bir hava hızları ölçülmüş ve zamana bağlı değişimleri Zon-1 ve Zon-2 için sırasıyla Şekil 28 ve Şekil 29'da verilmiştir.



Şekil 28. Zon-1 yangın senaryosu/ Ortalama hava hızlarının zamana bağlı değişimi



Şekil 29. Zon-2 yangın senaryosu/ Ortalama hava hızlarının zamana bağlı değişimi

SONUÇ

Kapalı otoparklarda yangın ihtimaline karşı, bu sistemlerin sadece günlük havalandırma için değil, aynı zamanda yangın esnasında acil durum havalandırma sistemi olarak da çalışması gerekmektedir. Bu sistemlerden biriside, geleneksel havalandırma kanallarına ihtiyaç olmadan tasarlanmış ve havayı sistemdeki fanların itme gücünün etkisi ile hareketlendiren jet fan sistemidir. CFD analizlerinde günlük havalandırma için CO ve hava hızı olmak üzere iki ayrı parametre, yangın simülasyonlarında ise CO_2, CO, sıcaklık, duman konsantrasyonu ve hava hızı olmak üzere beş ayrı parametre değerlendirilmiştir.

KAYNAKLAR

Alarko Carrier Sanayi ve Ticaret A.Ş. (2007). Fanlar: Özellikleri ve Analiz. Teknik Bülten(24).

ASHRAE. (2007). 2007 ASHRAE Handbook—HVAC Applications (SI).

ATC, Air Trade Centre. (2011). Kapalı Otopark Havalandırması için Yeni Jet Fanlı Sistemler ile Konvansiyonel Sistemlerin Karşılaştırması ve Jet Fanlı Havalandırma Sistemlerinin Tasarımındaki Kritik Faktörler. Tesisat(187), 78-86.

Aydoğdu, O. (2009). Kapalı Otoparklarda Jet Fan Tasarımı Tasarımı ve Kriterleri. Tesisat Dergisi.

British Standards Instutition (2006). Components for smoke and heat control systems. Part 7: Code of practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control systems for covered car parks.

Çengel, Y., Boles, M. (2008). Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Mc Graw Hill.

Giesen, B., Penders, S., Loomans, M., Rutten, P., Hensen, J. (2011). Modelling and simulation of a jet fan for controlled air flow in large enclosures. Environmental Modelling & Software, 26(2), 191-200.

Goel, R., Singh, B., Jian, Z. (2012). Ventilation in Underground Car Parks, Underground Infrastructures - Planning, Design, and Construction (s. 118-119). USA, Elsevier.

Kılıç, A. (2017). Otopark ve Tünellerde Jet Fan Havalandırma ve Duman Kontrolü. Türk Tesisat Mühendisleri Derneği, İstanbul.

National Institute of Standards and Technology. (2013). Fire Dynamic Simulator User's Guide. (Sixth Edition), National Institute of Standards and Technology.

Özceviz, N., Tari B., Onat A., (2018). Pratik Havalandırma Kılavuzu, İstanbul.

Sultansu, S., Onat, A., (2020). "The CFD Analysis of Ventilation and Smoke Control System with Jet Fan in A Parking Garage" International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences, 1: 89-95 DOI: 10.7240/jeps.522037.

Sultansu, S., Onat, A. (2019) **"**Kapalı bir otoparkın jet fanlı havalandırma ve duman kontrol sisteminin CFD analizi", Yüksek lisans Tezi, MÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

T.C. Resmi Gazete. 12937 (2007). Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik.

United States Environmental Protection Agency, Carbon Monoxide's Impact on Indoor Air Quality, https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/carbon-monoxides-impact-indoor-air-quality#Health_Effects

Viegas, J. C. (2010). The use of impulse ventilation for smoke control in underground car parks. Tunnelling and Underground Space Technology, 25(1), 42-53.

Witt, K., Schütze, J., Witt&Sohn AG. (2008). Effective Thrust Transformation Inside Tunnels with Jet Fans (Banana Jet). 4th International Conference “Tunnel Safety and Ventilation”, Graz.

BÖLÜM 9
HCCI MOTORLARDA YANMA VE EMİSYONLAR

Öğr. Gör. Güven DEMİRTAŞ[1], Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Kemal BALKİ[2], Dr. Öğr. Üyesi Sinan ERDOĞAN[3], Doç. Dr. Ayhan ONAT[4], Prof. Dr. Cenk SAYIN[5]

[1]Yozgat Bozok Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Yozgat, TÜRKİYE
[2]Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Sinop, TÜRKİYE
[3]Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Sakarya, TÜRKİYE
[4,5]Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İstanbul, TÜRKİYE

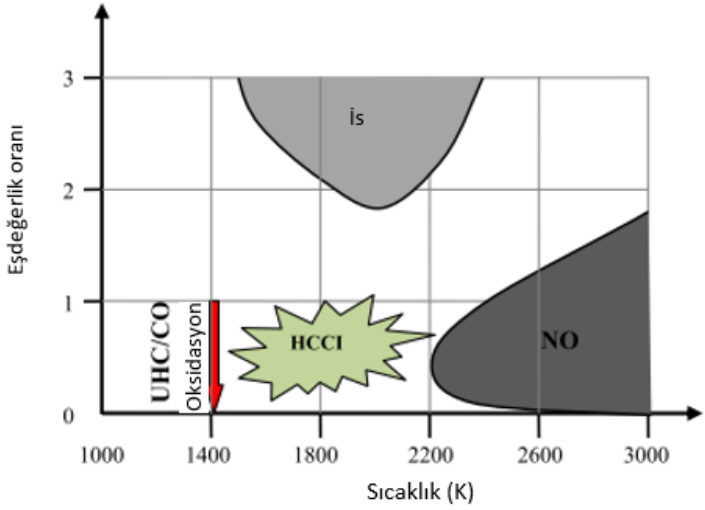
ÖZ: Günümüzde gelişen motor teknolojilerine paralel olarak çevresel kaygılar da her geçen gün artmaktadır. Artan araç sayısı, toplam yakıt sarfiyatının ve çevre kirliliğinin de artmasına sebebiyet verir. Yakıt sarfiyatının ve çevre kirliliğinin azaltılması amaçlanarak egzoz emisyonları için belirli standartlar oluşturulmuştur. Dizel motorlar, yüksek sıkıştırma oranı ve emme zamanında silindir içerisine alınan dolguda herhangi bir kısılma olmaması sayesinde yüksek termik verime sahiptir. Fakat azot oksit ve is emisyonları buna bağlı olarak artmaktadır. Buji ile ateşlemeli motorlarda ise vuruntu nedeniyle sıkıştırma oranının çok fazla artırılamaması ve farklı motor yüklerinde emme dolgusunun kısılarak kontrol edilmesi termik verimin düşmesine neden olmaktadır. Bu olumsuzlukları gidermek amacıyla her iki motor tipinin olumlu ortak özelliklerine sahip bir yanma modeli çözüm olabilmektedir. Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli yanma işlemi, buji ateşlemeli motor ile dizel motorunun iyi özelliklerini bir araya getirmektedir. Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorda, buji ateşlemeli motordakine benzer şekilde yakıt ve hava homojen olarak karıştırılmakta ve böylece klasik dizel yanma proseslerinde görülen is emisyonun azaltılması sağlanmaktadır. Bu çalışmada homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorunun çalışma şekli, emisyonları etkileyen parametreler ve yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalar analiz edilerek karşılaşılan zorluklar ve bu zorlukların üstesinden gelinebilecek yaklaşımlar tespit edilmeye çalışılmıştır.

GİRİŞ

Modern toplumlarda bile içten yanmalı motorların kullanımı hala devam etmekte ve günümüzde birincil güç kaynağı olarak önemini korumaktadır (Tong et

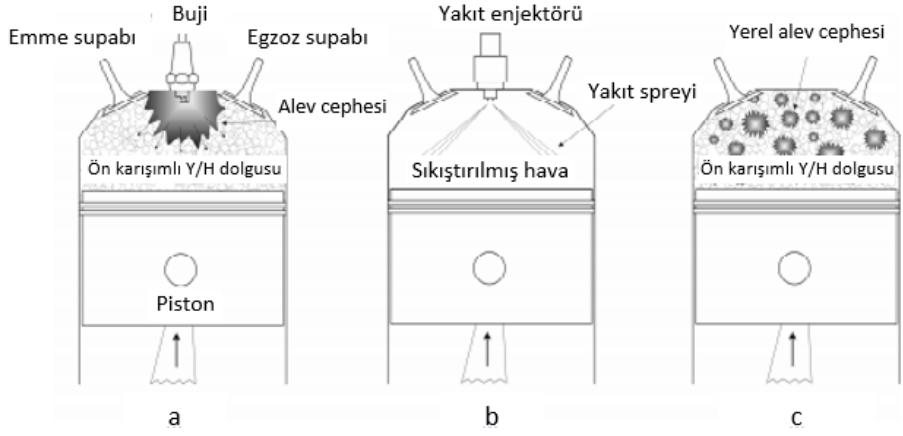
al. 2017; Zhou et al. 2019). İçten yanmalı motorlarda elde edilen güç, petrol türevli veya alternatif yakıtların enerjisi ile sağlanmaktadır. Bu yakıtlara duyulan ihtiyaç, dünyadaki araç sayısının yükselişine paralel olarak artmakta ve bunun sonucu olarak çevreye salınan zararlı emisyonlar da artış göstermektedir. Bu emisyonlar sera etkisinin şiddetine katkı sağlamakta, insan sağlığı ve çevreyi olumsuz bir şekilde etkilemektedir(Kumar and Rehman 2016). Bu artışa karşılık egzoz emisyon değerlerine getirilen sınırlamalar da katı hale getirilmektedir(Puškár and Kopas 2018). Birçok araştırmacı emisyonları azaltmak için çeşitli yöntemler denemekte ve geliştirmektedir. Bu çalışmaların birçoğu çeşitli alternatif yakıtların içten yanmalı motorlarda kullanımı ve belirli oranlarda yakıtların karışım halinde kullanımı üzerinedir. Bunun yanı sıra motor üzerindeki yapısal değişiklikler ve yanmanın iyileştirilmesi gibi çeşitli çalışmalar da mevcuttur. Buji ateşlemeli (SI) ve sıkıştırma ile ateşlemeli (CI) motorlarda kullanılan bu teknikerin yeterli olmadığı, bunun sonucunda yanma veriminin arttırılamadığı, dolayısıyla da emisyonlardaki azalmayı tam anlamıyla sağlayamadığı görülmektedir. Yanma veriminin arttırılmasıyla emisyonların da azalacağı bilinmekte ve bu yönde çalışmaların sürdürülmesi gerekmektedir.

Günümüzde kullanılan içten yanmalı motorlarda yanmamış hidrokarbon (UHC), karbonmonoksit (CO), azot oksitler (NOx), karbondioksit (CO_2) ve partikül madde (PM) başka bir deyişe is gibi zararlı egzoz emisyonları meydana gelmektedir. Salınan bu gazlardan bazıları SI motorlarda bazıları da CI motorlarda yüksek değerlerde görülmektedir. Araştırmalara göre NOx ve PM emisyonlarının, farklı bir yanma moduna sahip olan homojen doldurmalı sıkıştırma ateşlemeli (HCCI) bir motorda düşük seviyelerde olduğu belirtilmektedir(Ahari and Neshat 2019; Kumar and Rehman 2016; Zhou et al. 2019). Şekil 1'de HCCI teknolojisindeki yanma, fakir karışım ve sıcaklığın 1800 K değerlerinde olduğu bölgede gerçekleşmektedir. Dikkat edilirse yanma, PM, NO, UHC ve CO emisyon sınırlarından uzak bölgededir. UHC ve CO emisyonlarının HCCI yanmasında yüksek(Nazoktabar et al. 2019) olması karışımın fakir olması, yakıtın eksik oksidasyonu, çatlak hacimler gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır(Bendu and Murugan 2014).



Şekil 1. HCCI Yanmasında Nox ve Kurum Emisyonlarının Azaltılması (Bendu And Murugan 2014, S.732)

HCCI, CI ve SI motorların avantajlı özelliklerini bünyesinde barındırmaktadır(Coskun et al. 2018). HCCI motorda yakıt ile havanın karışımı sağlanmakta ancak ateşleme, buji ile değil dizel motorlarda olduğu gibi sıkıştırma sırasında dolgunun basınç ve sıcaklığı yükseltilerek kendiliğinden tutuşma olayı sağlanmaktadır (Bullock and Olfert 2014). Aşağıdaki şekilde SI, CI ve HCCI motorlarında silindir içerisinde ki yanma oluşumu verilmiştir.



Şekil 2. HCCI Motorda Yanma; A) SI, B) CI, C) HCCI (Aldawood 2007)

Dizel motorlarda yüksek bir termik verim kazanılması, sıkıştırma oranının yüksek oluşu, silindir içerisine havanın herhangi bir kısılmaya maruz kalmadan alınması ve silindir içerisine alınan yakıtın enjektör ile püskürtülmesi ile sağlanır

(Liu et al. 2016). Ancak yüksek sıcaklıkların NO_x emisyonlarını arttırdığı bilinmektedir (Alcan et al. 2019). Ayrıca dizel motorlarda is emisyonları da mevcuttur (Shim, Park, and Bae 2018).

SI motorlar vuruntu nedeniyle belirli bir sıkıştırma oranı aralığına sahiptir. Bunun yanı sıra farklı motor yüklerini kontrol edebilmek amacıyla karışımın silindirlere kısılarak alınması gerekmektedir. Bu yüzden SI motorlarda dizel motorlarda olduğu gibi yüksek bir termik verim elde edilemez (Calam and Solmaz 2019). SI motorlarda dizel motorların aksine NO_x ve is emisyonları düşükken CO ve HC emisyonları yüksektir. Üç yollu katalitik konvertörler sayesinde bu emisyonlar indirgenebilmektedir(Wu, Chen, and Wang 2016). Ancak katalitik dönüştürücülerin sağlıklı çalışması için stokiyometrik hava-yakıt oranı gereklidir. Bazı motor tiplerinde bu oran istenilen değerde tutulamamaktadır.

HCCI motorlarda hava yakıt karışımı oranları dizel motorlarda olduğu gibi genellikle fakirdir. Karışımı içerisindeki yakıt seyreltildiğinden maksimum basınç ve sıcaklıklar buji ile ateşlemeli motorlarla karşılaştırıldığında daha düşüktür. Böylece HCCI motorların azot oksit ve partikül emisyonları düşük ve verim yüksektir (Shahangian, Keshavarz, and Jazayeri 2009).

SI ve CI motorların üzerinde yapılan değişiklikler sonucunda HCCI yanma sistemine dönüşüm yapılabilmektedir. HCCI motorlar homojen dolgulu olarak oldukça fakir karışımlar ile çalışır (Kumar and Rehman 2016). Bu yeni yanma şekli ile herhangi bir özel yakıta bağımlı olmadan, dizel ve benzin yakıtlarının yanında biyodizel, etanol, metanol, doğal gaz ve dimetil eter gibi çok çeşitli alternatif yakıtlar kullanılabilmektedir (Khandal, Banapurmath, and Gaitonde 2019). Bu çalışmada HCCI motorların emisyon fazına etki eden parametrelerin ne olduğu ve emisyon oranlarını ne şekilde etkilediği ortaya konulmaktadır.

HCCI MOTORDA YANMA ve EMİSYONLARI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Emme Havası Sıcaklığı

HCCI yanma teknolojisinde hava-yakıt karışımı sıkıştırma zamanındaki sıcaklık artışı ile kendiliğinden tutuşmaktadır. Karışımın silindir dışında hazırlandığı uygulamalar vardır. Bu özellikleri ile hem SI hem de CI motorlar ile benzer özellikler göstermektedir. Fakat HCCI yanma olayı, SI ve CI motorlarda olduğu gibi kontrolü kolay değildir (Laurinaitis and Slavinskas 2013). Emme havası giriş sıcaklığı yakıtın reaksiyona girme yeteneği üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Giriş sıcaklığının artışı aktif moleküllerin sayısını arttırmakta, moleküllerin çarpışma olasılığı artmakta böylece reaksiyon hızını arttırmaktadır. Bununla birlikte

reaksiyon hızını da kısaltmaktadır. Dolayısıyla yanma verimi ve egzoz emisyonları üzerinde de önemli etkileri olmaktadır (Cinar et al. 2015; Jo et al. 2019; Zhang et al. 2011). Yüksek emme havası sıcaklıkları HCCI yanmasını geliştirmekte (Gowthaman and Sathiyagnanam 2017), fakat bu koşullardaki kontrol edilebilir çalışma aralığı nispeten sınırlı kalmaktadır. Eğer kendi kendine tutuşma sıkıştırma zamanı sırasında gerçekleşecek kadar gelişirse, termik verimde bir kayba neden olacağından dolayı kontrol edilebilir çalışma aralığının haricinde motorun, hacimsel ve termik verimleri büyük ölçüde azalır. Aynı zamanda motor yükü ve hızı değiştiğinde bu olayları karşılamak üzere dolgu sıcaklığına müdahale edilmezse kendi kendine tutuşma zamanlaması yine değişkenlik gösterebilmektedir. Özellikle çevrim açısından düşünüldüğünde kısa sureli şartlar altında emilen havanın ısıtılmasındaki sınırlılıklardan dolayı bu tür müdahalelerde bulunmak oldukça zorlaşmaktadır. (Tunka and Polcar 2017).

Maurya ve Agarwal (2010) sabit bir motor hızında çalışan bir etanol yakıtlı port enjeksiyonlu HCCI motorundaki emme havası sıcaklığının ve hava/yakıt oranının çevrimden çevrime değişimine etkisini incelemişlerdir. Daha düşük giriş havası sıcaklığında daha zengin karışımın hava fazlalık katsayısının (λ=2'ye kadar) tutuşturulabileceğini gözlemlediler. Emme havası giriş sıcaklığının artışı ile daha zengin karışımda çalışan motorun yüksek basınç artışı nedeniyle vuruntu eğiliminde olduğu ve daha fakir karışımda λ=5.5 değerine kadar tutuşmanın mümkün olduğu belirtilmiştir. Maksimum basıncın (P_{max}) değişkenlik katsayısının (COV) zengin karışımla ve emme havası giriş sıcaklığı artışı ile arttığını gözlemlemişlerdir (Maurya and Agarwal 2011a).

Zhang ve diğ. (2011) emme sıcaklığı ve karışım yoğunluğunun HCCI yanma karakteristikleri ve emisyonlar üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada yakıt olarak etanol, metanol ve benzin kullanmışlardır. Giriş sıcaklığının artışı ile birlikte tepe basıncının önemli ölçüde arttığı belirtilmektedir. Benzin ile yapılan çalışmada HC ve CO emisyonlarında düşüş yaşandığı emme sıcaklığı artışı nedeniyle de NOx emisyonun yükseldiği ifade edilmiştir. Metanol kullanımıyla en düşük HC emisyonu elde edilmiş ve üç yakıt için NOx emisyonunun önemli ölçüde azaldığı ayrıca λ=2.5 değerinde sıfır olduğunu belirtmişlerdir (Zhang et al. 2011).

Çınar ve diğ. (2014) belirli oranlarda n heptan ve izooktan karışımlı bir HCCI motorda emme havası sıcaklığının yanma performansı ve emisyon karakteristikleri üzerine yaptığı çalışmada emme havası sıcaklığının artışı ile ateşleme zamanlamasının önemli ölçüde etkilendiği görülmüştür. HCCI yanmasının geliştiği, buna bağlı olarak CO emisyonunun azaldığı ancak NO emisyonunun artış göster-

diği belirtilmiştir (Cinar et al. 2015). Gowthaman ve Sathiyagnaman (2017) yaptığı çalışmada benzer sonuçlara rastlanmaktadır. Emme havası sıcaklığının artışıyla CO ve HC ve is emisyonlarında azalma, NOx emisyonunda artış yaşanmıştır. Emme havası sıcaklığının artışı fren termik verimini arttırdığı, yakıt tüketimin azaldığı belirtilmektedir. Ancak geleneksel dizel motor ile karşılaştırıldığında özgül yakıt tüketimini daha yüksek olduğu belirtilmektedir (Gowthaman and Sathiyagnanam 2017). Jo ve diğ. (2019) reaktif kontrollü sıkıştırma ateşlemeli (RCCI) yanmalı bir motorda, dizel yakıtı etanol tedarik oranının enjeksiyon zamanlamasının ve emme havası sıcaklığının yanma performansı ve egzoz emisyonları üzerine etkilerini incelemişlerdir. Toplam HC ve CO emisyonunun azaldığı, NOx emisyonun ise artış gösterdiği kaydedilmiştir (Jo et al. 2019). Zang ve diğ. (2015) dört silindirli bir motorda n-heptan ve benzin kullanarak emme havası giriş sıcaklığına göre yanma ve emisyona etkilerini incelemişlerdir. Emme havası sıcaklığının azalması ile birlikte ısı yayılımının ve maksimum basıncın azaldığı, Teorik ortalama etkili basıncın (IMEP) önce düştüğü sonra atış gösterdiği ifade edilmiştir. Emme havasının yaklaşık 55℃ sıcaklıkta olduğu değerlerde yanmanın kötüleştiği ve hatalı ateşlemenin gerçekleştiği belirtilmektedir. Emme havası sıcaklığının artışı CO ve HC emisyonlarında azalmalar yaşandığı kaydedilmiştir (Zhang et al. 2015).

Wang ve diğ. (2019) farklı koşullarda yanma işlemini kontrol etmek için etkili yöntemler ortaya koymak amacıyla, doğal gaz (NG) ile çalışan bir HCCI motorunda, farklı giriş sıcaklığındaki ve yüksek λ değerindeki yanma özellikleri incelemişlerdir. Yanma başlangıcının giriş sıcaklığına ve λ'ya duyarlılık analizini farklı hızlarda gerçekleştirmişlerdir. Karışımın fakirleşmesiyle silindir içi basıncın ve ısı yayılım oranın (HRR) azaldığı, yanma başlangıcının (SOC) geciktiği ve yanma süresinin (DOC) uzadığı belirtilmiş. Fakat giriş sıcaklığının artışı ile silindir içi basıncın ve HRR'nin arttığı, SOC'un ilerlediği ve DOC'un kısaldığı bildirilmiştir (Z. Wang et al. 2019).

Sıkıştırma Oranı

Sıkıştırma oranı yanma olayını ve termal verimi önemli ölçüde etkileyen yapısal parametrelerden biridir. Dolayısıyla bu oran yakıt sarfiyatı ve emisyonları etkilemektedir. (Hawi et al. 2019; Rosha et al. 2019; Sayin and Balki 2015; Verma et al. 2019) Sıkıştırma oranının artışı bazı araştırmalarda CO emisyonlarını arttırdığı bazılarında ise azalttığı yönündedir(Choudhary, Nayyar, and Dasgupta 2018; Hadia et al. 2017). Yine bu oranın yüksek olması hem SI hem de CI motorlarda ısı yayılımını arttırdığı, yakıt tüketimini ise düşürdüğü belirtilmektedir (Pal and

Agarwal 2015). Sıkıştırma oranının yüksek olması teorik olarak olumlu yönde etki ederek dizel motorlarda yüksek tork ve verimlilik sağlamaktadır (Hariram and Vagesh Shangar 2015). Ancak uygulamada sürtünme ve mekanik zorlanmalar artmaktadır (Yüksek, Özener, and Kaleli 2013). Bu durum optimum sıkıştırma oranı sınırları aşıldığında meydana gelmektedir. Ayrıca sıkıştırma oranının artışı yakıtın kendiliğinden tutuşmasına sebep olup istenmeyen yanma olayı gerçekleşebilmekte ve bu ateşleme zamanlamasını etkileyen faktörlerden birisi olmaktadır (Gnanamoorthi and Devaradjane 2015). Sıkıştırma oranında çok küçük yüzde değişimler büyük bir ateşleme zamanlamasının dönüşümüne sebep olmakta bununla birlikte silindir içerisindeki tepe basıncını etkilemektedir (Şöhret, Gürbüz, and Akçay 2019). Sıkıştırma oranı SI motorlarda vuruntu nedeniyle ve benzinin oktan sayısından ötürü sınırlandırılmaktadır.

Sıkıştırma oranının buji ateşlemeli ve sıkıştırma ateşlemeli motorlarda optimum değerlerinin dışında dezavantajlıdır. Pratikte uygulanabilirliğinin olması HCCI motorlarda avantaja dönüştürülebilir. Yoon ve Park (2019) sıkıştırma oranının artışı, daha hızlı bir yanma, silindir basıncı ve ısı tahliye oranlarının artışına sebep olduğunu bildirdiler(Yoon and Park 2019). Sıkıştırma oranının değiştirilmesi ateşleme zamanlamasını etkilediğine göre, HCCI motorlarda yanma işlemi ateşleme zamanlaması ile kontrol edilebildiği için buna bağlı olarak sıkıştırma oranı ile HCCI motorunun yanma işlemi kontrol edilebilir.

Hadia ve diğ. (2017) sıkıştırma oranı ve buhar enjeksiyonunun HCCI motorda performans, yanma ve emisyon karakteristikleri üzerine birleşik etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Sıkıştırma oranının arttırılması ile maksimum silindir basıncının, IMEP değerinin artış gösterdiği bildirilmiştir. Sıkıştırma oranın artışı ile yanma için gerekli sürenin azaldığı ve CO emisyonlarında artış, CO_2 konsantrasyonunda azalma yaşandığı belirtilmiştir. Çalışmada sıkıştırma oranı ve buhar enjeksiyonunun birleşik etkisinin emisyonları azalttığı bildirilmiştir (Hadia et al. 2017).

Li ve diğ. (2019) yaptıkları nümerik çalışmada, benzin ve biyodizel yakıtlı RCCI bir motorda strok uzunluğunu ve IVC zamanlamasını değiştirerek gerçekleştirdikleri farklı efektif sıkıştırma oranının etkilerini araştırmışlardır. Hem strok uzunluğu hem de IVC zamanlaması değiştirilerek belirli ECR değerlerini elde etmişlerdir. Yüksek ECR değerlerinde ateşleme gecikmesinin kısaldığı, daha yüksek bir tepe basıncı ve daha yüksek sıcaklıkların meydana geldiği buna bağlı olarak da NO emisyonlarının artış gösterdiğini bildirmişlerdir (Li et al. 2019).

Calam ve diğ. (2018) HCCI motorda sıkıştırma oranının yanma performansına ve egzoz emisyonlarına etkisi incelemişlerdir. Giriş havasının sabit sıcaklıkta

tutulduğu (353 K) ve farklı hava /yakıt oranlarında gerçekleştirdikleri çalışmada, Sıkıştırma oranı (CR) artışı ile artan basınç ve sıcaklıkların etkisiyle kendiliğinden tutuşmanın meydana geldiği ve yanmayı geliştirdiğini bildirmişlerdir. Daha yüksek CR ile birlikte yüksek oktanlı yakıtın kullanılması maksimum basınca ve gecikmiş ısı salınımına yol açtığı belirtilmiştir. CO ve HC emisyonları CR artışı ile birlikte azaldığı, düşük CR çalışma koşullarında NOx emisyonunun azaldığı, CR'nin artışı ile NOx'in biraz arttığı ifade edilmiştir (Calam, et al. 2019).

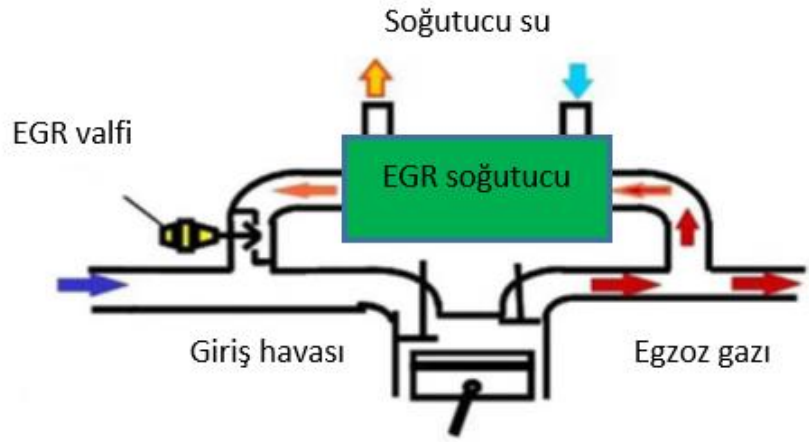
Egzoz Gazı Resirkülasyonu ve Art Gazların Etkisi

Egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) egzoz gazının bir kısmının tekrar silindir içerisine gönderilmesi işlemidir (Peham et al. 2017). Bu işlemde EGR üç görev üstlenmektedir. İlk olarak bu egzoz gazları, silindire gelen hava akımındaki oksijen konsantrasyonunu azaltmaktadır (yanıcı olmayan kütle artışı). İkinci olarak yanma işlemi sırasında egzoz gazları, oluşan sıcaklıkları absorbe etmekte (egzoz gazı içerisindeki gazların termal etkileri) ve son olarak aktif bir gaz olan CO_2 yanma işlemindeki kimyasal etkisidir. Bu üç etki silindir içi tepe sıcaklıklarını ve NOx oluşumu için gerekli O_2'yi azaltmaktadır (Dimitrakopoulos et al. 2019; Thangaraja and Kannan 2016). Bhaduri ve diğ. (2017) HCCI bir motorda EGR'nin termal ve kimyasal etkilerini incelemişlerdir. Kimyasal etkilerin termal etkilere kıyasla çok düşük olduğunu bildirmişlerdir (Bhaduri, Jeanmart, and Contino 2017). Xu ve diğ. (2015) EGR'nin indike ortalama efektif basınç ve PPRR üzerine çok az etkisi olduğunu ifade etmişlerdir(Xu, Gui, and Deng 2015). Zhou, ve diğ. (2018) kıvılcım yardımlı sıkıştırma ateşlemeli (SACI) motorda EGR uygulamasının ayrık enjeksiyon stratejisiyle yanma performansı ve vuruntu direnci üzerine etkilerini incelemişlerdir. e-EGR ile ayrık enjeksiyon uygulamasının vuruntu direnci ve motor verimliliği üzerinde olumlu etkilerini gözlemlemişlerdir. (Zhou et al. 2018). EGR teknolojisindeki temel amaç NOx emisyonlarını azaltmaktır ve bu yöntem ile NOx emisyonları büyük ölçüde azaltılabilmektedir Birçok araştırmada EGR teknolojisinin NOx emisyonlarını azaltmada etkili bir yöntem olduğu belirtilmektedir (Kim and Lee 2006; Kumar et al. 2019; Pan et al. 2019; Wang et al. 2019). EGR teknolojisi SI ve CI motorlarda NOx emisyonlarını azaltmak için kullanılmaktadır(Lattimore, Wang, et al. 2016). Fakat EGR oranının artışı PM, HC, CO emisyonları üzerine olumsuz etkileri olduğu birçok araştırmada bildirilmiştir (Das, Subbarao, and Subrahmanyam 2015;).

İçten yanmalı motorlarda dolgunun seyreltilmesi iki şekilde uygulanmakta ve bunlar dahili ve harici EGR olarak adlandırılmaktadır. Harici EGR'de egzoz gazı egzoz alınmakta ve giriş portuna verilmektedir. Dahili EGR'de ise egzoz zamanı

esnasında NVO'yu arttırarak gerçekleştirilmektedir. Ancak bu metotta değişken bir supap zamanlaması oluşturmak için kam profillerinin hızla değiştirilebileceği bir sistem gerekmektedir. Aksi takdirde EGR oranı bağımsız ve etkili bir şekilde kontrol edilemez. Günümüz araçlarında genellikle harici EGR kullanılmaktadır. İçten yanmalı bir motor üzerinde harici EGR'nin kısımları Şekil 3'te görülmektedir (Thangaraja and Kannan 2016; Wei et al. 2012).

Harici EGR sistemi EGR borusu, EGR valfı ve EGR soğutucusundan (soğutmalı EGR) oluşur. Egzoz gazı, EGR valfı ve EGR soğutucusundan geçer ve ardından emme manifolduna girer. Motor soğutma sıvısı EGR soğutucusundan geçer. EGR valfı çeşitli EGR oranlarını elde etmek için ayarlanabilir.



Şekil 3. EGR Teknolojisi (Pham Et Al. 2017, Ss. 625-644)

Bir başka sınıflandırma da sıcak ve soğuk EGR olmak üzere iki çeşittir. Sıcak EGR egzoz gazının doğrudan giriş havası ile karıştırılması işlemi olarak adlandırılmaktadır. Soğuk EGR ise egzoz gazının soğutularak giriş havasına karıştırılma işlemidir. Her iki uygulamanın farklı avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Sıcak EGR giriş havasının sıcaklığını arttırarak yanmayı iyileştirebilir. Soğuk EGR hava yoğunluğunu arttırarak volümetrik verimi arttırabilir, düşük sıcaklık sebebiyle NOx azaltılabilir ve SI motorlarda vuruntuyu önleyebilir (Wei et al. 2012).

HCCI motorlarda hava yakıt buharı karışımı, aşırı hava ya da EGR ile seyreltilebilmektedir. Bu şekilde kendiliğinden ateşleme noktasına kadar sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu durumda reaksiyon, silindirin içerisinde birden fazla noktada ve aynı anda başlatılmakta, karışımın neredeyse aynı anda yanması sağlanmaktadır. Ancak kendiliğinden tutuşmayı kontrol etmek güçtür. Homojen dolgu, reaktantların konsantrasyonu ve sıcaklığı yeteri derecede olduğu zaman

tutuşmaktadır. Sıkıştırma oranı, dolgunun önceden ısıtılması, süperşarj donanımını olması ve EGR gibi farklı parametreler kendiliğinden tutuşmayı etkilemektedir (Hassan et al. 2017). Oh ve diğ.(2015) nümerik çalışmadasında EGR'nin sahip olduğu yüksek özgül ısı kapasitesinin soğutma etkisinin, otomatik ateşlemeyi etkilediğini belirtmişlerdir (Oh, Jamsran, and Lim 2015). Sjöberg ve Dec (2011) EGR'nin otomatik ateşlemeyi etkilediğini bildirmişlerdir (Sjöberg and Dec 2011). Jamsran ve Lim (2016) doğal gaz yakıtlı HCCI motorda EGR ve ek ısıtmanın otomatik ateşlemeye etkisini incelemişlerdir. Makul bir EGR artışı ve ek ısıtmanın kombinasyonu ile vuruntu meydana gelmeden kendiliğinden ateşleme işleminin uzatılabileceği sonucuna varmışlardır (Jamsran and Lim 2016). HCCI motorlar, yüksek silindir basıcının motoru tahrip edici etkisinden kaçınmak için fakir ve seyreltilmiş yakıt karışımı ile çalıştırılır. HCCI motorlarda EGR kullanımı ile pik basınçlar, NOx emisyonu azaltılabilmekte, kendiliğinden tutuşmanın zamanı değiştirilebilmekte ve çalışma sınırları genişletilebilmektedir (Anderlohr et al. 2009; Dubreuil et al. 2007). EGR oranı belirli değerinden sonra karşım fakirleşmekte ve yanma işleminin kararsızlaşmaktadır. EGR artışı ile yanma işleminde çevrimden çevrime değişimler meydana gelmektedir (You-cheng et al. 2016a).

Fang, ve diğ. (2012) Düşük EGR seviyesine sahip HCCI-DI yanması, NOx emisyonunu daha da azaltmak için uygun bir metot olduğu bildirilmiştir. Ancak EGR oranının artışı ile duman emisyonlarında artış gözlenmiş ve bu seviyenin makul sınırlarda olduğunu bildirmiştir. (Fang et al. 2012).

Jung ve Lida (2016) Deneysel çalışmanın sonucunda harici e-EGR'nin kütlesindeki bir artışın yanma safhasının geciktirdiğini gözlemlemişlerdir. Yanma fazının gecikmesi ile maksimum basınç artış hızında azalmaya sebep olduğu anacak HCCI yanmasında döngüden döngüye değişimlerin kabul edilemez sınırlara ulaştığı belirtilmiştir (Jung and Iida 2017).

Doldurma Basıncı

Emme havası giriş basıncı aynı silindir hacmine sahip motordan daha fazla güç elde etmek için kullanılan bir yöntemdir. İçten yanmalı motorlarda süper şarj ve turbo şarj olarak iki farklı sistem kullanılmaktadır. Bu sistemler yardımıyla emme havasının giriş basıncı yükseltilerek hava veya dolgu yoğunluğu arttırılır. Hava miktarına göre yakıt miktarı da arttırılarak yüksek motor gücü elde edilmektedir. Bunu yanı sıra fakir bir karışım elde edilmek istendiğinde yakıt miktarı azaltılmakta ve NOx emisyonları bu şekilde azaltılabilmektedir. Şarj basıncının artışıyla yüksek IMEP değerleri, volumetrik verim ve iyi bir termik verim elde edilebilir (Bendu and Murugan 2014; Luo et al. 2019; Roy et al. 2009). Lei ve diğ.

(2010) yaptığı çalışmada basınç dalgalı süper şarj yöntemi ile giriş basıncı üzerinde yaptığı değişikliğin motor performansı ve NOx emisyonu üzerinde olumlu sonuçların alınabileceğini bildirmiştir (Lei, Zhou, and Zhang 2010). Turbo şarjlı diesel motorlar doğal emişli motorlar ile karşılaştırıldığında bazı eksikliklerin olduğu görülmektedir. Geçici koşullar altında meydana gelen bu sorunlar gaz akışı, tork gecikmesi ve yüksek kurum emisyonlarıdır (Liu et al. 2019).

HCCI yanma hızını kontrol etmek için çok daha fakir karışımlar, yani seyreltilmiş karışım kullanılmaktadır. Bu işlevi EGR veya H/Y oranının artışı ile sağlanabilmektedir. Karışımın çok fakir olması da ateşleme ilgili sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Bu değerin optimum değerlerde olması gerekmektedir. Doldurma basıncı, motorun IMEP değerinin yükseltilmesinde ve HCCI yanma için hava-yakıt oranının kullanılma sahasının genişletilmesinde etkili bir yol olarak kabul edilmektedir. Christensen diğ. (1998) çalışmasında süper şarjın HCCI motorda IMEP değerini istenilen seviyelere ulaştırabilme potansiyelinin olduğunu belirtmişlerdir. Farklı yakıtların ve parametrelerin değiştirilmesi, bu konuda önemli bir role sahip olduğu belirtilmektedir. Süper şarjın CO, HC ve NOx emisyonları üzerinde olumlu sonuçlar gösterdiği ifade edilmektedir (Christensen et al. 1998).

Çanakçı (2012) Ağır hizmet tipi dizel motoru DI-HCCI benzinli motora dönüştürmüştür. Üç farklı emme havası basıncı ile yaptığı çalışmada basıncın artışı ile maksimum silindir basınç noktasının yükseldiği, yanma reaksiyonunun arttığı, yanma süresinin basınçla birlikte motor devrinin artışı ile azaldığını belirtmiştir. Çevrimden çevrime olan değişimlerin maksimum giriş basıncı ile elde edildiği gözlenmiştir. Yanma başlangıcının, motor devrinden daha çok giriş basıncından etkilendiği belirtilmiştir. Giriş basıncı artışı ile NOx emisyonlarında ciddi azalmalar tespit etmiştir. Ancak UHC emisyonlarının arttığı ve SOC noktasının değişmesi neticesinde gerçekleşen yakıtın katmanlaşmasının sonucu olarak oluşan homojensizliğin CO emisyonunu arttırdığı ifade edilmiştir (Canakci 2012).

Oh ve diğ. (2015) Normal şartlarda EGR'nin özgül ısı kapasitesinden ötürü silidir içi ısı salınım hızını düşürdüğü belirtilmiştir. Silindir içi giriş basıncının iki katına yükseltmişlerdir. Bunun sonucu olarak artan oksijen otomatik ateşleme reaktivitesini arttırdığı ve böylece ısı salınım miktarının yükseldiğini bildirmişlerdir (Oh et al. 2015).

Jamsran ve Lim (2016) Giriş basıncının artışı ile yanma süresinin azaldığı, reaksiyon hızlarının artış gösterdiği ve basınç artış oranının hızlı bir şekilde yükseldiğini bildirdi. Sonuç olarak da vuruntu meydana geldiği belirtilmiştir. Giriş basıncının 2 bar ve %50 EGR oranı ile silindir içi yakıt reaksiyonlarında meydana

gelen ileri ve geri reaksiyon hızlarının azaltıldığı ve vuruntunun ortadan kalktığı bildirilmiştir (Jamsran and Lim 2016).

Putrasari ve diğ. (2017) Giriş basıncının yükseltme işlemi altında EGR ilavesi LTHR'yi azalttığı ve azaltılmış reaksiyon oranları ile silindir içi sıcaklık ve HRR'nin önemli ölçüde azalmasına yol açan termal ateşleme hazırlığı (TIP) aralığını uzattığı belirtilmiştir. Yükseltme işlemi altında bile PRR'yi azaltma imkanı olduğu bildirmiştir (Putrasari, Jamsran, and Lim 2017).

Türbülansın Etkisi

İçten yanmalı motorlarda silindir içerisindeki hava hareketleri yanma olayını dolayısıyla emisyonları ciddi ölçüde etkilemektedir. Yanma olayının verimli olabilmesi hava-yakıt karışımının durumuna büyük ölçüde bağlıdır (Kumar 2018). Hava-yakıt karışımı, silindir içerisinde türbülans, yakıt enjeksiyon sistemi ve yanma odası konfigürasyonundan etkilenmektedir (Rakopoulos, Kosmadakis, and Pariotis 2010). Türbülans yoğunluğu ise büyük ölçüde yanma odası şekline bağlıdır. Yanma odası içerisindeki türbülans konsantrasyonu, piston kafasının hazne geometrisinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bununla birlikte türbülans yoğunluğu, alev hızını ve türbülanslı alev oluşumunu etkilemektedir(Wang et al. 2019). Bunun yanı sıra, SI motorlarda vuruntu oluşumunu da azaltıcı yönde etki etmektedir (Chen, Wei, Chen, et al. 2019). Gafoor ve Gupta (2015) Piston hazne geometrisindeki değişikliğin yüksek türbülans ve girdap oluşumunu önemli ölçüde etkilediğini ve girdap faktöründeki değişimin silindir içi sıcaklık ve basıncını ayrıca emisyonları etkilediğini gözlemlemişlerdir (Abdul Gafoor and Gupta 2015). Benzer şekilde Prasad ve diğ. (2010) piston hazne geometrisinin değişimi ile türbülans ve girdabın dolayısıyla da emisyonların etkilendiğinin sonucuna varmışlardır (Prasad et al. 2011). Yan ve diğ. (2018) dört farklı şekle sahip olan silindirik (orjinal), nebula, çapraz ve reentrant piston hazne geometrisinin yanma üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çapraz hazneli ve reentrant hazneli piston geometrisinin diğer geometrilerden daha iyi bir yanma ve ısıl verime sahip olduğunu belirtmişlerdir. Nebula geometrili piston haznesinin asimetrik bir türbülans oluşturması alev yüzey gelişimini olumsuz yönde etkilediği ve yanma süresinin uzadığını bildirilmiştir. Reentran hazneli piston geometrisinde ÜÖN. den önce yüksek türbülans kinetik enerjisine (TKE) sahiptir. Böylece daha büyük bir alev yüzey yoğunluğu ve simetrik bir alev yayılımı geliştiği ifade edilmiştir (Yan et al. 2018).

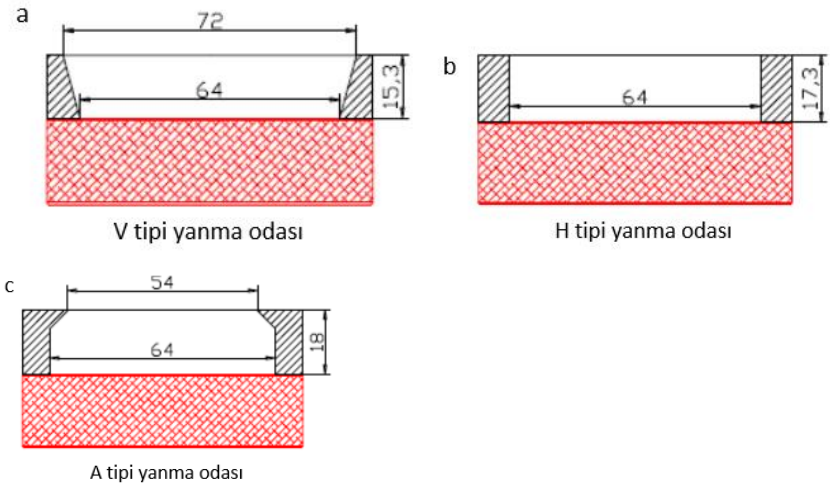
Brusiani ve diğ. (2014) emme manifoldu geometrisinin giriş havasına kazandırdığı döngü ile, karışımın daha fakir bölgelerde tutuşmasına yardımcı olarak çalışma aralığını genişletebildiğini belirtmişlerdir (Brusiani, Falfari, and Cazzoli

2014). Emme supaplarının kalkma miktarlarının azaltılması akış hızını, türbülans ve girdap yoğunluğunu arttırmaktadır ancak hacimsel verimi azaltmaktadır (Baratta et al. 2017).

Çok hazneli pistonlar, daha iyi karıştırma ve yanma için türbülansın etkisini artırabilir. Ayrıca, yanma oranı, yüksek girdaplı pistonlar için, düşük yanma verimiyle sonuçlanan düşük girdap hazneli pistonlar ile kıyaslandığında daha düşüktür. Hazne çapı ayrıca girdap oluşumunda önemli bir rol oynar. Düşük çaplı hazneler, yüksek çaplı hazneye kıyasla daha yüksek girdaba neden olur. Yüksek girdaplı piston, düşük girdaplı pistonla karşılaştırıldığında, SOC'de daha uzun bir gecikme ve HRR'nin en yüksek değerinde bir azalmaya neden olur (Venkateswarlu and Ramakrishna 2019).

Girdap ve türbülans HCCI motorlarda karışımın homojen olması için önemli bir etkendir (Bendu and Murugan 2014;). HCCI motorlarda türbülans oluşumu için farklı hazne geometrilerine sahip pistonlar kullanılabilmektedir HCCI motorlarda piston geometrisi yanma hızını, ısı salınım hızını ve emisyonları etkilemektedir (Yao, Zheng, and Liu 2009). Bu nedenle silindir içerisinde yanma için piston hazne geometrisinin optimizasyonu önemlidir.

Liu diğ. (2011) optik bir motorda HCCI yanması üzerine sıcaklık homojensizliğini araştırmışlardır. Yanma odası geometrisinin HCCI yanmasında önemli bir rol oynayabileceğini göstermiştir. Reentrant haznesi (A tipi) yanma odasının kendiliğinden tutuşması, her zaman yanma odasının merkezinde olduğunu gözlemlemişlerdir. V tipi hazne yanma odası için kendiliğinden tutuşma, A tipine kıyasla bölme duvarına daha dağılmış ve yakındı. V tipi yanma odası için, ısı tahliye hızının ve basınç yükselme hızının tepe değeri en yüksek ve yanma süresi düşük bir türbülans yoğunluğu oluşturan piston haznesinden dolayı üç durum arasında en kısa olduğunu bildirmişlerdir. A tipi yanma odası, daha yüksek bir türbülans yoğunluğunu indüklerken, piston haznesindeki sıcaklık homojenliğini arttırarak, basınç artış oranına ve ısı tahliye oranına yol açtı. (Liu et al. 2011).



Şekil 4. Çeşitli Piston Kase Geometrileri ve Çapları (Liu Et Al. 2011, ss. 2557-2565)

Su Püskürtme

Su sıvı halden buhar haline geçmesi sırasında gizli buharlaşma ısısı nedeniyle ortamdan ısı çekmektedir. İçten yanmalı motorlarda su enjeksiyonu ile emme havası sıcaklığı düşürülebilmekte, yanma işleminde seyreltme etkisi göstermektedir. Su enjeksiyonu yardımıyla SI motorlarda vuruntu oluşumu azaltılarak yüksek CR'ler uygulanabilmektedir(Boretti 2013). CI motorlarda su enjeksiyonu ile NOx emisyonları azaltılabilmektedir (Gonca 2015). Su enjeksiyonu uygulaması üç farklı yöntem ile gerçekleştirilmektedir (Zhu et al. 2019).

- Turboşarjlı ICE'lerde kompresör öncesi veya sonrası ya da dolgu hava soğutucusu öncesi veya sonrasındaki su enjeksiyonu
- Emme kanalı ya da portuna su enjeksiyonu
- Doğrudan silindir içerisine su enjeksiyonu

HCCI motorlarda yanma birçok noktada aynı anda gerçekleştiğinden alev ilerlemesi gerçekleşmez. Yanma hızını sınırlandırmak için seyreltilmiş karışım kullanılır. Çok fakir karışımlar ya da EGR kullanılarak kontrol edilmeye çalışılmıştır. Bir diğer yöntem ise su kullanımıdır (Christensen and Johansson 1999). Su kullanılarak HCCI yanma süresi ve ateşleme zamanlaması kontrol edilebilmektedir (Mofijur et al. 2019).

HCCI motorda yanma hızını yavaşlatmak ve ateşleme zamanlaması için dar bir aralıkta su enjeksiyonu yapılabileceği bildirilmiştir. HCCI'da su enjeksiyonu ile maksimum yük sınırı genişletilebilmektedir. Ancak CO emisyonlarında artış yaşanmaktadır. NOx yanmanın kötüleşmesi dolayısıyla azaldığı belirtilmiştir

(Christensen and Johansson 1999). Megaritis ve diğ. (2007) HCCI motorda, biyo-etanol su karışımının yanmayı geciktirdiğini gözlemlenmiştir. Değişken oranlı doğrudan su enjeksiyonunun aksine, sabit oranlı su-etanol karışımının, yüksek yüklerde basınç artış oranlarının azaltılmasında karşı üretken olduğunu buldular. Ayrıca, etanol içindeki su içeriğinin arttırılması, etkili yük aralığının azaltılmasına ve emisyonların artmasına neden olduğunu buldular (Megaritis, Yap, and Wyszynski 2007).

Ahari ve Neshat (2019) Doğal gazlı HCCI motorda su ilavesinin yanma başlangıcını geciktirdiği, silindir içi basınç ve ısı salınım oranını maksimum değerlerini düşürdüğünü bildirdiler. Yaklaşık olarak % 3 su ilavesinin, motorun ısıl verimini arttırdığı ve egzoz emisyonlarını azalttığını belirttiler (Ahari and Neshat 2019).

Valero-Marco ve diğ. (2018) kontrollü otomatik ateşleme işleminin sınırlı yük aralığını genişletmek üzere silindir içerisine direkt su enjeksiyonunun, karışımın reaktivitesinin uygun bir şekilde kontrol edilebildiği bu sebeple basınç gradyanlarını ve vuruntu eğilimini azalttığını ayrıca yanma kararlığını iyi bir seviyede koruduğunu belirlemişlerdir (Valero-Marco et al. 2018).

Motor Hızı

Motor hızının artışı ile silindir içerisindeki hava hareketleri değişmektedir. Piston daha hızlı hareket ettiği için yanmanın başladığı krank mili açısı değişmektedir. Dolayısıyla maksimum basıncın oluştuğu açı da değişebilmektedir (Ebrahimi and Desmet 2010). Motor hızının atışı ile beraber silindir içerisine alınan hava ya da dolgu, karışımın homojenliğinin iyileşmesi ve egzozdan atılan gaz miktarı değişebilmektedir. Ayrıca silindiri içerisindeki yüzey ve hacim değiştiği için ve ısı transferi süresi kısaldığı için, ısı transfer hızı da değişmektedir. Artan motor hızı ile birlikte silindir içi sıcaklığı değişebilmektedir. Motor hızının artışı, silindir içerisinde türbülans yoğunluğunu arttırabilmekte, bunun sonucu olarak yanma hızı artabilmektedir(Luo and Sun 2018; Saxena and Bedoya 2012).

HCCI yanma işlemi motor hızından etkilenmektedir. Kendiliğinden ateşleme zamanındaki basıncı, yanma fazının gecikmesini ve reaksiyon hızının artması gibi etkileri söz konusudur. Nishi diğ. (2015) düşük ve yüksek sıcaklık ısı salınım reaksiyon başlangıcındaki basınç ve sıcaklık motor hızının artışı ile arttığını bildirdiler. Yanma fazının gecikmesi neticesinde ve motor hızının artışı ile birlikte krank mili açısı başına ısı salınım oranının azaldığı, fakat reaksiyon hızının artması sebebiyle ve motor hızının atışıyla milisaniyede zaman başına ısı salının oranının arttığını belirtmişlerdir. (Nishi et al. 2016).

Hassan ve diğ. (2017) artan motor devri ile değişen termal koşullardan dolayı UHC emisyonlarını etkilemektedir. Motor hızının artması motordan gerçekleşen ısı akısının artışına dolayısıyla emme havasının daha sıcak olmasına neden olmaktadır. Bu durum sıkıştırma sonu sıcaklığını da yükselttiğinden UHC emisyonlarının azaldığını bildirmişlerdir. CO emisyonun motor hızının düşmesi ile artış gösterdiğini bildirmişlerdir. Sonuç olarak CO, HC ve NOx emisyonlarının motor devrinden etkilendiği ancak HC emisyonunun motor devrinden daha fazla etkilendiği ifade edilmiştir (Hassan et al. 2017).

Ebrahimi ve Desmet (2010) motor devrinin, basınç ve sıcaklık değişimlerinin yanı sıra yanma odasının çeper sıcaklığını etkilediğini bildirdiler. Bir devrin artık gazı, bir sonraki çevrimde gazın üç özelliğini (sıcaklık, seyreltme ve bileşim) değiştirdiğini bu durumun, HCCI motorundaki yanma işlemini doğrudan etkilediğini belirlediler (Ebrahimi and Desmet 2010).

Yakıtların, Alternatif Yakıtların, Yakıt Katkı Maddelerinin ve Yakıt Modifikasyonlarının Etkisi

İçten yanmalı motorlar çeşitleri ve tasarımları gereği belirli yakıt veya yakıt karışımları ile çalıştırılabilmektedir. Genel olarak bir CI motor için setan sayısının yüksek belirli bir viskozite ve yoğunlukta olması, SI motorlar için vuruntu direnci olan yüksek oktan sayısına ve iyi bir uçuculuğa sahip yakıt gereklidir (Xu et al. 2018; Yao et al. 2009).

HCCI yanma işleminde yaşanan sorunları en aza indirgemek için kullanılan yakıtın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu sebeple birçok araştırmacı HCCI motorlarda kullanılmak üzere karışım yakıtlar, yakıt katkı maddeleri ya da yakıt üzerinde modifikasyonlar gerçekleştirmişlerdir (Mohamed ve Ramesh 2013). Bazı araştırmacılar, düşük uçuculuğa sahip yakıtların iyi bir karışım oluşturabilmesi için harici bir karışım hazırlama sistemi kullanmışlardır (Gajendra, Singh ve Agarwal 2014). HCCI motorda kullanılan yakıtların üzerinde yapılan değişikliklerin amaçlarından bazıları, vuruntu oluşumunu gidermek, çalışma aralığını genişletmek ve otomatik ateşlemenin kontrolünü sağlayabilmektedir. Yüksek oktan sayısına sahip etanol ve metanol karışım halinde, biyodiesel, doğal gaz, hidrojen gibi birçok yakıt karışımları ile HCCI motorlarda kullanılabilmektedir.

Gharehghani (2018) doğal gazın yüksek alım sıcaklıklarında ve zengin karışım koşullarında HCCI yanma işlemi için uygun yakıt olduğunu, etanol ve metanolün düşük sıcaklıklarda ve fakir karışımlarda makul bir seçim olduğu bildirdiler (Gharehghani 2019). Türkcan ve diğ. (2018) yakıt karışımlarında etanol içeriğinin

artışıyla, benzinli yakıt durumuyla karşılaştırıldığında Pmax, MRHR ve NOx emisyonlarının azaldığı ve yanma fazının gerilediği, metanol içeriğinin artışıyla, bu özellikleri ters yönde etkilediği ifade edildi (Turkcan et al. 2018). Wu ve diğ. (2019) karozenin yüksek kükürt içeriğinden dolayı motor için uygun bir yakıt olmadığını, dimetil eterin düşük kaynama noktası ve etkili ateşleme noktası sebebiyle uygun bir yakıt olduğunu belirttiler (Wu et al. 2016). Lu ve diğ. (2014) harmanlanmış karışımlardaki benzin hacmindeki bir artışla birlikte, düşük sıcaklıktaki yanmanın tutuşma süresinin geciktiği ve LTR'nin tepe değeri azalttığını gözlemlediler. % 40 oranındaki benzinin CO emisyonlarının %30 ve %50 benzin oranlarınkinden daha düşük olduğunu belirlediler. Bu düşüşün sebebini % 40 oranlı benzin yakıt karışımının daha verimli bir yanma ile açıklamışlardır (Lu et al. 2014).

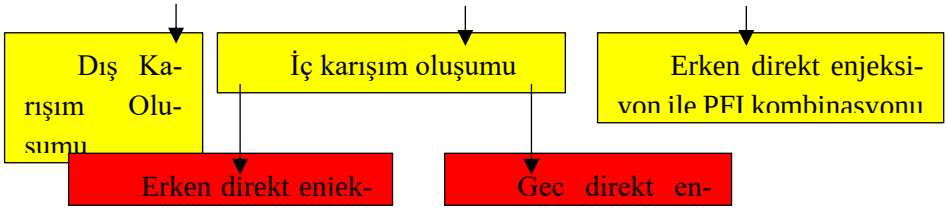
Kozlov diğ.(2016) hidrojen, metan ve sentez gazı yakıt harmanlarının HCCI motorunda yanma ve emisyonlar üzerine etkilerini modelleyerek incelemişlerdir. Metanın %50 H_2 hacimli içeriğe sahip metan / hidrojen harmanına değiştirilmesinin, HCCI yanması sırasında çıktı enerjisinin arttırılmasını ve aynı zamanda NO ve CO emisyonlarını azalttı. Metan / sentez gaz karışımının bir yakıt olarak kullanılması, HCCI performansının iyileşmesine ve CO_2 emisyonu dahil olmak üzere kirletici emisyonlarının azaldığı sonucuna vardılar (Kozlov et al. 2016). Zhou ve diğ. (2019) hidrojen peroksit (H_2O_2) katkı maddesinin n-bütanol yakıtlı HCCI motorunun yanma ve emisyonları üzerine etkilerini incelediler. H_2O_2 katkı maddesinin HCCI motorda yanma ve emisyon üzerine önemli etkileri olan OH ve HO_2 radikallerinin oluşumuna olanak sağladığını belirttiler. H_2O_2 eklenmesi ile indike termik verimin özellikle düşük giriş sıcaklığı ve yüksek λ değerlerinde yüksek değer sergilediğini bildirdiler. Ayrıca en yüksek giriş sıcaklığı dışında IMEP'i bir miktar artırdığı, böylece çalışma aralığının genişlemesine katkıda bulunduğunu belirttiler. H_2O_2 katkı maddesinin toplam HC ve CO emisyonlarının optimizasyonu üzerindeki etkisi, özellikle düşük giriş sıcaklığı veya yüksek λ'da belirgin olduğunu gözlemlediler. NOx emisyonunun çok düşük bir seviyede olduğunu bildirdiler (Zhou et al. 2019). Sudheesh ve Mallikarjuna (2010) birincil yakıt olarak biyogaz ve ateşleme geliştiricisi olarak dietil eter (DEE) kullanarak HCCI motorda yanma ve emisyonları incelediler. Biyogaz-DEE HCCI motorda, tüm yüklerde biyogaz-dizel çift yakıt ve biyogaz SI motora kıyasla daha geniş çalışma yükü aralığı ve daha yüksek fren ısıl verimi (BTE) elde ettiler. NO ve duman emisyonlarının önemli ölçüde azaldığı ve en iyi fren termal verimlilik noktalarında CO emisyonunun hacimce % 0,4'ün altında seyrettiğini bildirdiler. Ayrıca,

genel olarak, HCCI modunda HC emisyonları, biyogaz SI modundan daha düşük çıktını belittiler (Sudheesh and Mallikarjuna 2010).

Yakıt Püskürtme Stratejilerinin Etkisi

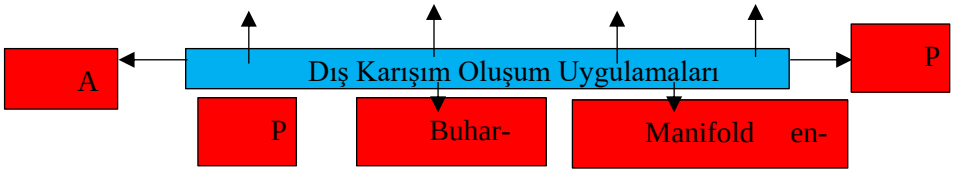
Yüksek yakıt verimliliği ve emisyonların azaltılması için iyi derecede homojen karışım hazırlamak ve çeperlerde yakıt ıslanmasının engellenmesi gerekmektedir. Uçuculuğu düşük olan yakıtlar hızlı bir şekilde buharlaşıp hava ile karışmadığı ve yakıtın çeperleri ıslatmasından dolayı HC emisyonları artmaktadır(Torres García, José Jiménez-Espadafor Aguilar, and Sánchez Lencero 2009). Karışımın bölgesel olarak zengin olması bu bölgelerde PM emisyonlarını arttırmaktadır. Karışımın homojenliğinin sağlanması NOx emisyonlarını azaltmada önemli bir rol üstlenmektedir. Ayrıca karışım homojenlik derecesi yanma fazını ve kendiliğinden tutuşma reaksiyonlarını önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Pravin ve Rehman, 2014; Mohan, Yang ve Chou, 2013; Zheng ve Kumar, 2009).

Dolgu homojenliğinin iyi bir şekilde sağlanması için yakıt ve havanın silindir içerisine girmeden belirli bir süre önce karışması gerekmektedir. Bu nedenle yakıt erken enjekte edilmelidir. Port enjeksiyonu bu yöntemlerden birisidir. Ancak bu yöntem sıkıştırma oranını sınırladığı için HCCI motorlarda yanma fazının kontrolünün sağlanmasında sorunlar ortaya çıkardığı (Yao et al. 2009) ya da etkisinin olmadığı belirtilmektedir (Mathivanan, Mallikarjuna, and Ramesh 2016). Enjeksiyon stratejileri ile HCCI motorlarda homojen karışım hazırlanabilir, yanma fazı kontrol edilebilir, operasyon aralığı genişletilebilir, emisyonlar azaltılabilir, dolgunun ateşlenme kabiliyeti arttırılabilir, sıkıştırma oranı arttırılabilir ve vuruntu oluşumu engellenebilmektedir (Duraisamy and Govindan 2009; Singh and Agarwal 2012). HCCI motorlarda karışım, enjeksiyon stratejileri kullanılarak harici, direkt ya da hem dış karışım hem de iç karışımın kombinasyonu kullanılarak hazırlanabilmektedir



Şekil 5. HCCI Motorlarda Dış Karışım Hazırlama Stratejileri (Bendu And Murugan 2014, S. 735; Kumar And Rehman 2014, S. 52)

Dış Karışım Oluşumu: Bu yöntem silindir dışında uygulanmaktadır. Karışım silindir içerine alınmadan önce oluşturulduğundan etkili bir homojenlik için yeterli zaman bulunmaktadır. Ancak dış karışım oluşturulmasında kullanılacak yakıtın uçuculuğunun iyi olması gerekmektedir. Benzin, gaz yakıtlar ya da alkol yakıtlar için uygun olmasına rağmen, dizel motorlarda kullanılan düşük uçuculuğa sahip motorin ve biyodizel yakıtları için uygun değildir. Dış karışım oluşturma yöntemi kendi arasında farklı metotlarda uygulanmaktadır. (Bendu and Murugan 2014; Duraisamy and Govindan 2009; Ganesh, Nagarajan, and Mohamed Ibrahim 2008).



Şekil 6. Dış Karışım Oluşum Uygulamaları (Bendu And Murugan 2014, S. 735; Kumar and Rehman 2014, S. 53)

Onishi ve diğ. (1979) Active Thermo-Atmosphere Combustion (ATAC) olarak adlandırdıkları ilk HCCI yanma konseptini geliştirdi. ATAC iki zamanlı benzinli bir motorda çalışıldı. Emisyonlar ve yakıt tüketimi önemli ölçüde düşürüldü (Onishi et al. 1979). Benzer bir çalışmayı Noguchi. ve diğ. (1979) kıvılcım ateşlemeli yanma ile kendiliğinden yanma arasındaki farkı gözlemlemek için optik analizini gerçekleştirdi(Noguchi et al. 1979). Ishibashi ve Asai (1998) ARC konseptini direkt enjeksiyonlu iki zamanlı bir motorda gerçekleştirdi. Düşük yüklerde düzensiz yanma olayını iyileştirdi. Orijinal iki zamanlı motorun yüksek güç çıkışını başarıyla korurken, egzoz emisyonlarında ve yakıt tüketiminde belirgin bir azalma olduğunu açıkladı (Ishibashi and Asai 1998).

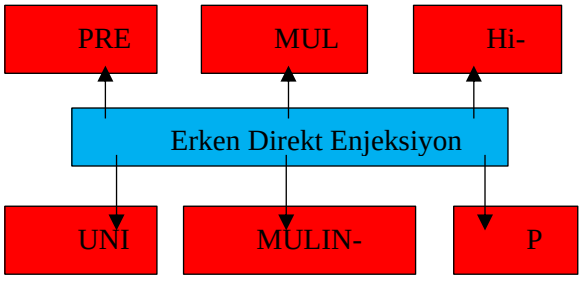
Dış karışım oluşturma uygulamaları içerisinde yer alan partially premixed compression ignition (PPCI), premixed-charge compression ignition (PCCI) yöntemleri yer almaktadır (Noh and No 2017). Lee ve diğ. (2003) PPCI uygulamasını nümerik ve deneysel olarak ele aldılar. Önceden karıştırılmış oran arttıkça, erken aşamadaki yanma bölgesindeki ısı salım oranının tepe değeri azaldı, NOx ve is konsantrasyonu da dikkate değer ölçüde azaldı. Ancak önceden karıştırılmış dizel motorun yanmamış hidrokarbon emisyonu, tedarik edilen yakıtın önceden karıştırılmış oranının artmasıyla arttığını bildirdi (Lee, Lee, and Kim 2003). D'Ambrosio ve diğ. (2016) PCCI yanmasının uygun EGR oranlarında iyileştiği bildirildi. NOx emisyonlarında % 90'a kadar ve kurum emisyonlarında% 99'a kadar bir azalmaya gerçekleştiği belirtildi. HC ve CO emisyonlarında artış yaşandığı

bildirildi (D'Ambrosio et al. 2016). Torregrosa ve diğ. (2012) PCCI yanmasının, NOx ve kurum emisyon seviyelerini önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahip olduğunu bildirdiler (Torregrosa et al. 2013).

Port Fuel Injection (PFI) ile yakıt silindir dışında hava ile karışım halinde silindir içerisine gönderilir. Yeterli türbülans oluşturulursa etkili bir homojen elde edilebilmektedir. Bu yöntem, benzin ve alkol yakıtlarında başarıyla uygulanmıştır. Yakıt enjeksiyonu aynı zamanda bir buharlaştırıcı yardımıyla dizel yakıtla da kullanılabilir (Kamesh et al. 2018). Buharlaştırıcı daha çok uçuculuğu düşük olan dizel yakıtlı HCCI motorlarda kullanılmaktadır. Buharlaştırıcı vasıtasıyla harici karışım oluşturularak homojenliği iyileştirilebilmektedir. Ganes ve diğ. (2008) homojen karışım elde etmek için, dizel yakıt buhar formunda dizel yakıt buharlaştırıcı kullanılarak indüklenmiştir. İyi bir homojen bir karışım sağladılar. Böylece dizel buharı indüksiyonu için ateşleme gecikmesinin önemli ölçüde azaldığı ve düşük emisyonlarla sonuçlandığı buldular(Ganesh et al. 2008).

Silindir İçi Karışım Hazırlama: HCCI motorlarda kısa sürede homojen bir karışım oluşturmanın zorlukları bulunmaktadır. Dış karışım oluşturma yöntemiyle bu sorun giderilebilmekte, ancak direkt enjeksiyon yöntemi ile zaman yeterli olmadığı için homojen karışım için yeterli zaman yoktur. Homojen bir karışım yalnızca enjeksiyon stratejilerinden değil yanma odası geometrisi, motor çalışma koşulları gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Bu yöntemin avantajlarından biri yanma işlemi üzerinde kontrol olanağının bulunmasıdır. (Ramesh and Mallikarjuna 2016). Silindir içi enjeksiyon stratejisi erken direkt enjeksiyon ve geç direkt enjeksiyon olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Erken Direkt Enjeksiyon: Enjeksiyon zamanlaması karışımın homojenliğini etkileyen önemli bir unsurdur. HCCI yanma işleminde genellikle bu yöntem kullanılmaktadır. Daha uzun bir ateşleme gecikme süresi oluşturmaktadır. Bu yöntem ile darbeli enjeksiyon stratejisi uygulanmaktadır.



Şekil 7. Erken Direkt Enjeksiyon Stratejisi (Bendu And Murugan 2014, S. 737).

DI motorlarda yakıt, sıkıştırma zamanının sonuna doğru piston ÜÖN'ya gelmeden önce püskürtülmektedir. Eğer yakıt, sıkıştırma zamanı başlangıcında püskürtülürse ön karışım meydana getirilir (PREmixed). Bu yöntem, PREDIC olarak adlandırılan karışım oluşturma tekniği olarak bilinir. Bu metot ile yanma ÜÖN yakınında kendiliğinden gerçekleşmekte ve NOx emisyonları düşük değerler sergilemektedir. Bu yöntemin dezavantajı vuruntu olasılığı yüksek yakıt tüketimi ve çalışma aralığının sınırlı olmasıdır (Gowthaman and Sathiyagnanam 2015; Nakagome et al. 1997). PREDIC'deki torkun üst sınırını arttırmayı hedefleyen ÜÖN'ya ikinci bir enjeksiyonun gerçekleştirilmesiyle çok aşamalı dizel yanmanın (MULDIC) geliştirilmesinin yolunu açtı (Kamesh et al. 2018). MULDIC çok aşamalı dizel yanması olarak adlandırılmaktadır. MULDIC'de, ilk aşamadaki yanma, önceden karıştırılmış fakir yanmaya karşılık gelir ve ikinci aşamadaki yanma, yüksek sıcaklık ve düşük oksijen koşulları altında difüzyon yanmasına karşılık gelmektedir(Harrington and Pilot 1975). Homojen dolgulu akıllı Çoklu Enjeksiyon Yanma Sistemi (HiMICS) çoklu enjeksiyon kapsamındadır (Gowthaman and Sathiyagnanam 2015). HiMICS konseptinde ön karışım, emme zamanının erken aşamasından sıkıştırma zamanının orta aşamasına kadar olan bir periyodda yapılan ön enjeksiyondan oluşur(Yokota et al. 1997). Sıkıştırma zamanı sırasında erken ilk enjeksiyonu kullanır ve ikinci enjeksiyon ÜÖN'den hemen önce gerçekleştirilir (Kumar and Rehman 2014). UNIBUS erken enjeksiyon ve geç enjeksiyon kombinasyonunun kullanıldığı bir sistemdir. Common Rail enjeksiyon sistemi ile çift enjeksiyon tekniği kullanılmıştır. İlk enjeksiyon, yakıt difüzyonu için erken bir enjeksiyon olarak ve yakıt değişikliğini daha düşük hidrokarbonlara ilerletmek için kullanıldı. İkinci enjeksiyon tüm yakıt için ateşleme tetiği olarak kullanıldı(Hasegawa, Yanagihara, and Hasegawa 2019). MULINBUMP önceden karıştırılmış yanma ve çok atımlı yakıt enjeksiyonu stratejisine dayanan bir sistemdir. Bu yöntemde darbe enjeksiyonunun püskürtme nüfuzunu sınırlandırmak ve böylece yakıtın silindir gömleğine çarpmasını engellemek ve her bir yakıt parselinin karışım hızını arttırılmaktadır (Bendu and Murugan 2014; Kamesh et al. 2018; Kumar and Rehman 2014; Yao et al. 2009). Premixed Compression Ignition (PCI) Mitsubishi Motors Corporation tarafından geliştirilen ön karışımın sıkıştırılarak ateşlenmesi ile meydanda gelen yanma sistemi, kendiliğinden tutuşmadan önce önceden karıştırılmış bir fakir karışım oluşturmak için erken enjeksiyon stratejisinin bir başka örneğidir(Gan, Ng, and Pang 2011).

Geç Direkt Enjeksiyon: Bu teknikte yanma olayı, enjeksiyon zamanlamasının geleneksel dizel yanmasına göre daha geciktirilmiş bir krank açısında gerçekleştiği HCCI modunu ifade etmektedir. ÜÖN'den hemen sonraki krank açıları ile başlar, daha uzun ateşleme gecikmesine ve daha iyi bir karışım oluşumuna yol açan piston genleşmesinden dolayı gaz sıcaklığı ve yoğunluğu düşmektedir(Gowthaman and Sathiyagnanam 2015). Silindir içi koşullar, HCCI yanması için uygun hale gelir. Klasik geç dizel yakıtlı HCCI yanma konsepti, Nissan Motor Corporation tarafından geliştirilen MK (modüle kinetik) yanma sistemidir (Yao et al. 2009).

Kim ve Lee (2007) erken enjeksiyon ile başarılı bir HCCI yanması elde etmek için, daraltılmış bir sprey koni açısı enjektörü ve düşük CR kullandılar. HCCI yanmada ilk olarak erken enjeksiyon ve ikinci aşamada geç enjeksiyondan oluşan ikili bir enjeksiyon stratejisinin, HCCI yanma veriminin bozulmasını bastırırken NOx emisyonlarını azaltmada etkili olduğunu gözlemlediler (Kim and Lee 2007). Gowda ve Echekki (2012) hidrojen yakıtlı bir HCCI motorda kompleks enjeksiyon stratejisi uyguladı. Çoklu pulslu direkt enjeksiyonuna dayanan yakıt enjeksiyonu stratejilerinin yanı sıra, ideal bir silindir içi hidrojen-hava karışımı hazırlamak ve otomatik ateşleme işlemini kontrol etmek için PFI ve direkt enjeksiyon (DI) kombinasyonlarını incelediler. Çok sayıda DI ve hibrit PFI / DI uygulamalarının, HCCI motorlarda çalışma aralığının genişletilmesine yol açabilecek değişken yük gereksinimleri için kullanılabileceği buldular (Gowda and Echekki 2012).

Das ve diğ. (2015) EGR ile ikili enjeksiyon stratejisi kullanarak, önceden karıştırılış oranın artışı ile hem yanma hem de SOC'ın ilerlediğini, HC ve CO'in arttığını bildirdi Bu oranın artışı ile vuruntu oluştuğu ve çalışma aralığının sınırlandığı bildirildi (Das et al. 2015). Chen ve diğ. (2019) zayıf enjeksiyon koşullarında farklı enjeksiyon zamanlamaları kullandılar ve sonuçlar yanma işleminin enjeksiyon zamanlamasından önemli ölçüde etkilendiğini bildirdiler. Geç enjeksiyon koşulunda ileri yanma aşaması ve daha yüksek ısı tahliye hızı, türbülans yoğunluğun arttırabileceğini belirlediler (Chen, Wei, Zhang, et al. 2019). Hunicz ve diğ. (2014) bölünmüş yakıt enjeksiyonu yoluyla elde edilen yakıt tabakalaşması ve sıkıştırma zamanı sırasında belirli bir yakıt kütlesinin uygulanması, hem ısı salım hızını hem de PRR'yi azaltmak için etkili bir çözüm olduğunu belirlediler. Bununla birlikte, motorun yakıt tabakalaşması ile çalışması NO_X ve CO emisyonları arasında bir denge gözlemlediler (Hunicz et al. 2015). Mathivanan ve diğ. (2016) beş zamanlı darbeli enjeksiyonun HCCI motorda etkisini incelediler. Çok

pulslu yakıt enjeksiyonun tek pulslu yakıt enjeksiyonuna kıyasla daha düşük emisyonlara ve daha yüksek termal verim sağladığı sonucuna vardılar. Bu durumun daha iyi yanma aşaması ve daha yüksek ısı tahliye oranından kaynaklandığı sonucuna vardılar (Mathivanan et al. 2016). Fang ve diğ. (2012) pilot enjeksiyonun artışıyla NOx emisyonunun azaldığı duman emisyonunun bir miktar artış gösterdiği ve CO ve HC emisyonlarında artış yaşandığı belirlendi (Fang et al. 2012).

SONUÇLAR

Bu çalışmada HCCI yanma konseptine sahip motorlarda yapısal işletme ve yakıt özelliklerine bağlı olarak yanma ve emisyonlardaki değişimler üzerinde durulmuştur. HCCI yanma modu NOx ve PM emisyonlarını azaltma konusunda iyi bir potansiyele sahiptir. Ancak henüz giderilemeyen sorunları mevcuttur. Birçok araştırmacı bu sorunların üstesinden gelebilmek için farklı parametreler üzerinde deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu konuda yapılan bazı çalışmalara da değinilmiştir.

Emme havası sıcaklığı üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Ancak emme havası sıcaklığının artışı bir sorunu çözerken başka sorunları da ortaya çıkarmaktadır. Emme havası sıcaklığının artışı CO ve HC emisyonlarını azaltmaktadır, fakat NOx emisyonlarını arttırmaktadır. Yine emme havası sıcaklığının artışı dolgu yoğunluğunu azalttığından dolayı volümetrik verimi olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca vuruntu oluşumu meydana gelmektedir. Bu sorunların en aza indirgenmesi, çalışma aralıklarının optimizasyonu ile giderilebilir. Emme havası giriş sıcaklığının artışı ile fakir karışımların tutuşabilirliği artmakta, yanma sınırları genişlemekte, ısı salınım oranı artmakta, maksimum basınç artmakta ve yanma gelişmektedir.

Sıkıştırma oranının değiştirilmesi, HCCI yanma modunun kontrölü üzerine etkileri mevcuttur. Sıkıştırma oranının artışı maksimum silindir basıcını arttırmaktadır. IMEP değeri artmaktadır. Bazı araştırmalara göre yanma süresinin kısalmasından dolayı CO emisyonlarını arttırmaktadır. Bazılarına göre ise yanma geliştiği için CO ve HC emisyonlarını azaltmakta ve NOx emisyonu artmaktadır. Erken yakıt enjeksiyonu ve uygun supap zamanlaması ile etkili bir sıkıştırma oranı elde edilmekte ve yanma gelişmektedir. Etkili sıkıştırma oranının düşürülmesi ile motor vuruntulu çalışma sınırından uzaklaştırılabilmekte, NOx ve PM emisyonlarında düşüş sağlanabilmektedir. HCCI motorlarda, sıkıştırma oranı ile birlikte başka parametrelerinde kullanılması ile optimum çalışma bölgesi sağlanarak yanma geliştirilebilir ve emisyonlar azaltılabilir.

EGR kullanılarak silindir içerisinde oksijen konsantrasyonunu azaltılmakta ve bu atık gazların yüksek özgül ısı kapasitesinden dolayı silindir içi sıcaklığını düşürmektedirler. Böylece kendiliğinden ateşleme zamanı kontrolünde kullanılabilmektedir. Bunun yanı sıra soğutma etkisi sayesinde NOx emisyonlarını ciddi oranlarda düşürebilmektedir. EGR oranının optimum seviyeleri ile çalışma aralığı genişletilebilmektedir. Aksi taktirde yanma olayı kararsızlaşmakta ve emisyonlar artmaktadır. LTHR ve HTHR'nin maksimum değerleri ile maksimum sıcaklı değerleri EGR oranının artışı ile azalmaktadır. Dahili EGR sayesinde homojen karışım oluşturulabilmekte ve yanma iyileştirilebilmektedir. EGR'nin olumsuz etkilerini azaltmak ve HCCI motorlarda kullanımının genişletilebilmesi için farklı yakıt karışımları veya enjeksiyon stratejileri ile kullanılarak giderilebilir.

Doldurma basıncı süperşarj veya turbo şarj sistemleri ile yükseltilebilmektedir. Bu parametre, yanma reaksiyonlarını geliştirmekte, yanma süresinin azaltmakta ve NOx emisyonunu önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca ısı salınım miktarını arttırmaktadır. HC ve CO emisyonlarında artış gözlenmektedir. Giriş basıncının artışıyla çevrimden çevrime değişimler artmaktadır.

Türbülans, silindir içi sıcaklık, basınç ve emisyonlar üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Türbülans yanma odası şekline bağlıdır. Birçok araştırmacı piston hazne geometrisinin oluşturduğu türbülans üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bazı araştırmacılar da emme manifold geometrisinin türbülansa etkisini incelemişlerdir. Türbülans karışımın homojenliğini, silindir içerisinde ısı transfer hızını, yanma hızını, NOx, CO ve HC emisyonları üzerinde olumlu etkileri vardır.

Silindir içerisine su püskürtme veya yakıtla birlikte emülsiyon halinde kullanımı, suyun soğutma etkisinden dolayı NOx emisyonlarını azaltmaktadır. Su enjeksiyonunun CO emisyonu üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Ancak HC emisyonları arttırma eğilimi vardır. Soğutma etkisi sayesinde vuruntu oluşumunu engellemektedir. Yanma işlemi gecikmekte ve daha kararlı hale gelmektedir.

Motor hızı artışı yanma işlemini etkilemektedir. Emme havası sıcaklığının artışına neden olmakta bunu sonucu olarak sıkıştırma sonu sıcaklığı artmaktadır ve UHC emisyonlarını azaltmaktadır. Motor devrinin artışıyla LTHR azaldığı için HTHR'nin fazlanma süresinin uzamasına neden olmaktadır. Motor devrinin azalmasıyla CO emisyonu artmaktadır.

HCCI motorlarda birçok farklı yakıt, yakıt harmanları, alternatif yakıt, katkılı yakıtlar ve yakıt üzerinde yapılan modifikasyonlar yapılarak kullanılabilmektedir. HCCI motorlarda yaşanan problemler düşünülerek uygun bir yakıt dizaynı yapı-

larak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Uçucu bir yakıt hızlı bir şekilde buharlaşarak iyi bir karışım oluşturabilir ancak oktan sayısı yeterince yüksek değil ise vuruntu oluşuna neden olmaktadır. Kullanılacak olan yakıtın özellikleri yakıt harmanları veya modifikasyonları ile geliştirilebilmektedir. Fakat sadece yakıt özelliklerinin geliştirilmesiyle HCCI problemlerinin üstesinden gelinememektedir. Bu nedenle araştırmacılar diğer parametreleri de kullanarak optimum performansı elde etmeye çalışmışlardır. Belirli oranlarda yakıt harmanları kullanarak emisyonlarda düşüşler sağlanmıştır. Bazı yakıtların oksijen içeriği NOx emisyonlarını arttırmıştır. Katkı maddeleri kullanılarak yanma ve emisyonlar üzerinde etkili olan radikal oluşumu sağlanabilmekte ve HCCI çalışma aralığı genişletilebilmektedir.

Yakıt püskürtme stratejileri HCCI yanma ve emisyonları üzerinde en etkili yöntemlerden biridir. Karışım silindir dışı veya silindir içerisinde hazırlanabilmektedir. Silindir dışında hazırlanan karışımın daha fazla zamana sahip olmasından dolayı homojenliği daha iyidir. Ancak bu durum kendiliğinden ateşleme kontrolünü kısıtlamakta, vuruntu oluşmakta ve cidar ıslanmasından dolayı HC emisyonlarını olumsuz yönde etkilemektedir. Silindir dışında uçuculuğu iyi olan ve sıkıştırma direnci yüksek olan yakıtların kullanılması bu anlamda avantajlı olabilir. Diğer bir karışım hazırlama tekniği de silindir içerisine direkt enjeksiyon yöntemidir. Direkt enjeksiyonda karşılaşılan zorluk kısa zaman içerisinde homojen karışımı meydana getirmektir. Bu problemin üstesinden gelebilmek için araştırmacılar erken direkt enjeksiyon yöntemini geliştirmişlerdir. Sonrasında çoklu enjeksiyon sitemleri ve çok pulslu enjeksiyon stratejileri geliştirildi. Bütün bu gelişmeler genelde NOx emisyonlarında düşüşlere neden olmuştur Ancak CO ve HC emisyonları püskürtmenin erken yapılıp yapılmadığına, pilot enjeksiyonun miktarına, çeperlerin ıslanma miktarına bağlı olarak azalmakta veya artmaktadır. Uygun bir enjeksiyon stratejisi ve uygun yakıt kullanımı ile yanma verimliliği üzerinde olumlu sonuçlar meydana getirilebilir.

ÖNERİLER

Yanma olayının kontrol etmede ejneksiyon stratejileri, emme havası giriş sıcaklığı, çeşitli yakıtlar vb. yöntemler üzerinde durulması gerekmektedir. Yanma işlemini birçok yapısal ve işletme parametreleri etkilemektedir. Dolayısıyla bu parametrelerin optimizasyonu ve birden çok parametrenin eş zamanlı olarak devreye alınması bu zorlukları aşma potansiyeline sahiptir. HCCI motorlarda homojen karışım en üzerinde durulması gereken zorluklardan biridir. Çünkü homojen karışım, yanma başlangıcını, verimini dolayısıyla emisyonları da etkilemektedir. Uygun bir homojen karışım oluşturmak, meydana getirilen hava hareketlerine, yakıt

enjeksiyon tekniğine ve yakıt özeliklerine bağlıdır. Türbülans ve girdabın, nerede, ne derecede oluşturulacağı, yakıtın nasıl enjekte edileceği ve optimizasyonu, yapılan bu parametrelere uygun hangi özellikte yakıt kullanılacağı üzerine çalışmalar yapılmalıdır. Karışımın tutuşma zamanının tespiti için iyon akımı sinyalleri kullanılabilmektedir. Yanma zamanının tespiti ile yanma fazı da kontrol edilebilir. Buna ilaveten HCCI yanma fazı ozon ve peroksit gibi oksitleyiciler kullanılarak kontrol edilebilir.

HCCI motorlarda yanma ve emisyon kontrolünün optimizasyonu için yanmayı etkileyen bu parametrelerin şartlara göre değiştirilmesi gerekmektedir. Optimizasyonun sağlanması için bu değişiklikleri tam zamanlı olarak gerçekleştirecek mekatronik sistemlerin kullanılması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

Abdul Gafoor, C. P. and Rajesh Gupta. (2015). "Numerical Investigation of Piston Bowl Geometry and Swirl Ratio on Emission from Diesel Engines." *Energy Conversion and Management* 101:541–51.

Ahari, Mehrdad Farajzadeh and Elaheh Neshat. (2019). "Advanced Analysis of Various Effects of Water on Natural Gas HCCI Combustion, Emissions and Chemical Procedure Using Artificial Inert Species." *Energy* 171:842–52.

Alcan, Gokhan, Mustafa Unel, Volkan Aran, Metin Yilmaz, Cetin Gurel, and Kerem Koprubasi. (2019). "Predicting NOx Emissions in Diesel Engines via Sigmoid NARX Models Using a New Experiment Design for Combustion Identification." *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*.

Aldawood, Ali M. (2007). "University of Cambridge Department of Chemical Engineering Control Strategies in HCCI Engines." (June).

Anderlohr, J. M., A. Piperel, A. Pires Da Cruz, R. Bounaceur, F. Battin-Leclerc, P. Dagaut, and X. Montagne. (2009). "Influence of EGR Compounds on the Oxidation of an HCCI-Diesel Surrogate." *Proceedings of the Combustion Institute* 32 II(2):2851–59.

Baratta, Mirko, Daniela Misul, Ezio Spessa, Ludovico Viglione, Giorgio Carpegna, and Francesco Perna. (2017). "Experimental and Numerical Approaches for the Quantification of Tumble Intensity in High-Performance SI Engines." *Energy Conversion and Management* 138:435–51.

Bendu, Harisankar and S. Murugan. (2014). "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Combustion : Mixture Preparation and Control Strategies in Diesel Engines." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38:732–46.

Bhaduri, Subir, Hervé Jeanmart, and Francesco Contino. (2017). "Tar Tolerant HCCI Engine Fuelled with Biomass Syngas: Combustion Control Through EGR." *Energy Procedia* 105:1764–70.

Boretti, Alberto. 2013. "Water Injection in Directly Injected Turbocharged Spark Ignition Engines." *Applied Thermal Engineering* 52(1):62–68.

Brusiani, Federico, Stefania Falfari, and Giulio Cazzoli. (2014). "Tumble Motion Generation in Small Gasoline Engines: A New Methodological Approach for the Analysis of the Influence of the Intake Duct Geometrical Parameters." *Energy Procedia* 45:997–1006.

Bullock, Dallin S. and Jason S. Olfert. (2014). "Size , Volatility , and Effective Density of Particulate Emissions from a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine Using Compressed Natural Gas." *Journal of Aerosol Science* 75:1–8.

Calam, Alper and Hamit Solmaz. (2019). "Investigation of Effect of Compression Ratio on Combustion and Exhaust Emissions in A HCCI Engine." 168:1208–16.

Calam, Alper, Hamit Solmaz, Emre Yılmaz, and Yakup İçingür. (2019). "Investigation of Effect of Compression Ratio on Combustion and Exhaust Emissions in A HCCI Engine." *Energy* 168:1208–16.

Canakci, Mustafa. (2012). "Combustion Characteristics of a DI-HCCI Gasoline Engine Running at Different Boost Pressures." *Fuel*.

Chen, Lin, Haiqiao Wei, Ren Zhang, Jiaying Pan, Lei Zhou, and Changwen Liu. (2019). "Effects of Late Injection on Lean Combustion Characteristics of Methane in a High Compression Ratio Optical Engine." *Fuel* 255(June):115718.

Choudhary, Kapil Dev, Ashish Nayyar, and M. S. Dasgupta. (2018). "Effect of Compression Ratio on Combustion and Emission Characteristics of C.I. Engine Operated with Acetylene in Conjunction with Diesel Fuel." *Fuel* 214(August 2015):489–96.

Christensen, Magnus and Bengt Johansson. (1999). "Homogeneous Charge Compression Ignition with Water Injection." *SAE Technical Papers*.

Christensen, Magnus, Bengt Johansson, Per Amnéus, and Fabian Mauss. (1998). "Supercharged Homogeneous Charge Compression Ignition." *SAE Technical Papers* (January).

Cinar, Can, Ahmet Uyumaz, Hamit Solmaz, Fatih Sahin, Seyfi Polat, and Emre Yilmaz. (2015). "Effects of Intake Air Temperature on Combustion, Performance and Emission Characteristics of a HCCI Engine Fueled with the Blends of 20% n-Heptane and 80% Isooctane Fuels." *Fuel Processing Technology* 130(C):275–81.

Coskun, Gokhan, Usame Demir, Hakan S. Soyhan, Ali Turkcan, Ahmet N. Ozsezen, and Mustafa Canakci. (2018). "An Experimental and Modeling Study to Investigate Effects of Different Injection Parameters on a Direct Injection HCCI Combustion Fueled with Ethanol–Gasoline Fuel Blends." *Fuel* 215(December 2017):879–91.

D'Ambrosio, Stefano, Daniele Iemmolo, Alessandro Mancarella, and Roberto Vitolo. (2016). "Preliminary Optimization of the PCCI Combustion Mode in a Diesel Engine through a Design of Experiments." *Energy Procedia* 101(September):909–16.

Das, Pranab, P. M. V. Subbarao, and J. P. Subrahmanyam. (2015). "Control of Combustion Process in an HCCI-DI Combustion Engine Using Dual Injection Strategy with EGR." *Fuel* 159:580–89.

Dimitrakopoulos, Nikolaos, Giacomo Belgiorno, Martin Tunér, Per Tunestål, and Gabriele Di Blasio. (2019). "Effect of EGR Routing on Efficiency and Emissions of a PPC Engine." *Applied Thermal Engineering* 152(November 2018):742–50.

Dubreuil, Anthony, Fabrice Foucher, Christine Mounaïm-Rousselle, Guillaume Dayma, and Philippe Dagaut. (2007). "HCCI Combustion: Effect of NO in EGR." *Proceedings of the Combustion Institute* 31 II(1540):2879–86.

Duraisamy, Ganesh and Nagarajan Govindan. (2009). "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Combustion of Diesel Fuel with External Mixture Formation Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Combustion of Diesel Fuel with External Mixture Formation D . Ganesh * and G . Nagarajan **." (April).

Ebrahimi, Rahim and Bernard Desmet. (2010). "An Experimental Investigation on Engine Speed and Cyclic Dispersion in an HCCI Engine." *Fuel* 89(8):2149–56.

Fang, Qiang, Junhua Fang, Jian Zhuang, and Zhen Huang. (2012). "Influences of Pilot Injection and Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Combustion and Emissions in a HCCI-DI Combustion Engine." *Applied Thermal Engineering* 48:97–104.

Gan, Suyin, Hoon Kiat Ng, and Kar Mun Pang. (2011). "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Combustion: Implementation and Effects on Pollutants in Direct Injection Diesel Engines." *Applied Energy* 88(3):559–67.

Ganesh, D., G. Nagarajan, and M. Mohamed Ibrahim. (2008). "Study of Performance, Combustion and Emission Characteristics of Diesel Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Combustion with External Mixture Formation." *Fuel* 87(17–18):3497–3503.

Gharehghani, Ayat. (2019). "Load Limits of an HCCI Engine Fueled with Natural Gas ,

Ethanol , and Methanol.” *Fuel* 239(November 2018):1001–14.

Gnanamoorthi, V. and G. Devaradjane. (2015). “Effect of Compression Ratio on the Performance, Combustion and Emission of Di Diesel Engine Fueled with Ethanol e Diesel Blend.” *Journal of the Energy Institute* 88(1):19–26.

Gonca, Guven. (2015). “Investigation of the Influences of Steam Injection on the Equilibrium Combustion Products and Thermodynamic Properties of Bio Fuels (Biodiesels and Alcohols).” *Fuel* 144:244–58.

Gowda, Bharath D. and Tarek Echekki. (2012). “Complex Injection Strategies for Hydrogen-Fueled HCCI Engines.” *Fuel* 97(x):418–27.

Gowthaman, S. and A. P. Sathiyagnanam. (2015). “A Review of Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine.” *International Journal of Scientific & Engineering Research* 6(1):779–98.

Gowthaman, S. and A. P. Sathiyagnanam. (2017). “Analysis the Optimum Inlet Air Temperature for Controlling Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine.” *Alexandria Engineering Journal* (September).

Hadia, Fridhi, Soua Wadhah, Hidouri Ammar, and Omri Ahmed. (2017). “Investigation of Combined Effects of Compression Ratio and Steam Injection on Performance, Combustion and Emissions Characteristics of HCCI Engine.” *Case Studies in Thermal Engineering* 10(July):262–71.

Hariram, V. and R. Vagesh Shangar. (2015). “Influence of Compression Ratio on Combustion and Performance Characteristics of Direct Injection Compression Ignition Engine.” *Alexandria Engineering Journal* 54(4):807–14.

Harrington, J. A. and R. M. Pilot. (1975). “Combustion and Emission Characteristics of Methanol.” *SAE Technical Papers* 107(1998):548–57.

Hasegawa, Ryo, Hiromichi Yanagihara, and Ryo Hasegawa. (2019). “Linked References Are Available on JSTOR for This Article : HCCI Combustion in DI Diesel Engine.” 112(2003):1070–77.

Hassan, A. O., Ahmad Abu-Jrai, Ala’A H. Al-Muhatseb, and Farrukh Jamil. (2017). “Impact of EGR and Engine Speed on HCCI Engine Performance and Tail Pipe Emissions.” *Energy Procedia* 136:208–12.

Hawi, Meshack, Ahmed Elwardany, Shinichi Ookawara, and Mahmoud Ahmed. (2019). “Effect of Compression Ratio on Performance , Combustion and Emissions Characteristics of Compression Ignition Engine Fueled with Jojoba Methyl Ester.” *Renewable Energy* 141:632–45.

Hunicz, Jacek, Michal S. Geca, Pawel Kordos, and Henryk Komsta. (2015). “An

Experimental Study on a Boosted Gasoline HCCI Engine under Different Direct Fuel Injection Strategies." *Experimental Thermal and Fluid Science*.

Ibrahim, M. Mohamed and A. Ramesh. (2013). "Experimental Investigations on a Hydrogen Diesel Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with Exhaust Gas Recirculation." *International Journal of Hydrogen Energy* 38(24):10116–25.

Ishibashi, Yoichi and Masahiro Asai. (1998). "A Low Pressure Pneumatic Direct Injection Two-Stroke Engine by Activated Radical Combustion Concept." *SAE Technical Papers* 107(1998):939–45.

Jamsran, Narankhuu and Ocktaeck Lim. (2016). "Effects of EGR and Boosting on the Auto-Ignition Characteristics of HCCI Combustion Fueled with Natural Gas." *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 35(Part A):1015–24.

Jo, Seongin, Suhan Park, Hyung Jun Kim, and Jong Tae Lee. (2019). "Combustion Improvement and Emission Reduction through Control of Ethanol Ratio and Intake Air Temperature in Reactivity Controlled Compression Ignition Combustion Engine." *Applied Energy* 250(April):1418–31.

Jung, Dongwon, Kosaku Sasaki, and Norimasa Iida. (2017). "Effects of Increased Spark Discharge Energy and Enhanced In-Cylinder Turbulence Level on Lean Limits and Cycle-to-Cycle Variations of Combustion for SI Engine Operation." *Applied Energy* 205(August):1467–77.

Kamesh, M. R., Dhanush Ashok, R. Sai Nikhil, S. Sanjay Kumar, and R. Sanju. (2018). "Approaches and Solutions to HCCI - A Review Energy Systems: Fuel and Combustion, Injection and Atomization." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 402(1).

Khandal, S. V, N. R. Banapurmath, and V. N. Gaitonde. (2019). "Performance Studies on Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine Powered with Alternative Fuels." *Renewable Energy* 132(x):683–93.

Kim, Dae Sik and Chang Sik Lee. (2006). "Improved Emission Characteristics of HCCI Engine by Various Premixed Fuels and Cooled EGR." *Fuel* 85(5–6):695–704.

Kim, Myung Yoon and Chang Sik Lee. (2007). "Effect of a Narrow Fuel Spray Angle and a Dual Injection Configuration on the Improvement of Exhaust Emissions in a HCCI Diesel Engine." *Fuel* 86(17–18):2871–80.

Kozlov, V. E., I. V. Chechet, S. G. Matveev, N. S. Titova, and A. M. Starik. (2016). "Modeling Study of Combustion and Pollutant Formation in HCCI Engine Operating on Hydrogen Rich Fuel Blends." *International Journal of Hydrogen*

Energy 41(5):3689–3700.

Kumar, M. Saravana, M. Prabhahar, S. Sendilvelan, Sanjay Singh, R. Venkatesh, and K. Bhaskar. (2019). "Combustion, Performance and Emission Analysis of a Diesel Engine Fueled with Methyl Esters of Jatropha and Fish Oil with Exhaust Gas Recirculation." *Energy Procedia* 160(2018):404–11.

Kumar, Pravin and A. Rehman. (2014). "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Combustion Engine- A Review." 11(6):47–67.

Kumar, Pravin and A. Rehman. (2016). "Bio-Diesel in Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Combustion." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56:536–50.

Kumar, Vinay. (2018). "Experimental Investigation of Piston Bowl Geometry Effects on Performance and Emissions Characteristics of Diesel Engine at Variable Injection Pressure and Timings." *International Journal of Ambient Energy* 39(7):685–93.

Lattimore, Thomas, Chongming Wang, Hongming Xu, Miroslaw L. Wyszynski, and Shijin Shuai. (2016). "Investigation of EGR Effect on Combustion and PM Emissions in a DISI Engine." *Applied Energy* 161(x):256–67.

Laurinaitis, Kastytis and Stasys Slavinskas. (2013). "Influence of Fuel Type and Intake Air Properties on Combustion Characteristics of Hcci Engine." 308–12.

Lee, Chang Sik, Ki Hyung Lee, and Dae Sik Kim. (2003). "Experimental and Numerical Study on the Combustion Characteristics of Partially Premixed Charge Compression Ignition Engine with Dual Fuel." *Fuel* 82(5):553–60.

Lei, Y., D. S. Zhou, and H. G. Zhang. (2010). "Investigation on Performance of a Compression-Ignition Engine with Pressure-Wave Supercharger." *Energy* 35(1):85–93.

Li, Jing, Xiang Ling, Dezhi Zhou, and Wenming Yang. (2019). "Effects of Effective Compression Ratio by Modifying IVC Timing and Stroke Length in a Reactivity-Controlled Compression Ignition Engine." *Energy Procedia* 158:1491–96.

Liu, Haifeng, Peng Zhang, Zheming Li, Jing Luo, Zunqing Zheng, and Mingfa Yao. (2011). "Effects of Temperature Inhomogeneities on the HCCI Combustion in an Optical Engine." *Applied Thermal Engineering* 31(14–15):2549–55.

Liu, Haoye, Zhi Wang, Jianxin Wang, and Xin He. (2016). "Improvement of Emission Characteristics and Thermal Efficiency in Diesel Engines by Fueling Gasoline/Diesel/PODEn Blends." *Energy* 97:105–12.

Liu, Shuo, Yi Cui, Yi Wang, Kangyao Deng, and Sheng Liu. (2019). "An Evaluation Method for Transient Response Performance of Turbocharged Diesel Engines."

Energy 182:852–63.

Lu, Xingcai, Yong Qian, Zheng Yang, Dong Han, Jibin Ji, Xiaoxin Zhou, and Zhen Huang. (2014). "Experimental Study on Compound HCCI (Homogenous Charge Compression Ignition) Combustion Fueled with Gasoline and Diesel Blends." *Energy*.

Luo, Qing he, Ji Bin Hu, Bai gang Sun, Fu shui Liu, Xi Wang, Chao Li, and Ling zhi Bao. (2019). "Effect of Equivalence Ratios on the Power, Combustion Stability and NOx Controlling Strategy for the Turbocharged Hydrogen Engine at Low Engine Speeds." *International Journal of Hydrogen Energy* 44(31):17095–102.

Luo, Qing he and Bai gang Sun. (2018). "Experiments on the Effect of Engine Speed, Load, Equivalence Ratio, Spark Timing and Coolant Temperature on the Energy Balance of a Turbocharged Hydrogen Engine." *Energy Conversion and Management* 162(September 2017):1–12.

Mathivanan, K., J. M. Mallikarjuna, and A. Ramesh. (2016). "Influence of Multiple Fuel Injection Strategies on Performance and Combustion Characteristics of a Diesel Fuelled HCCI Engine - An Experimental Investigation." *Experimental Thermal and Fluid Science* 77:337–46.

Maurya, Rakesh Kumar and Avinash Kumar Agarwal. (2011a). "Experimental Investigation on the Effect of Intake Air Temperature and Air-Fuel Ratio on Cycle-to-Cycle Variations of HCCI Combustion and Performance Parameters." *Applied Energy* 88(4):1153–63.

Megaritis, A., D. Yap, and M. L. Wyszynski. (2007). "Effect of Water Blending on Bioethanol HCCI Combustion with Forced Induction and Residual Gas Trapping." *Energy* 32(12):2396–2400.

Mofijur, M., M. M. Hasan, T. M. I. Mahlia, S. M. Ashrafur Rahman, A. S. Silitonga, and Hwai Chyuan Ong. (2019). "Performance and Emission Parameters of Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine: A Review." *Energies* 12(18):3557.

Mohan, Balaji, Wenming Yang, and Siaw Kiang Chou. (2013). "Fuel Injection Strategies for Performance Improvement and Emissions Reduction in Compression Ignition Engines - A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28(x):664–76.

Nakagome, Keiichi, Naoki Shimazaki, Keiichi Niimura, and Shinji Kobayashi. (1997). "Combustion and Emission Characteristics of Premixed Lean Diesel Combustion Engine." *SAE Technical Papers* 106(1997):1528–36.

Nazoktabar, Mohsen, Seyed Ali Jazayeri, Mohsen Parsa, Davoud Domiri Ganji, and

Kamran Arshtabar. (2019). “Controlling the Optimal Combustion Phasing in an HCCI Engine Based on Load Demand and Minimum Emissions.” *Energy* 182:82–92.

Nishi, Mina, Masato Kanehara, and Norimasa Iida. (2016). “Assessment for Innovative Combustion on HCCI Engine by Controlling EGR Ratio and Engine Speed.” *Applied Thermal Engineering* 99:42–60.

Noguchi, Masaaki, Yukiyasu Tanaka, Taro Tanaka, and Yukihisa Takeuchi. (1979). “A Study on Gasoline Engine Combustion by Observation of Intermediate Reactive Products during Combustion.” *SAE Technical Papers* 88(1979):2816–28.

Noh, Hyun Kwon and Soo Young No. (2017). “Effect of Bioethanol on Combustion and Emissions in Advanced CI Engines: HCCI, PPC and GCI Mode – A Review.” *Applied Energy* 208(September):782–802.

Oh, Chung Hwan, Narankhuu Jamsran, and Ock Taeck Lim. (2015). “A Numerical Investigation about the EGR Effect under the Condition of Boost Pressure on HCCI Autoignition.” *Energy Procedia* 68:398–408.

Onishi, Shigeru, Souk Hong Jo, Katsuji Shoda, Pan Do Jo, and Satoshi Kato. (1979). “Active Thermo-Atmosphere Combustion (Atac) - a New Combustion Process for Internal Combustion Engines.” *SAE Prepr* 88(790501):1851–60.

Pal, Anuj and Avinash Kumar Agarwal. (2015). “Effect of Compression Ratio on Combustion, Performance and Emissions of a Laser Ignited Single Cylinder Hydrogen Engine.” *International Journal of Hydrogen Energy* 40(36):12531–40.

Pan, Mingzhang, Zeyuan Zheng, Rong Huang, Xiaorong Zhou, Haozhong Huang, Jiaying Pan, and Zhaohui Chen. (2019). “Reduction in PM and NOX of a Diesel Engine Integrated with N-Octanol Fuel Addition and Exhaust Gas Recirculation.” *Energy* 187(X):115946.

Prasad, B. V. V. S. U., C. S. Sharma, T. N. C. Anand, and R. V. Ravikrishna. (2011). “High Swirl-Inducing Piston Bowls in Small Diesel Engines for Emission Reduction.” *Applied Energy* 88(7):2355–67.

Puškár, Michal and Melichar Kopas. (2018). “System Based on Thermal Control of the HCCI Technology Developed for Reduction of the Vehicle NOX Emissions in Order to Fulfil the Future Standard Euro 7.” *Science of the Total Environment* 643:674–80.

Putrasari, Yanuandri, Narankhuu Jamsran, and Ocktaeck Lim. (2017). “An Investigation on the DME HCCI Autoignition under EGR and Boosted Operation.” *Fuel* 200:447–57.

Rakopoulos, C. D., G. M. Kosmadakis, and E. G. Pariotis. (2010). "Investigation of Piston Bowl Geometry and Speed Effects in a Motored HSDI Diesel Engine Using a CFD against a Quasi-Dimensional Model." *Energy Conversion and Management* 51(3):470–84.

Ramesh, N. and J. M. Mallikarjuna. (2016). "Evaluation of In-Cylinder Mixture Homogeneity in a Diesel HCCI Engine – A CFD Analysis." *Engineering Science and Technology, an International Journal* 19(2):917–25.

Rosha, Pali, Saroj Kumar, Sunil Kumar, Haengmuk Cho, Bhupendra Singh, and Amit Dhir. (2019). "Effect of Compression Ratio on Combustion , Performance , and Emission Characteristics of Compression Ignition Engine Fueled with Palm (B20) Biodiesel Blend." *Energy* 178:676–84.

Roy, Murari Mohon, Eiji Tomita, Nobuyuki Kawahara, Yuji Harada, and Atsushi Sakane. (2009). "Performance and Emissions of a Supercharged Dual-Fuel Engine Fueled by Hydrogen-Rich Coke Oven Gas." *International Journal of Hydrogen Energy* 34(23):9628–38.

Sayin, Cenk and Mustafa Kemal Balki. (2015). "Effect of Compression Ratio on the Emission, Performance and Combustion Characteristics of a Gasoline Engine Fueled with Iso-Butanol/Gasoline Blends." *Energy* 82:550–55.

Shahangian, N., M. Keshavarz, and S. A. Jazayeri. (2009). "Performance and Combustion Characteristics Analysis of HCCI Engine Operation with Diesel Like Fuels." 64(4):521–32.

Shim, Euijoon, Hyunwook Park, and Choongsik Bae. (2018). "Intake Air Strategy for Low HC and CO Emissions in Dual-Fuel (CNG-Diesel) Premixed Charge Compression Ignition Engine." *Applied Energy* 225(February):1068–77.

Singh, Akhilendra Pratap and Avinash Kumar Agarwal. (2012). "Combustion Characteristics of Diesel HCCI Engine: An Experimental Investigation Using External Mixture Formation Technique." *Applied Energy* 99:116–25.

Singh, Gajendra, Akhilendra Pratap Singh, and Avinash Kumar Agarwal. (2014). "Experimental Investigations of Combustion, Performance and Emission Characterization of Biodiesel Fuelled HCCI Engine Using External Mixture Formation Technique." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 6:116–28.

Sjöberg, Magnus and John E. Dec. (2011). "Effects of EGR and Its Constituents on HCCI Autoignition of Ethanol." *Proceedings of the Combustion Institute* 33(2):3031–38.

Şöhret, Yasin, Habib Gürbüz, and İsmail Hakkı Akçay. (2019). "Energy and Exergy Analyses of a Hydrogen Fueled SI Engine: Effect of Ignition Timing and Compression Ratio." *Energy* 175:410–22.

Sudheesh, K. and J. M. Mallikarjuna. (2010). "Diethyl Ether as an Ignition Improver for Biogas Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Operation - An Experimental Investigation." *Energy* 35(9):3614–22.

Thangaraja, J. and C. Kannan. (2016). "Effect of Exhaust Gas Recirculation on Advanced Diesel Combustion and Alternate Fuels - A Review." *Applied Energy* 180:169–84.

Tong, Dehui, Shuojin Ren, Yunqiang Li, Zhijian Wang, Haiyan Zhang, Zhi Wang, and Jianxin Wang. (2017). "Performance and Emissions of Gasoline Homogeneous Charge Induced Ignition (HCII) by Diesel through Whole Operating Range on a Heavy-Duty Multi-Cylinder Engine." *Fuel*.

Torregrosa, A. J., A. Broatch, A. García, and L. F. Mónico. (2013). "Sensitivity of Combustion Noise and NOx and Soot Emissions to Pilot Injection in PCCI Diesel Engines." *Applied Energy* 104(x):149–57.

Torres García, Miguel, Francisco José Jiménez-Espadafor Aguilar, and Tomás Sánchez Lencero. (2009). "Experimental Study of the Performances of a Modified Diesel Engine Operating in Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Combustion Mode versus the Original Diesel Combustion Mode." *Energy* 34(2):159–71.

Tunka, Lukas and Adam Polcar. (2017). "Effect of Various Ignition Timings on Combustion Process and Performance of Gasoline Engine." *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 65(2):545–54.

Turkcan, Ali, Mustafa Deniz Altinkurt, Gokhan Coskun, and Mustafa Canakci. (2018). "Numerical and Experimental Investigations of the Effects of the Second Injection Timing and Alcohol-Gasoline Fuel Blends on Combustion and Emissions of an HCCI-DI Engine." *Fuel* 219(January):50–61.

Valero-Marco, Jorge, Bastian Lehrheuer, J. Javier López, and Stefan Pischinger. (2018). "Potential of Water Direct Injection in a CAI/HCCI Gasoline Engine to Extend the Operating Range towards Higher Loads." *Fuel* 231(May):317–27.

Venkateswarlu, Kavati and Konijeti Ramakrishna. (2019). "Effect of Turbulence and Multiple Injection Strategies on Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Diesel Engines–a Review." *International Journal of Ambient Energy* 0750.

Verma, Saket, L. M. Das, S. C. Kaushik, and S. S. Bhatti. (2019). "The e Ff Ects of

Compression Ratio and EGR on the Performance and Emission Characteristics of Diesel-Biogas Dual Fuel Engine." *Applied Thermal Engineering* 150(July 2018):1090–1103.

Wang, Zhongshu, Guizhi Du, Zhijie Li, Xiaoyan Wang, and Dan Wang. (2019). "Study on the Combustion Characteristics of a High Compression Ratio HCCI Engine Fueled with Natural Gas." *Fuel* 255(July):115701.

Wei, Haiqiao, Tianyu Zhu, Gequn Shu, Linlin Tan, and Yuesen Wang. (2012). "Gasoline Engine Exhaust Gas Recirculation - A Review." *Applied Energy* 99(X):534–44.

Wu, Yuh-yih, Bo-chiuan Chen, and James H. Wang. (2016). "Experimental Study on HCCI Combustion in a Small Engine with Various Fuels and EGR." 3338–48.

Xu, Min, Yong Gui, and Kang yao Deng. (2015). "Fuel Injection and EGR Control Strategy on Smooth Switching of CI/HCCI Mode in a Diesel Engine." *Journal of the Energy Institute* 88(2):157–68.

Xu, Yuanli, Hongge Kang, Jian Gong, Shanhong Zhang, and Xucong Li. (2018). "A Study on the Combustion Strategy of Gasoline/Diesel Dual-Fuel Engine." *Fuel* 225(January):426–35.

Yan, Bowen, Hu Wang, Zunqing Zheng, Yufeng Qin, and Mingfa Yao. (2018). "The Effect of Combustion Chamber Geometry on In-Cylinder Flow and Combustion Process in a Stoichiometric Operation Natural Gas Engine with EGR." *Applied Thermal Engineering* 129:199–211.

Yao, Mingfa, Zhaolei Zheng, and Haifeng Liu. (2009). "Progress and Recent Trends in Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engines." *Progress in Energy and Combustion Science* 35(5):398–437.

Yokota, Haruyuki, Yugo Kudo, Hiroshi Nakajima, Toshiaki Kakegawa, and Takashi Suzuki. (1997). "A New Concept for Low Emission Diesel Combustion." *SAE Technical Papers* 106(1997):1479–90.

Yoon, Wonjun and Jungsoo Park. (2019). "Parametric Study on Combustion Characteristics of Virtual HCCI Engine Fueled with Methane–Hydrogen Blends under Low Load Conditions." *International Journal of Hydrogen Energy* 44(29):15511–22.

You-cheng, Sun, Xu Min, Gui Yong, Cui Yi, Shi Lei, and Deng Kang-yao. (2016a). "Effects of Injection Pressure, Exhaust Gas Recirculation and Intake Pressure on the Cycle-to-Cycle Variations of HCCI Combustion." *Journal of the Energy Institute*.

Yüksek, L., O. Özener, and H. Kaleli. (2013). "Determination of Optimum Compression

Ratio: A Tribological Aspect." *Tribology in Industry* 35(4):270–75.

Zhang, Chun Hua, Jiang Ru Pan, Juan Juan Tong, and Jing Li. (2011). "Effects of Intake Temperature and Excessive Air Coefficient on Combustion Characteristics and Emissions of HCCI Combustion." *Procedia Environmental Sciences* 11(PART C):1119–27.

Zheng, Ming and Raj Kumar. (2009). "Implementation of Multiple-Pulse Injection Strategies to Enhance the Homogeneity for Simultaneous Low-NOx and -Soot Diesel Combustion." *International Journal of Thermal Sciences* 48(9):1829–41.

Zhou, Ao, Chunhua Zhang, Yangyang Li, Songfeng Li, and Peng Yin. (2019). "Effect of Hydrogen Peroxide Additive on the Combustion and Emission Characteristics of an N-Butanol Homogeneous Charge Compression Ignition Engine." *Energy* 169:572–79.

Zhou, Lei, Kai Dong, Jianxiong Hua, Haiqiao Wei, Rui Chen, and Yiyong Han. (2018). "Effects of Applying EGR with Split Injection Strategy on Combustion Performance and Knock Resistance in a Spark Assisted Compression Ignition (SACI) Engine." *Applied Thermal Engineering* 145(September):98–109.

BÖLÜM 10
PETROL BORULARINDA KOROZYON ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Kamal Eddin ISMAEIL[1], Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA[2]
[1]Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul / TÜRKİYE
[2]Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İstanbul / TÜRKİYE

Öz: Toprağa gömülü petrol boru hattının korozyon uğraması dünyanın en büyük mühendislik ve ekonomik sorunlardan biridir, bu sorunların projeler üzerindeki büyük etkisi ile ortaya çıkmaktadır. Korozyon, birçok kuruluş ve sektörü etkileyen temel sorunlardan biridir. Bu olay tesislerin verimliliği ve performansta düşüşe neden oluyor ve bu da üretim bölümünde kayıplara sebep olmaktadır. Korozyon olayı, özellikle nemli hava ve endüstriyel alanların aşındırıcı faktörlere maruz kalan petrol ve gaz boru hatları gibi toprağa gömülü boruların korozyonu maruz olmaktadır, bunun birçok örneğini günümüzde tanılan bir olaydır. Korozyon, tesislerde çok yavaş ve sessiz bir şekilde meydana gelir, ancak insan sağlığıyla ilgili sağlık kayıpları, maddi ve ekonomik kayıplar da dâhil olmak üzere oluşan kayıplar hayal edilemeyecek olup çevreyi de doğrudan etkiler. Bu olay endüstrinin karşı karşıya yaşadığı en önemli sorunlardan biridir ve bulunduğu ortamda metal parçaların yüzeyini etkileyen arızadır. Bu da hem metal parçaların hasar görmesi ve arızalanması sonucu neden oluyor, bunun sonucunda oluşan onarım, tasarımın değiştirilmesi, yüksek maliyetli metaller ve alaşımlar kullanılması, farklı organik ve inorganik malzemelerle kaplama, anodik ve katodik korumanın kullanılması gibi çeşitli yöntem ve araçlarla korozyona karşı kullanılmaktadır. Bu konunun önemi nedeniyle, toprağa gömülü çelik borulardaki korozyon olayının bir araştırma çalışma yapılmıştır. Düşük maliyetli ve yüksek verimliliği mevcut koruma sistemlerini kullanmaktadır. Yaptığımız deneysel çalışmada elde ettiğimiz sonuçlar da kaplamasız boruların korozyon oranı daha yüksek olduğu görüldü. Katodik koruma boru numunelerinde daha güçlü olduğu görüldü. Kaplamasız boru koruma oranı daha düşüktür. Katodik koruma uygulanan boru daha güçlü olduğu sonucuna varıldı, Epoksi+ poliüretan kaplaması korozyon oranı daha düşük epoksi kaplamasına göre. Epoksi kaplaması koruma oranı daha düşüktür ama epoksi + poliüretan kaplaması daha güçlüdür.

GİRİŞ ve KURAMSAL ÇERÇEVE

Petrol ürünleri genellikle farklı mesafelerdeki boru hatları aracılığıyla taşınır. Boru hatları ile taşıma yöntemi ucuz olduğu için yaygın ulaşım yöntemlerinden biri olarak tüm dünyada kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemin dezavantajı, üretimde azalmaya ve çevre güvenliğine yönelik risklere yol açan sızıntı, patlama ve diğer tehlikeler gibi çeşitli riskler vardır. Ham petrol boru hatlarındaki korozyon olayı, ham petrol bileşenlerinin çeşitliliği ve etkilerinin karmaşıklığı nedeniyle petrol endüstrisinde çözülebilmesi en zor sorunlardan biridir. Bu durum korozyona neden olan tüm parametreleri saymayı ve ardından etkilerini ayrı ayrı netleştirmeyi zorlaştırmaktadır.

Korozyon, bir malzemenin veya özelliklerinin dış veya iç etkilerle etkileşimi sonucu bozulmasıdır, başka bir değimde ise ısı, nem veya tuz gibi yardımcı bir ortamın varlığında iki veya daha fazla maddenin bileşenlerinin reaksiyonundan kaynaklanan hasardır. Okul, hastane, enerji santralleri, köprüler, yollar, limanlar ve havalimanları gibi sanayi tesisleri ve hizmet binaları, parçalarının korozyona uğramasından olumsuz etkilenmekte, bu da kullanım ömürlerinin kısalmasına ve operasyonel verimliliklerinin kısalmasına yol açarak, bakım ve işletme maliyetlerini artırmaktadır. Ayrıca çevresel ve iklimsel değişikliklere maruz kalan petrol iletim ve dağıtım ağları, pompa istasyonları, petrol depolama, iletim ve dağıtım hatları da korozyona maruz kalmaktadır (Mark. E. Orazem., 2014).

Korozyon olayı küresel bir olguya dönüşmüştür, Korozyon riski, çeşitliliğinde ve oluşma nedenlerinde yatmaktadır. Bu nedenle, en tehlikeli korozyon türünün yer altı çelik borularında meydana gelen korozyon olduğuna dikkat çekerek, ona karşı birçok koruma yöntemi vardır. Nemli topraklarda korozyonu, kuru topraklarda ve suya doymuş topraklarda korozyondan daha şiddetlidir, çünkü korozyon sürecinin meydana gelmesi hem nem hem de oksijenin varlığını gerektirir ve kuru toprağın nemden ve doymuş toprağın oksijenden yoksun olduğu bilinmektedir. Bu türe nemli korozyon denir. Yüzeydeki korozyon katmanları kimyasal ve fiziksel özellikler açısından farklılık gösterir. Ayrıca, bu tabakalar korozyon ortamındaki değişime göre farklılık gösterir, bu nedenle atmosferik havada nemli korozyonuna kıyasla çok az kalınlığa sahip hafif tabakalardır, çünkü korozyon tabakaları daha büyüktür ve metal üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir (Winston Revie, R., 2008). Topraktaki korozyon sürecini artıran faktörler; bağıl nem, oksijen konsantrasyonu, sülfat konsantrasyonu (SO4), topraktaki klorür tuzlarının (Cl) konsantrasyonu, pH değeri, gözeneklilik, kaçak akımlar ve elektrokimyasal reaksiyonun seyri üzerinde büyük etkisi olan toprağın elektriksel iletkenliğidir. Elektriksel iletkenlik, toprakta bulunan nem ve tuz miktarına bağlıdır.



Şekil 1. Korozyona Uğramış 5LX52 Petrol Boru Hattı

Elektrik akımının anot alanından katot alanına akışı, metaldeki iki nokta arasındaki potansiyel farkı nedeniyle mikroskobik korozyon (Microcell Corrosion) hücresi adı verilen tek bir metal yüzeyde başlayan lokalize korozyon hücreleri oluşturabilir veya iki metal yüzey arasında, her iki durumda da bir elektrolit olması koşuluyla, mikroskopik olmayan korozyon hücresi (Macrocell Corrosion) olarak adlandırılır.

Toprağa gömülü boruları koruma süreci kolay bir iş değildir, doğruluk, dikkat ve takip gerekmektedir, çünkü korozyon yaratmaya ve tetiklemeye yardımcı olan değişkenler bol miktarda mevcuttur. Toprağın homojen olmaması, bileşenlerinin farkı, bir noktadan diğerine nem yüzdesi, tuz konsantrasyonu, sıcaklık, kullanılan metal türü ve bileşenleri ve diğer birçok faktör bulunmaktadır.

Toprağa gömülü petrol taşıyan milyonlarca kilometre boru hattını korozyona maruz kalmasıyla, bu tür korozyona maruz kalmaları nedeniyle boruları değiştirme maliyetlerinden çok fazla kayba neden olduğunu görüyoruz. Bunun yanı sıra petrol ürünleri sızmasıyla kaynaklanan diğer kayıplar, buna da ek olarak ortaya çıkan kazalar ve yangınlar gibi büyük kayıplar meydana gelir.

Bu olgunun daha önceki dönemlerde dünya ekonomisine olumsuz etkiler yansıttı. Çıkan sorunla ilgili, uygun çözümler bulmaya çalışan dünya çapında yapılan çok sayıda araştırmalar bulunmaktadır bir yandan da engellemesini ve yan etkilerini azaltmayı amaçlayan birçok mühendislik yöntemini uygulayarak ve yansıdığını görüyoruz.

Katodik koruma sistemleri ve kaplama yöntemleri kullanılan en popüler mühendislik yöntemlerinden ve koruyucu sistemlerden biri olarak kabul edilir ve günümüzde gömülü boruları korumak için en çok kullanılmaktadır.

Literatürde yer alan çalışmaları inceleyerek görülen ki;

PH değerine yakın bir ortamda bırakılan X80 ve X100 boru çeliklerinin gerilme korozyon çatlaması üzerindeki katodik korumanın etkisini araştırmak için 220 günlük bir süreye sahip kanıtlanmış halka testleri yapılmıştır (Li Yan ve arkadaşları, 2017).

Petrol ve Gaz Boru Hatlarında Kaplama Olarak Poliüretan kaplama çalışmasında çok iyi sürtünme ve darbe direnci, yüksek kimyasal direnç ve yüksek sıcaklıkta iyi direnç gibi uygun özelliklerinden dolayı%100 Katı poliüretan kaplamalar dış ve iç mekânlarda çeşitli uygulamalara sahiptir görülmüştür (Amir Samimi, Soroush Zarinabad, 2012).

Yeraltı Çelik Boru Hatlarının Katodik korumanın Galvanik anot metodunu (Mohd Saiful Nizam Bin Mohamad,2009).

YÖNTEM

Korozyon gaz ve sıvı halinde, çevredeki atmosfer ile metal veya alaşım arasında meydana gelen etkileşim nedeniyle metal ve alaşımında görünüm veya performans açısından meydana gelen kısmi veya toplam hasar olarak tanımlanır veya toprakta kendisine meydana gelen reaksiyonlar nedeniyle doğal özelliklerinde bir bozulma sonucudur.

Petrol Boru Hatlarının Korozyonuna Etki Eden Faktörler

1. Metallerin özellikleri:

Fiziksel durumu, elektrokimyasal potansiyeli, atomlarının ve oksitlerinin göreceli boyutu ve yüzey alanı açısından.

2.Aşındırıcı ortamın özellikleri: Aşağıdaki etkiyi içerir

Nem: Demir metalin korozyonu kuru toprakta boru içinden geçtiğinde yavaş olur, ancak nem içeren başka bir alandan geçtiğinde daha hızlıdır. Bu nem mevcut olduğunda, uçucu kül ve bazı toprak türleri gibi küçük parçacıkları korozyon merkezleri olarak işlev görür.

PH numarası: Korozif ortamdaki hidrojen iyonu konsantrasyonu, korozyon sürecinde önemli bir faktördür, Aktif metallerin kuvvetli asitlerle aşınması herkes tarafından bilinir, ancak metal yapılar, borular veya cihazlarla temas halinde olan su veya sıvıların gerçek pH değeri somut bir şekilde hesaba katılmaz (D.H. Mesa,2003).Korozyon, 4 veya 5 ila 10 veya 12 arasında değişen bir pH'ta pratik

olarak sabit bir hız ile karakterize edilir ve gerçek değer oksijen konsantrasyonuna bağlıdır.

Oksijen ve odak hücreleri: Farklı pH numaralı çözeltilerde oksijenin demirin korozyon hızına etkisi oksijen miktarı arttıkça artar. Oksit tabakası ise metal yüzeyine göre negatif bir yapıya sahip olduğu için oksijen miktarındaki artış, negatif elektrot alanında artış olarak değerlendirilebilir. Hidrojen iyonlarının azalmasına bağlı polarizasyon, yüksek oksijen konsantrasyonların da daha az olacaktır. Böylece oksijen konsantrasyonunda ki farklılık, bu tür eş merkezli hücreler oluşturarak erozyona neden olur.

Aşındırıcı ortam elektriksel iletkenlik: Korozyon akımı, gömülü petrol boru hatlarının korozyon sürecinde önemli bir faktör olduğundan, ortamın veya çözeltinin iletkenliğine bağlıdır. Örneğin kuru toprak, yüksek elektrik direnci olarak bilinir, bağıl neme sahip topraklar çok daha az dirence sahipken, kaçak akımlar bu tür topraklarda yani elektrik iletkenliği yüksek olanlarda borulara daha zararlıdır.

Korozyon ortamındaki pozitif ve negatif iyonların doğası: Alkali metallerde ve alkali toprak metallerinde, klorür metallerin yüzeyindeki koruyucu oksit tabakasını kırdığı için özellikle birçok metal ve alaşım için zararlıdır. Öte yandan, bazı negatif iyonlar metal ile etkileşimleri yoluyla çözünmez bir ürün oluşturur ve bu da metalin korunmasına yol açar ve dolayısıyla korozyonu önler. Pozitif iyonların doğasına gelince, korozyon sürecini de etkilerler. Örneğin, toprak suyunda miktarlarda bakır tuzu veya başka herhangi bir değerli metal bulunması demir borunun aşınmasına neden olur.

Buda demektir ki, amonyum tuzlarındaki petrol taşıyan boruların benzer konsantrasyondaki sodyum tuzlarına göre daha hızlı korozyon oluşumunu açıklar.

Korozyon inhibitörünün varlığı ya da yokluğu: Bu inhibitörler, yan etkilerinden dolayı belirli durumlarda kullanılması tavsiye edilmese de anot üzerindeki etkileriyle korozyon süreçlerini sınırlayan organik ve inorganik kimyasal bileşiklerdir. Korozyon inhibitörünün kimyasal elementin tersine hareket ettiği düşünülebilir. Bazı inhibitör tipleri örneği demir borunun metaline koruma sağlarken aynı zamanda bu metallerle kompleks pozitif iyonlar oluşturdukları için çinko, bakır ve nikelin korozyonunu arttırarak bu metallerle çözünmüş bileşiklerin oluşmasına yol açar.

Tuzların fark konsantrasyonu: Petrol boru hatları farklı yapıdaki arazilerden geçtiğinde, yüksek oranda tuz içeren kısımlar ve düşük oranda tuz içeren diğer kısımlar olduğunu görürüz ve bu nedenle, elektrik akımının bu boru hatlarının

alanlarını asansör, diğerini iniş pisti olarak çalıştırması sonucu oluşan bir konsantrasyon hücresi görevi görür. Bunu asansör alanlarının aşınması takip eder (Ambat,R,1993).

KOROZYONDAN KORUNMA

Korozyon, yaşamın birçok alanında önemli bir rol oynar ve bizi korozyonu incelemeye ve onu kontrol etmeye ve zararlı etkilerini sınırlamaya zorlayan birçok neden vardır ve bu nedenler şunları içerir; Ekonomik nedenler, güvenlik nedenleri, sağlık nedenleri ve doğal kaynakların korunması (P.R. Roberge,2005).

Ekonomik nedenler

Korozyon çok maliyetlidir. 1980'de Amerika Birleşik Devletleri'nde korozyonun maliyeti yaklaşık 70 milyar dolar olarak tahmin ediliyordu ve şu anda yıllık 276 milyar dolar olarak tahmin ediliyordu. Britanya'da korozyonun maliyeti 1971'de 4,1 milyar sterlin veya ulusal ürünün yaklaşık %3'ü olarak tahmin ediliyordu.

Korozyon nedeniyle her zaman çeliği sürekli boyamaya ihtiyaç vardır ve korozyona daha dayanıklı yeni malzemeler üretmek için firmaların harcadıkları yüzbinlerce doların yanı sıra, Belçika'da korozyonla yok edilen demir miktarının yıllık üretimin dörtte biri veya üçte biri olduğu tahmin ediliyor ve ayrıca korozyon sonucu bozulan cihazların maliyetleri yanında cihazların periyodik bakımları için fabrika kapatma maliyetleri de var.

Güvenlik nedenleri

Korozyon, hayatlarını kaybettikleri bir zamanda insanlar için pek çok sıkıntıya neden olur. Çoğu kazanın neden olduğu uçak kazalarından gemi enkazına kadar birçok kaza vardır. Belki de en ünlü kaza, Three Mile Adası'ndaki nükleer reaktörün, esas olarak korozyondan kaynaklanan patlamasıdır, mekanik stres ve atmosferik korozyonun birleşik etkisi nedeniyle Hawaii'deki ünlü uçak kazasını, volkanda Savaşı'nda bazı İngiliz Hava Kuvvetleri uçakları, 1982 yılında korozyon nedeniyle cihazlarının arızalanmasından ve Hindistan'da Bobal eyaletinde bir kimyasal fabrikanın patlamasından dolayı, kazanın yüzlerce kişinin ölümüne ve yüzlerce körlüğün yaralanmasına ve borularda korozyon ürünlerinin birikmesi nedeniyle su ısıtıcılarının patlamasından zarar gördü.

Sağlık nedenleri

Gömülü petrol boru hatları aşındığında, çevrenin kirlenmesine ve zehirli maddelerin bitkilere ve suya sızmasına ve sonuç olarak da insanlara ciddi sağlık sorunlarına maruz kalmasına neden olur.

Doğal **kaynakları korumak**

Korozyon doğal kaynak kaybına neden olur, örneğin İngiltere'de her 90 saniyede bir ton çelik tamamen pasa dönüşür ve çeliğin üretiminde kullanılan enerji kaybı da yaşanıyor, çinko ve kurşun yüzeylerin bozulmasına yanı sıra, su borularının korozyona uğramasına ve çatlamaları doğal su kaybına neden olur. Petrol endüstrisinde de korozyon sorunları yaşanmaktadır. Bazı kuyular, düşük pH'a katkıda bulunan hidrojen sülfür gazı içerdiğinden, yüksek sıcaklık koşullarında Sülfür iyonları ve düşük pH ta boruların korozyon sürecini hızlandırır. Petrol boru hatlarının çatlakları, çevre kirliliğinin yanı sıra bu zenginliğin kaybına da yol açmaktadır.

Yukarıda belirtilenler, korozyonun doğrudan maliyetlerinin basit örnekleridir, ancak dolaylı maliyetlerin tahmin edilmesi zor olabilir, örneğin:

1. Aşınan ve yıpranan parçaların tamirine ara verilmesi sonucu fabrikalarda zaman kaybı ve bu gerçek maliyetin çok küçük bir kısmı, yüksek düzenli bakım maliyetleri bir nükleer reaktörün kapatılması her gün milyonlarca dolara mal olur.

2. Korozyon nedeniyle oluşan donanım hasarı nedeniyle tüketicilerin dava masrafları.

3. Korozyon oluşması nedeniyle cihazların verimi azalması.

Yukarıdakilerin hepsine ek olarak, doğru donanım ömrünün seçilmesine ve buna bağlı kalınmasına dikkat edilmelidir. Kullanışlı bir cihazın kullanılması, korozyon direncini artıran malzeme seçimi ve koruma sistemi, bakım maliyetini düşürür. İlk maliyetler daha yüksek olsa da uzun vadede toplam maliyet daha düşüktür.

KOROZYON MEKANİZMASI

Korozyon, endüstrinin gelişimini ve ilerlemesini çok etkileyen olaylardan biridir. Korozyon birçok endüstriyel süreci bozduğundan, üretici korozyona maruz kalan ekipmanlarını ve mekanizmalarını korumak için üretim süreçlerini durdurmak zorunda kalır. Üretim sürecinin devam etmesini engelleyen ve diğer birçok zarara yol açan bir zaman gecikmesine ve ekonomik kayba neden olur (P.R. Roberge,2005).

Korozyonun oluşması için, bir korozyon hücresi oluşturmak için karşılanması gereken koşullar vardır, bu koşullar şunlardır:

1. İki reaksiyon kutbu mevcut olmalıdır (anot ve katot).

2. Katot ve anot arasında bir elektriksel potansiyel farkı olmalıdır 50 mili volttan az değil (Bu farkın oluşumu, farklı konsantrasyonlar, farklı maddeler veya farklı oksijen seviyeleri gibi çeşitli nedenlerden kaynaklanmaktadır.

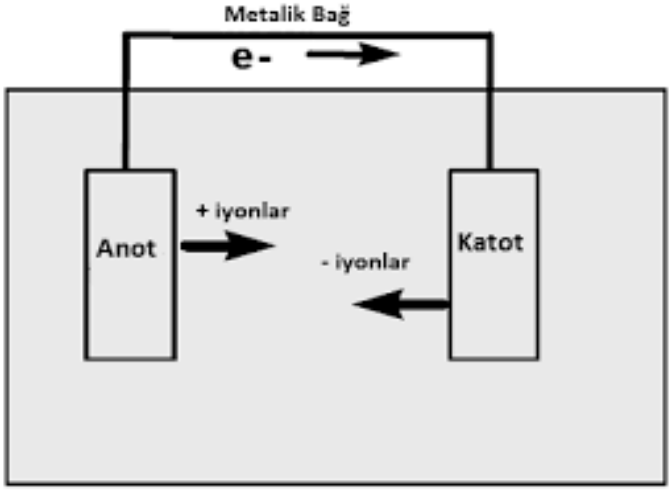
3. Anot ile katot arasında, elektrik akımının içinden geçmesine yardımcı olan metal veya fiziksel bir bağlantı olmalıdır.

4. Hem anodun hem de katotun daldırıldığı bir ortam olmalı ve bu ortam elektriksel iletkenliğe sahip olmalıdır.

5. Tüm bu koşullar karşılanırsa, bir korozyon hücresi oluşacak ve metal paslanmaya başlayacaktır. Bu nedenle, korozyon önleme teorileri, korozyon oluşumunu tamamen önlemek için önceki koşullardan birindeki bir kusura dayanmaktadır (2008, Pierre).

Metal yapılarda, borularda ve ekipmanlarda, yüzeylerini genellikle toprağa veya suya ile temas ettiğinde paslanır. Elektron akışının eşlik ettiği kimyasal reaksiyonların bir sonucudur. Bu nedenle, korozyon oluşumu, demir metalinin herhangi bir parçasının kaybolmasıyla sonuçlanan elektrokimyasal bir işlem olduğu söylenebilir. Böylece toprağa, suya ve hatta atmosfere korozyona maruz kalan yüzeyin galvanik hücrenin oluşumuna neden olur (Denny,1996).

Elektrokimyasal korozyon, katı metal atomlarının oksitlendiği ve çözelti içinde çözünen elektrolitik iyonlara dönüştüğü korozyon olarak tanımlanır. Bu oksidasyon süreci, anot alanları olarak adlandırılan metal yüzeyindeki alanlarda meydana gelir. Bu oksidasyon işleminin bir sonucu olarak, metal gövde boyunca anot boşluklarından katot boşluklarına akan bir elektron akışı vardır indirgeme reaksiyonları ile ortadan kaldırılabilir. Son reaksiyonun gerçekleşmesi için, aşındırıcı ortam anot ve katot boşlukları arasındaki devreyi tamamlayan iyonlar içermelidir.



Şekil 2. Elektrokimyasal Korozyon

Örneğin, iki magnezyum ve çelik çubuğu iletken bir ortamına daldırıldığında ve iki çubuk harici olarak bir tel ile bağlandığında, magnezyum çubuk anot olurken, çelik çubuk bir katodu olur. Negatif yüklü bir (e-)elektron, iletim teli boyunca magnezyum çubuktan çelik çubuğa akar ve denge durumunu korumak için pozitif yüklü Mg iyonu elektron ortamında magnezyum çubuktan çelik çubuğa akar ve bu nedenle magnezyum çubukta korozyon oluşur ve çelik çubukta korozyon oluşmaz.

KOROZYON SINIFLANDIRMASI

Aşındırıcı ortamına göre: Bu temelde korozyon ıslak ve kuru olarak ikiye ayrılabilir ve ismine göre ıslak tipte korozyonun oluşması için sıvıların veya nemin varlığı gerekirken, kuru korozyon genellikle bazı bacalarda olduğu gibi yüksek sıcaklıklarda yani metaller ve gazlar arasında meydana gelmesini gerektirmez. Mekanik korozyon sürecine bağlı olarak: Korozyon işleminin seyrine göre, bu bakımdan kimyasal korozyon ve başka bir elektrokimyasal olarak ikiye ayrılır. Korozif metal görünümüne bağlı olarak: Bu durumda, korozyon bir bütün olarak metal yüzeye eşit, bölgesel veya merkezi korozyon. Bu durumda korozyon belirli alanlarda yoğunlaşır. Yerel erozyonun biri makroskobik korozyon, diğeri mikroskobik korozyon olmak üzere iki türü vardır. Makroskopik korozyonda, sınırlandırılmış korozyonun etkisi çıplak gözle görülebilir, yani etkileri büyüktür, oysa mikroskopta erozyonun etkileri o kadar küçüktür ki ancak mikroskopla algılanabilirler (Fontana, 1986).

KOROZYON MALİYETLERİ

Doğrudan ve dolaylı maliyetler ikiye ayrılır

Doğrudan maliyetler

1- Metalin kullanım ömrünün sonu (toplam hasar).

2-İmalat malzemelerinin daha korozyona dayanıklı ve daha pahalı malzemeler kullanılarak, Korozyon önleyici malzeme, katodik koruma ve tasarım büyütme maliyetleri.

Dolaylı maliyetler

Üretim eksikliği: Ekipmanın aşınmış kısımlarında gerçekleşen onarım ve yenileme işlemleri, bu parçaların fiyatı düşük olsa bile fabrikayı veya üniteyi belirli bir süre durdurması gerekir. Korozyon oranındaki artış çoğu zaman zorunlu duruşların oluşmasına neden olur ve buda ekipmanın bakımının artmasına ve üretim süreçlerinin durmasına neden olur. Fabrikanın gerektiğinden daha uzun bir süre durduğu halde, maliyetlerin artmasına ve üretimin azalmasına neden olur.

Verimliliği düşürmek: Korozyon süreçleri, korozyon ürünlerinin birikmesi sonucunda ekipmanların ve hatların verimliliğini azaltır, sıvının geçmesi için gereken alanda azalır. Buda bazen sıvıyı hatların içine iletme kuvvetini artırılması yönüne sokar. Bunun yanı sıra korozyon birikmesi borunun içinde ısı transferini azaltabilir ve bazen hatalı ürünler üretebilir.

Korozyon ürünleri kirliliği: Kimya ve gıda endüstrisinde gibi bazı endüstriler, ürünlerinin metal oksitle kirlenmesine izin vermezler. Korozyondan kaynaklanan bu kirliliği önlemek için kaplar ve hatlar paslanmaz çelikten imal edilir.

Genel kayıp: Korozyon, ünite veya fabrika çalışanlarının hayatlarını riske atabilir ve bu tasarımda hesaplanamayan bir kayıptır, ancak dikkate alınmalıdır.

Amerikan Petrol Enstitüsü (API) Standartları

API, tüm petrol ve doğal gaz otoritelerini temsil eden ulusal bir birliktir. Petrol ve türevleri alanında çalışan en büyüğünden en küçüğüne 400 iş birliği yapan üye var.

API 75'ten fazla standart geliştirmiştir. Petrol endüstrisi için API standartları, petrol çıkarımından son kullanıcıya ulaştığı noktaya kadar kullanılan her tür malzeme ve hizmet için genel gereklilikleri ve uluslararası pazardaki vizesini içerir.

API 20 Mart 1919'da oluşturuldu. Enstitünün kuruluş amacı; Tüm ulusal meselelerde hükümetle birlikte çalışmak ve Amerikan petrol ürünlerinin iç ve dış ticaretini teşvik etmek, Petrol endüstrisinin tüm branşlarda menfaatlerini sağlamak, petrol ve gaz endüstrisi ile ilgili sanat ve bilimlerde üyelerinin gelişmesini sağlamak.



Şekil 3. Taşımacılıkta Kullanılan 5LX52 Petrol Boru Hattı

API standart borular dünya çapında petrol ve doğalgaz endüstrisinde kullanılmaktadır. Bu borular için yıllardır X42, X-52 ve X-60 çelikleri kullanılmaktadır. Sonraki yüksek mukavemet gereksinimleri, X-65, X-70 ve X-80 çeliklerinin geliştirilmesine yol açtı. Bu çeliklerde, yüksek mukavemet ile birlikte yüksek darbe tokluğu ile kaynaklanabilirlik sağlamak gerekliydi. Bugün X-100 çeliği de üretilmekte ve X-120 için araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir (API Specification For Line Pipe, 2018).

BULGULAR

Metalleri korozyondan korumak için, her biri belirli koşullar için uygun olan ve özel malzemeler gerektiren birkaç yöntem vardır, bu nedenle, koruma yöntemleri uygulanmadan önce incelenmelidir.

Katodik koruma ile Tarihsel olarak, katodik korumanın kullanımı on dokuzuncu yüzyılın başlangıcına, özellikle de bu yöntemin gemileri deniz suyundaki çinko direkler aracılığıyla korozyondan korumak için kullanıldığı 1824 yılına kadar uzanır. Ancak bu yöntem pek gelişmedi ve geçen yüzyılın otuzlu yıllarına kadar bazı fabrika birimleri, boru hatları, tanklar, gemiler, marinalar ve diğerleri gibi metal yapıları korozyondan korumanın en iyi yolu haline gelmek için birçok iyileştirme ve geliştirmenin yapıldı ve popüler haline geldi (Yalçın, H., Koç, T., 1999).

Katodik koruma, korunacak metalin negatif elektronlarla sürekli olarak katot haline getirilmesi ve aynı ortamdaki ilgili metal direğin anot haline gelmesi süreci olarak tanımlanabilir (Perez, N., 2004).

Katodik korumanın temelleri: Katodik korumanın nasıl çalıştığını netleştirebilecek temeller arasında şunlar yer almaktadır.

Elektrokimyasal hücre: Demir ve çinko elektrotlar bir elektrokimyasal hücreye bağlandığında, elektrik akımı dış devreden geçer ve iyonlar çözeltiye geçer, demir korozyondan tamamen korunur ve katodu temsil ederken, çinko aşınır ve anot temsil eder (James, B,2010).

Elektrokimyasal denklemi: Metallerin çoğu asidik ve nötr ortamda iyonlaşarak pozitif iyonlara ve birkaç elektrona dönüşür.

$Fe \rightarrow Fe^{+2} + 2e$ (Fe metali temsile ediyor).

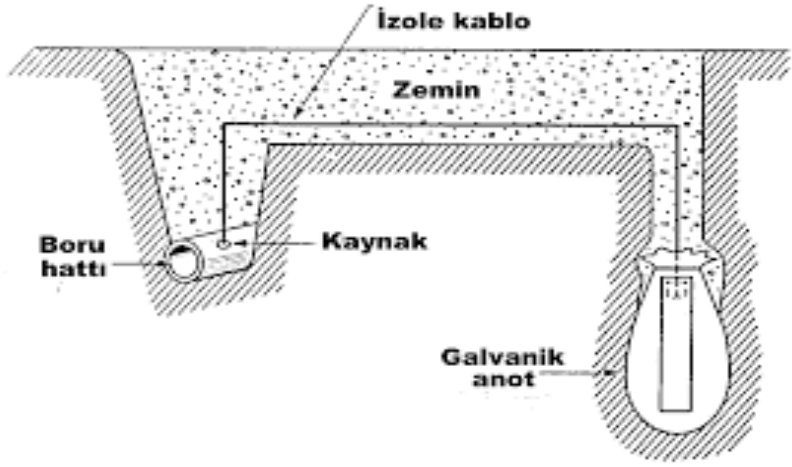
Önceki denkleme harici bir kaynaktan bir elektron akışı uygulandığında, denklem geriye doğru değişir ve demir iyonlaşmasını önler ve bu katot korumasının etki mekanizmasını temsil eder (Talbot, D.,1998).

Metal yapıları katodik korumanın iki yolu vardır, dış akımlı katodik koruma ve Galvanik anotlu katodik koruması.

Galvanik Anotlu Katodik Koruma Koruma Çalışama Prensibi;

Katodik koruma prensibi, elektrokimyasal hücrede metalin tüm yüzeyinin katot görevi görmesini sağlayarak gömülü metal yapılarda korozyon oluşumunu azaltmak için çalışır ve böylece metal yüzey yerine dış anotlarda korozyon oluşur. Alüminyum, çinko ve magnezyum aktif metallerin katot temsil etmektedir. Kullanma amacı ise, korozyona maruz kalan diğer metalar demir, nikel gibi aynı ortamda bulunduklarında, kendilerini feda edip korozyona uğratmalarını önünde durmaktır (Uhlig ve Revie, 2008).

Bu yöntem, uygulama kolaylığı, düşük maliyeti ve hasar gibi sorunların olmaması ile karakterize edildiğinden, küçük alanlara veya geçici koruma gerektiren yapıların yanı sıra elektrik akımı kaynağı olmayan alanlarda da kullanılır. Dezavantajları arasında korumanın düşük verimliliğinin %30 ile %70 arasına ulaşması ve anotların ömrünün dış akımlı yöntemine göre kısa olmasının yanı sıra büyük tesisler için gerekli korumayı sağlaması için çok sayıda anot gerektiğin görülmüştür.



Şekil 4. Galvanik Anotlu Katodik Koruma Yöntemi

1.Anotların Özellikleri:

Galvanik anotlar, kilogram başına ürettikleri akım miktarının yanı sıra kullanılabilecekleri koşullarda farklılık gösterir; örneğin, deniz suyunda bir alüminyum anot kullanılırken toprakta bir çinko anot kullanılır.

Tablo 1. Galvanik Anotların Ürettiği Akım Miktarı

Akım miktarı	Çinko	Magnezyum	Alüminyum
Amper.saat / kg	820	2210	2980
Amper saat / m^3 ($x10^6$)	5.5	3.8	8.1
Verimlilik (%)	90	50	80

Magnezyum

Magnezyum anot en çok kullanılan türlerden biri olarak kabul edilir ve genellikle 0.06 alüminyum ve 0.03 çinko içeren bir alaşımdan oluşur ve su altındaki yapıları korumak için saf suda ve toprakta kullanılmasını sağlayan çeşitli avantajlara sahiptir,(İller Bankası Genel Müdürlüğü İçme suyu ve Kanalizasyon Daireleri Başkanlıkları, 2005).

-Büyük elektriksel hareket gücü: Toksik değildir, Az yoğunluğa sahiptir. Diğer ortamlarda kullanılmasını engelleyen birkaç kusur vardır, bunlardan bazıları şunlardır:

Magnezyum anodun büyük elektriksel hareket gücü özelliği deniz suyu gibi düşük dirençli ortamlarda (yani yüksek iletkenliğe sahip sıvılar) istenmeyen bir durumdur. Oksijen azalmasına yol açar veya büyük miktarda hidrojenin artması, bu da boya kaybına veya stres nedeniyle korozyona neden olur. Bu anotlar, bu tür ortamlarda kullanılabilmesi için manganez gibi diğer bazı metaller eklenerek geliştirilmiştir. Magnezyum anotların diğer bir dezavantajı, aşağıdaki denklemde olduğu gibi, demir oksitlerle etkileşimleri ve negatif tabakasını kaybolmasıdır.

$$Fe_2O_3 + 3Mg \rightarrow 3MgO + Fe^{+2} + \Delta H$$

Çinko

Anotları üretmek için kullanılan çinko, 0.5 alüminyum, 0.1 silikon, 0.1 kadmiyum ve 0.0015'dan demir içeren bir alaşımdır. Metal yapılar için belirli katodik koruma koşullarını karşılamak için tasarlanmış başka formülasyonlar da vardır. Çinko anot aşağıdaki özelliklere sahiptir, (İller Bankası Genel Müdürlüğü İçme suyu ve Kanalizasyon Daireleri Başkanlıkları, 2005).

→ Çinko anot, küçük bir elektriksel hareket gücüne sahiptir ve bu nedenle, anodun ömrünü uzatmak için bu yapılar üzerinde kaplama veya boyama kullanılmasıyla denizdeki çelik yapıları korumak için kullanılabilir.

→ Koruma için gerekenden fazla akım vermez ve bu nedenle metal veya boya üzerinde yan etkisi yoktur, (Esen Metal,2012).

Çinko anodun dezavantajları:

→ Yalnızca deniz suyu gibi çok iletken ortamlarda kullanılabilir.

→ Çözünür ürünleri toksiktir.

→ Yoğunluğu yüksektir.

→ Büyük miktarda hidrojen oluşumu nedeniyle 50 ° C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanılmaz.

Alüminyum

Katodik korumada kullanılan alüminyum anot, indiyum üzerinde cıva (%0,005- 0,0015) ve çinko (%4-0,5) içeren bir alaşımdan (%0,3) oluşur ve amonyum anotların başka kombinasyonları da vardır. Hafifliği ile karakterizedir, elektriksel hareket gücü ise magnezyum ve çinko arasındadır. Genellikle deniz suyunda kullanılır, (İller Bankası Genel Müdürlüğü İçme suyu ve Kanalizasyon Daireleri Başkanlıkları, 2005),

2. Galvanik Anotlu Katodik Koruma Tasarımı

Tasarımı etkileyen iki ana faktör: Toprak dayanımı ve Anot direnci'dir.

Toprak Dayanımı

Toprağın direncinin hesaplanabileceği birkaç yöntem vardır: Dört kutuplu yöntem en basitlerinden biridir. Bu yöntemde 22 santimetre uzunluğunda dört kutup (genellikle bakırdan) toprağa eşit mesafelerde ve tek bir düz çizgi üzerinde sokularak yapılır.

Devreyi kilitledikten sonra dış devredeki akım ve iç devredeki voltaj farkı ölçülerek aşağıdaki denklemde verilir:

$$\rho=2\pi\, a\, \Delta\theta/I \qquad (1.1)$$

ρ=Toprak direnci (Ohm. m).

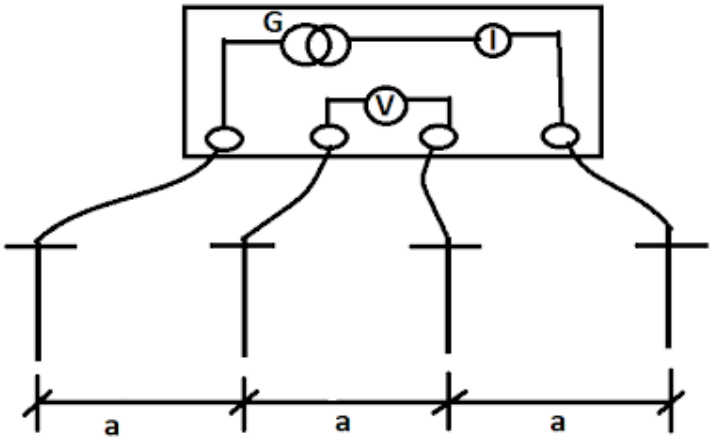
Π= Sabit 3.14 ya da 22/7

I= Elektrik Akımının Şiddeti (Amper).

a= İki kutup arasındaki mesafe (m).

Δθ= voltaj farkı (V).

Saf su, deniz suyu ve asit çözeltileri gibi sıvıların direncine gelince, bu akışkanlar özel bir hücreye yerleştirilerek ve sıvının iletkenliği ölçülerek yukarıda bahsedildiği gibi dayanımın bulunması dâhil dirençleri bulunur.



Şekil 5. Toprak Direnci Ölçüm Yöntemi

Anot direnci

Toprak veya sıvı direnci elde edildikten sonra ortamdaki anotların direnci aşağıdaki denklemden hesaplanır.

$$R = \frac{\rho}{2\pi L}\left[\ln\left(\frac{4L}{d}\right) - 1\right] \qquad (1.2)$$

R= Ortamda anotun direnci (Ohm).

L= Anotun uzunluğu

A= Anot bölümü alanı.

d= Anot çapı (metre).

ρ= Ortamın dirençi (ohm*m).

Dikdörtgen veya dairesel levhalar şeklindeki anotlar durumunda, anot direnci bu denklemden hesaplanır.

$$R = \frac{0.315\rho}{\sqrt{A}} \qquad (1.3)$$

3.Koruma İçin Gerekli Akım:

Çoğu endüstriyel metalleri katodik olarak korunması için ulaşılması gereken belirli bir voltaj farkına sahip olduğu bilinmektedir. Demirli metallere bir örnek, doymuş bakır sülfat elektroduna göre negatif yönde 0.9 ile 1.2 volt arasındaki voltaj farkına sahiptir ve bunun gerçekleşmesi için metal yapının, aralarındaki korozyon voltajının başlangıcı dışındaki bir akımla polarize edilmesi gerekir.

$$\Delta V = V_1 - V_2 \qquad (1.4)$$

ΔV= Korumadan önce ve sonra potansiyel farkındaki değişiklik.

V_1=Korumadan önce gerilme.

V_2= Korunma sonrasında gerilme.

Ohm yasasından amper cinsinden koruma akımının gücü şu şekilde elde edilebilir:

$$I_t = \frac{\Delta V}{R} \qquad (1.5)$$

I_t= Koruma akımının yoğunluğu.

ΔV= Gerilme farkı.

R= Anotun direnci (Ohm).

4.Anodun Ömrü

Anot ömrü aşağıdaki denklemden hesaplanabilir (Yalçın, H., Koç, T., 1999) :

$$W_t = \frac{I_t \, x \, A_t \;\; X \;\; L_t}{Q \; X \; U} \, x \;\; 8760 \qquad (1.6)$$

L_t= Anot ömrü.

It= Koruma akımının yoğunluğu (Amper).

Q= Anot akımı miktarı (amper* saat / kg).

W= Anot Ağırlığı (Kg).

U= Anot verimliliği.

8760= Saat/Yıl.

A_t=Koruma altındaki yapının yüzey alanı (m^2).

Korunacak olan petrol boru hatları ve yağ tankları gibi metal yapının yaşları 25 ile 35 yıl arasında değiştiğinden, ağırlık ve anot sayısı hesaplanabilecek belirli bir ömür varsayıyoruz.

Standart anodun ağırlığı (w) kilogram ise denklem (1.4) 'te olduğu gibi, buna göre anot sayısı (1.7) denklemden hesaplanabilir:

$$n = \frac{\mathrm{w}}{W_t} \qquad (1.7)$$

Dış Akımlı Katodik Koruma Çalışama Prensibi;

- Dış akımlı katodik korumanın tasarımı:

Dış akımlı katodik korumanın tasarımı, boru hatları, tanklar, deniz iskeleleri ve suya ve diğer sıvılara batırılmış veya toprağa gömülü diğer yapılar gibi metal yapıyı korumak için gerekli akımı bulmayı gerektirir. Şebekeyi doğru elektrik akımı ile genişletmek için akım miktarı, anot sayısı ve doğrultucu-transformatörün tipi ve boyutu bulunarak belirlenebilir (J. H. Fitzgerald.,2011).

Akım miktarı aşağıdaki yöntemlerden biriyle hesaplanabilir:

Teorik olarak akım miktarını hesaplanması.

Önceki deneyimlerden belirlenen tablolardan akım miktarını tahmin etmek.

Çalışan bir koruma sisteminin fiili çalışmasından akım miktarını bulma.

Birinci ve ikinci yöntemlerin yeni sistemler için, üçüncü yöntemin ise bakım veya değişim gerektiren çalışma sistemleri için kullanılmaktadır (Jie Kou,2016).

Metal çerçeveyi korumak için toplam akım (1.8) 'den denklemden hesaplanır.

$$I_t = A_t \text{ x i}(1 - C_E) \qquad (1.8)$$

Koruma için kullanılan anotların toplam ağırlığı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$W_t = I_t \text{ x } L_t \text{ x } r_{ris} \qquad (1.9)$$

Bu denklemden gerekli anot sayısı hesaplanır

$$n = \frac{W_t}{W_n} \qquad (1.10)$$

I_t = Toplam koruma akımı

A_t = Koruma altındaki yapının toplam yüzey alanı

I=Koruma akımı yoğunluğu (amper / m^2).

C_E=Boyanın veya kaplamanın etkinliği (verimlilik başlangıçta büyüktür ve zaman geçtikçe bir kısmında azalır ve verimlilik genellikle sistemin ömrünün sonunda tasarlanır).

W_t = toplam anot ağırlığı (kg).

r_{ris}= Anot tüketim oranı (kg / amper *yıl).

n=Koruma sisteminde kullanılacak anot sayısı.

W_n=Tek anot ağırlığı (kg).

L_t=Koruma altındaki anot.

- Koruma akımı yoğunluğu

Metal yapıları korumak için gereken akımın yoğunluğu gömülü ortama göre değişir, çünkü Asitli ortamlara göre nötr ortamlarda akım yoğunluğu daha azdır.

- Anot türleri

Dış akımlı katodik korumada kullanılan birkaç çeşit anot vardır, örneğin deniz suyunda titanyum anotlar, toprakta demir ve silikon anotlar kullanılmaktadır.

- Kaçak akım etkisi

Benzer boyutlarda ve tek bir ortamda birden fazla metal yapı bulunduğunda, bunlardan biri katodik koruma, diğeri yapıların korumasız bir şekilde olduğunda koruma akımının anodu farklı yapılara bırakarak dağılmasıyla sonuçlanır, bu da koruma etkinliğinin yanı sıra diğer yapıların aşınmasına yol açar. Bu korozyon

türü, boru hatları, tanklar, demiryolları, elektrik kabloları gibi, bunun yanı sıra birçok metal yapının bulunduğu endüstriyel alanlarda sıklıkla meydana gelir. Oluşan bu korozyon farklı taraflar arasındaki koordinasyon eksikliğinin bir sonucudur. Bu tür bir durum, bulunan tüm yapıları aynı ortamda tek bir koruma sistemi içinde ele alarak önlenebilir (Rana, M. Hussein,2012).

Anodik Koruma

Metallerde anodik koruma yöntemi, 1754 yılında bilim adamı Edeleany tarafından ortaya çıktı ve reaksiyonun kinetik temellerini uygulayarak geliştirildi. Bu yöntem, metali koruyan negatif bir tabaka oluşturmak için iletken çözelti (elektrolit) içine daldırılan metal yapının dış yüzeyine bir anodik akımı uygulanmasında özetlenmiştir.

KAPLAMALAR

Boya, çeşitli türleri ve kullanım yöntemleriyle, metal yapıları korozyondan korumanın en basit ve en etkili yollarından biri olarak kabul edilir ve bu malzemenin yüzyıllardır var olmasına rağmen, son kırk yıl boyunca boya kullanımındaki gelişmeler, her biri kendi amaçları ve kullanım yöntemleriyle onlarca çeşidin üretimi üzerinde çalışmıştır.

♦ Boya türleri:

Boya iki ana gruba ayrılır, birinci grup organik boyayı içerir. Polimerler gibi organik malzemeler içeren her türlü boyayı içerir. Diğer grup, inorganik kaplamaları içerir ve orijinal metalin çevreleyen ortam ile etkileşimini sınırlayan bir metal oksitler içeren malzemelerle kaplamayı yapılır.

Endüstriyel tesislerde kullanılan organik kaplama türleri:

Epoxy

Epoksi grubu, viskozite, yoğunluk ve kullanım koşullarında farklılık gösteren reçineler vermek için doymuş, doymamış ve döngüsel dâhil olmak üzere birçok organik bileşikle reaksiyona girer. Karbon zincirleri veya karbon ve oksijen içeren zincirler genellikle durağandır.

Epoksi reçinesi sentetik olarak epoksi grubunun mineral asitler, nötr aminler veya organik asitler ile reaksiyonundan hazırlanır ve burada epoksi grubunda oksijen bağının kopması ve asidin hidrojeni ile bir bağ oluşturur (Amir Samimi,2011).

→ Epoksi Kaplamanın Özellikleri:

Bu kaplamanın özellikleri arasında, hidrojen sülfür, karbondioksit, organik çözücüler, su ve nem gibi kimyasallara ve gazlara karşı iyi direnci bulunmaktadır.

Sanayi tesisleri ve çeşitli yapılar da 522 mikron kalınlığa kadar boyanabilir, bu nedenle petrol boru hatlarını, su tanklarını, petrol tankları ve diğer endüstriyel yapıları boyamak için kullanılır. Önce metal yüzeyinde astar tabakasının, ardından epoksi kaplamanın işlenmesi tercih edilir (S. Guan,2007).

→ Dezavantajları:

Epoksi kaplamanın dezavantajlarından biri, kuruması sırasında gazların ve hidrojen ve kükürt dioksit gibi bazı organik malzemelerin buharlaşması, bu da kaplamanın çatlamasına ve katmanlar arasındaki gerilmelerde farklılığa neden olarak aralarındaki bağ zayıflamasına neden olmasıdır. Dezavantajları arasında, kullanımdan hemen önce karıştırılan iki ayrı ambalajda bulunması ve bu belirli oranlar, uygun sıcaklık ve tam harmanlama gerektirmesi ve kaplamayı uygularken birçok sağlık önlemine ihtiyaç duymasıdır (M Roche,2006).

Üç Katlı PE (Polietilen) Kaplama

Yüksek direnç gösteren bir kaplamadır.

1. Tabaka: Korozyon koruması; Epoksi astar, toz boya.
2. Tabaka: Ara kat; Termo plastik
3. Tabaka: Mekanik koruma; PE ’den oluşmaktadır.

Üç katlı PE (Polietilen) kaplaması uygulaması, ilk önce numune temizlenir ve kurutma işlemi uygulanır, epoksi elyaflarla korunur ve muhafaza altına alındır. İkinci katman polimeri, birinci ve üçüncü tabakların arasında yapışma oluşturur ve her iki katmanla uyumlu olmalıdır. Kalınlık 160-200 mikrondan az olmamalıdır. Çelik numuneler sertleştirildikten sonra, polietilen bantlar uygulandı, polietilen bantlar arasındaki hava boşluklarını önlemek için düzenli olarak her taraftan vakumlanır (Amir Samimi,2012).

İnorganik Kaplamalar

Bazı uygulamalarda düzgün ve dayanıklı bir yüzey elde etmek için çeliğin yüzeyi seramik ile kaplanır. Porselen boya genellikle çeliğe uygulanır. Porselen laminer, çeliğin yüzeyinde kaynayan, iyi yapışma sağlayan ve çelik ile aynı genleşme modülüne sahip ince bir cam tabakadır. Cam kaplı çelik kaplar, temizlik kolaylığı ve korozyon direnci nedeniyle kimya sektöründe kullanılmaktadır.

İnhibitörlerle Koruma

Çevreye az miktarda eklendiğinde korozyon oranını düşüren maddelere korozyon inhibitörleri denir. Korozyona dayanıklı ancak daha pahalı bir malzeme kullanmak yerine bazı durumlarda ortama inhibitörler ilave edilerek daha ucuz

malzemeler kullanılmaktadır. İnhibitör kullanımı, çukur korozyona karşı en ekonomik çözümdür. İnhibitörlerin aşınma oranını azaltmanın etkileri farklı şekillerde ortaya çıkar. Bazı inhibitörler, metalin yüzeyinde ince bir tabaka oluşturarak bir metal ile çevresi arasındaki reaksiyon hızını yavaşlatır. Örneğin; oksitleyici özelliği olan sülfürik asit (H2SO4), nitrik asit (HNO3), fosforik asit (H3PO4) gibi asitlerin bulunduğu ortamın asit konsantrasyonunu silikat, nitrat gibi inhibitörlerle azaltarak korozyon önlenebilir.

Korozyonu Azaltmada Tasarımın Önemi

Tasarım, çoğu korozyon türünü önlemenin ilk adımıdır. Uygun tasarım, korozyon sürecinin oluşmasını önlemenin en iyi ve en etkili yoludur ve aynı zamanda ani risk olasılığını da azaltır, yani dolaylı maliyetleri düşürür. Uygun tasarım, uygun metal seçimini, ısıl işlem ve üretim yöntemlerini, ortam ve çevre etkisini, sıcaklık ayarlamasını, dikkate alınan gerilimi ve ayrıca izleme ve kontrolü içerir. Korozyon alanında uygun tasarımın temelleri arasında şunlar yer almaktadır, (Gülensoy, B.A., 2006).

Çevre: Ekipman, makine ve metal yapıların korozyondan önlemek için aşağıdakiler dâhil çeşitli hususlar dikkate alınmalıdır:

Havalandırma: Hava koşulları bölgeden bölgeye farklılık gösterir. Nem ve büyük miktarlarda klor ile doymuş olduğu bir denizalanı. Hidrojen sülfür, karbon monoksit, nitrojen ve diğerleri gibi bileşikler ve kimyasal gazlarla kirlenmiş bir endüstriyel alan.

Su: Tasarım yapılırken, nehir suyu kuyulardan, deniz suyu bataklıklardan gelen kimyasal kirletici bağlı olarak farklılık gösterdiğinden, su türü ve bileşenleri dikkate alınmalıdır.

Toprak: Toprak türleri, su depolaması, asitliği ve havalandırmanın yanı sıra içlerinde yaşayan mikropların türüne göre değişir.

Kimyasal ortam: Kullanılan metal türleri, farklı kimyasal ortamlarda farklılık gösterir, havada korozyonu önlemek için kullanılan metaller, deniz suyunda korozyonu önlemek için kullanılan metallerden farklıdır.

Diğer ortamlar: Metalik malzemeler ahşap, plastik ve beton gibi metalik olmayan malzemelerle temas ettiğinde birçok sorun ortaya çıkar. Bunun bir örneği, boru hatlarındaki kauçuk bağlantı yerlerindeki boşluklardan kaynaklanan korozyondur.

Sıcaklık: Genel bir kural olarak, 32 ° C'nin üzerindeki sıcaklık artışıyla, demir metalin korozyon hızı bağıl neme kıyasla on kat artar. Sıcaklık arttıkça yü-

zeyde metal oksit oluşur. Karbondioksit ve kükürt dioksit gibi gazların varlığı metal yüzeylerde büyük kabuk oluşturur, metali koruma kabiliyetine sahip değildir, bu da korozyon devamı demektir. Ayrıca yanma gazlarının yoğunlaşması ortamın asitliğini arttırır ve korozyonu artırır.

Gerilme: Uygun tasarım, imalat sırasındaki şekillendirme, ısıl gerilimler, titreşim gerilimleri, ayrıca test ve çalıştırma gerilmeleri dâhil olmak üzere makinenin ömrü boyunca meydana gelen tüm gerilimleri hesaba katmalıdır. Gerilmenin metal korozyonu üzerindeki etkisi, gerilme korozyonu ve yorulma korozyonu olmak üzere iki ana türe ayrılır ve her birinin kendine özgü özellikleri, oluşma durumları ve bundan kaçınma yolları vardır.

Şekil: Tasarım yapılırken içindekilerin boşaltılması, tanklarda ve borularda yabancı maddelerin yoğunlaşmasının engellenmesi ve kaynak gibi iyi bağlantıların gerçekleştirilmesi açısından makinelerin şekli ve görünümü dikkate alınır.

Kaynak: Kaynak, bir metal parçalarını bağlamanın en iyi yollarından biri olarak kabul edilir ve birden fazla metalin kaynakları, metaller çevreleyen ortamdan izole edilmedikçe galvanik korozyona yol açtığından temizlenmeli, çarpma ve boşluk gibi dış kusurlardan arındırılmış olmalıdır.

Hareket: Borulardaki ve diğer metal yapılardaki akışkanların hareketi korozyon oranını artırır. Laminer akıştan türbülanslı akışa geçilmesi korozyona yol açmaktadır. Ayrıca borulardaki bükülme ve dönme yerleri, özellikle akışkan içerisinde katı maddeler olduğunda diğer yerlere göre daha hassastır. Metalde boşlukların oluşması sonucunda, korozyon bir süre sonra borular çökene kadar hızlanır.

Kontrol ve gözetim: Teknik olarak, korozyonu kontrol etmenin birkaç yöntemi vardır. Bunlardan biri veya daha fazlası uygulanabilir. Bu nedenle, malzeme seçimi, üretim, şekillendirme, çalıştırma ve bakımın tümü projenin ekonomik süreciyle yakından ilgili olduğundan, tasarım sırasında makinenin veya yapının tüm yaşam döngüsü dikkate alınmalıdır.

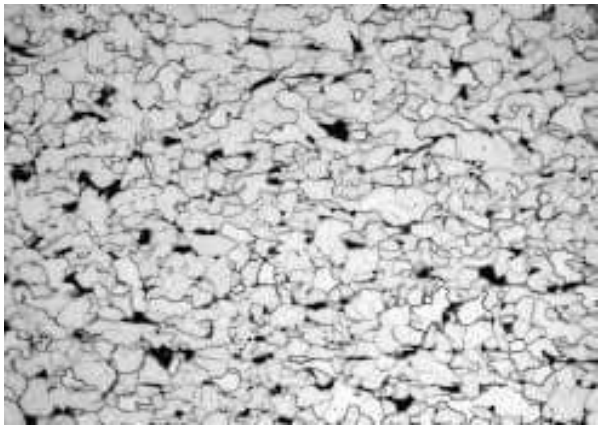
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel uygulama çalışmasında; korozyona etkisi incelenerek, API 5L standardında, kalite olarak X52 (L360)- PSL1, et kalınlığı 16-40 mm, kopma dayanımı minimum 460 Mpa, akma dayanımı 360 Mpa, petrol boruları döküm metodu ile üretilmiş yüksek kaliteli çelik kullanıldı. Kimyasal bileşimi Tablo 1'de ve mikroskobik bileşimi Şekil 1'de verilen karbon çeliğinden on beş numune hazırlanmıştır. Bu numuneler, laboratuvar deneylerinde kullanılacak numuneler tüm boruyu kullanmanın zorluğu nedeniyle hizmet dışı bir petrol taşıma borusundan alınmıştır. İstenmeyen yüzey pürüzlülüğünü ve keskin köşeleri gidermek için yüzey

taşlama ve düzleştirme işlemi yapılır, eski korozyon izlerini gidilir, sonradan numuneleri numaralandırılır ve ardından doğru bir elektrikli bir terazi kullanarak numuneler tarttırılır. Numunelerin hava ile oksitlenmemesini sağlamak için numuneler belirtilen yöntemlerle korozyondan korunma aşamasına hazırlık için vakumlu bir kaba yerleştirildi.

Tablo 2. Yüzdelik Olarak 5Lx52 Numunelerin Elementlerin Kimyasal Bileşimi

Element	**Karbon**	**Silikon**	**Manganz**	**Fosfor**	**Kükürt**	**Krom**	**Nikel**
Kimyasal sembol	C	SI	Mn	P	S	Cr	Ni
Yüzdelik oranı	0.232	0.097	1.213	0.012	0.004	0.154	0.021



Şekil 6. API 5L X52 Karbon Çelik Mikro Yapı

Tipik olarak ferrit (beyaz) ve perlitten (siyah) oluşan X52 mikro yapısı, çalışmada kullanılan koruma yöntemleri, aşağıdaki gruplara ayrılmıştır:

Epoksi kaplama yöntemi ile;

Korunacak çelik numuneler, temizleme ve kurutma işlemlerinden sonra, boyanın numunelerin yüzeyine homojen dağıldığı dikkate alınarak epoksi ile kaplanır ve numuneler gömülmeden önce epoksi katılaşana kadar bir buçuk saat bekletilir.

Epoksi ve Poliüretan kaplama ile;

Korunacak çelik numuneler, temizleme ve kurutma işleminden sonra epoksi ile kaplanır ve epoksi sertleştikten sonra, numuneler poliüretan bantlar ile sarılır, korunacak numune ile polietilen bantlar arasında hava boşlukları oluşmaması için düzenli olarak her taraftan bastırılır.

Galvanik anotlu katodik koruma ile;

Katodik koruma prensibi, elektrokimyasal hücrede metalin tüm yüzeyinin katot görevi görmesini sağlayarak gömülü metal yapılarda korozyon oluşumunu azaltmak için çalışır ve böylece metal yüzey yerine dış anotlarda korozyon oluşur, Katodik olarak korunacak çelik numuneler çinko elektrotlarla kurban bir anoda görevini almıştır, 10 cm uzunluğunda ve 5,2 cm kalınlığında, Çinko elektrotların voltaj değeri ise (-0.763 v). Elektrokimyasal reaksiyonda katot olarak kabul edilen demir, çinko ile karşılaştırıldığında anot gibi davrandığı için yüksek aktivitesi ve dolayısıyla etkileşime girme kabiliyeti bundan dolayı çinko daha kararlıdır. Çinko, oksijenle birleşip ince bir çinko oksit tabakası oluşturma kabiliyeti sayesinde onu sürekli korozyondan korur, bu nedenle çinkonun kolay erişim ve düşük maliyetinin yanı sıra korozyona karşı iyi bir direnci vardır.

Dış akım kaynaklı katodik koruma ile;

Bu koruma sisteminde, metalin bir katot haline gelmesi için bir akım uygulanır. Akımda bir trafo redresör sayesinde akım iletimi sağlanır, (-) doğru akım korunacak metal çerçeveye ve (+) uç yardımcı anoda bağlanır. Yardımcı anot olarak çoğu zaman kullanılan silis katkılı demir anotlardır, bazen ithal edilen grafit ve Metal oksit kaplı titanyum anotlar, ucuz ve çokça bulunan hurda demirde kullanılmaktadır.

Korumalı ve korumasız karbon çelik numuneleri Ceyhan bölgesine gömüldü. Çalışmamızda gömülü numunelerin ham petrol boru hattında aynı metalden olup, Yapılan testin sonucunda gömülen numunelerin korozyon oranlarını karşılaştırmasını yapılacaktır, ayrıca koruma sistemin ve kaplama yöntemlerin karşılaştırılmasını yapılacaktır. Boruların toprağa gömülü olarak maruz kaldığı doğal koşullara benzer korozif koşulları sağlamak için ve petrol boruların çoğu sanayi tesisinde yer aldığından, bu nedenle bir tesis sahasından toprak seçilerek getirilmiş ve laboratuvar ortamında testeler yapıldı, plastik leğenlerde tesisten ortamında alınan toprakla doldurulmuştur. Petrol boru hatlarının dış yüzeyleri, topraktaki korozif elementlerin varlığı nedeniyle toprakla teması sonucu korozyona uğradığından toprak örnekleri alınmıştır. Topraktaki aşındırıcı elektrolit ($SO4^{-2}$ ،CL^{-}) yüzde-

sini bilmek için laboratuvarda analiz edildi. Test yapılan toprağın elektriksel iletkenliğini bilmenin yanı sıra, Toprağın pH'ın değerini kontrol edildi ve toprakta alçı taşı oranını hesaplandı.

Toprak analizine göre aşağıdaki sonuçları elde ettik:

Toprağın analizini yapmanın ilk adımı, topraktan bir numune alınır ve laboratuvarda mikro aletler ve bileşikler kullanarak toprağı analiz etmek ve daha sonra bilgilerin doğal ve anormal değerlerini belirlemek için özel tablolarla karşılaştırıldı. Kimyasal analizin toprağın kimyasal özelliklerini tanımlamadaki başarısının ve başarısızlığının, esas olarak çalışma alanının gerçekliğini iyi temsil eden bir numune alınmasına bağlı olduğunu bilmek önemlidir ve doğru sonuçlar elde etmek için, uzun depolama organik madde kaybına yol açacağından, testi hızlandırma ihtiyacı ile toprak kuru olmalıdır.

Bu durum, toprağın kimyasında önemli bir değişikliğe neden olur ve numunelerin alınacağı alanlar, eşit dağılımla tüm çalışma alanını kapsayacak şekilde belirlenmeli ve numunelerin alınacağı genellikle 30, 60 ve 90 cm derinlikler belirlenmeli ve toprak yüzey tabakasının kaldırılması ihtiyacına dikkat edilmelidir. 15 cm derinliğe kadar ve sonunda numunenin yerini ve derinliğini gösteren özel semboller konularak laboratuvara alınır.

Tablo 3. Toprak Analiz Sonuçları

PH	**Organik madde**	**Kalsiyum sülfat**	**alçı**	**Elektriksel iletkenliği**	**CL^-**	**$SO4^{-2}$**	**Çözünmüş tuzlar**
8.48	1.1	30.5	0.74	1.06	0.053	0.191	0.38

Bu araştırmada sekiz aylık bir süre korozyon testleri yapılmış ve test süresinin bitiminden sonra tüm numuneler ilk önce fırça ve su ile korozyon ürünlerinden temizleme işlemi uygulanmıştır. Daha sonra orantılı bir hidroklorik asit solüsyonu (1:3) oranında ve plastik bir fırça ile yıkandı, ardından numuneler asit kalıntılarını gidermek için tekrar yıkandı ve kurutma işleminden sonra tartıldı. Ağırlık ölçümleri yapıldı.

- · **Korozyon Oranını Hesaplamaları**

Korozyon hızı gravimetrik yönteme göre değerlendirildi

$V = \Delta W/A0. T [(g/cm^2. yıl)]$

$\Delta W = W0 – W1$

W0: Testten önce numunenin tartısı

W1: Testten sonra numunenin tartısı

A0: Test edilen numunenin korozyona maruz kalan gerçek yüzey alanı

T: Parçanın korozyon ortamına maruz kalma süresi

- **5Lx52 tip için**

A0 = 2.A1 + 2.A2 + 2.A3

A1: Yatay alan

A2: Ön alan

A3: Yan alan

A0= 2(2.4 × 10.1) + 2(10.1 × 0.795) + 2(2.4 × 0.795)

A0= 68.35 cm² (5LX52 tip borulu korozyon oranı).

İki Katodik Korumanın Arasında Koruma Oranı Karşılaştırılması

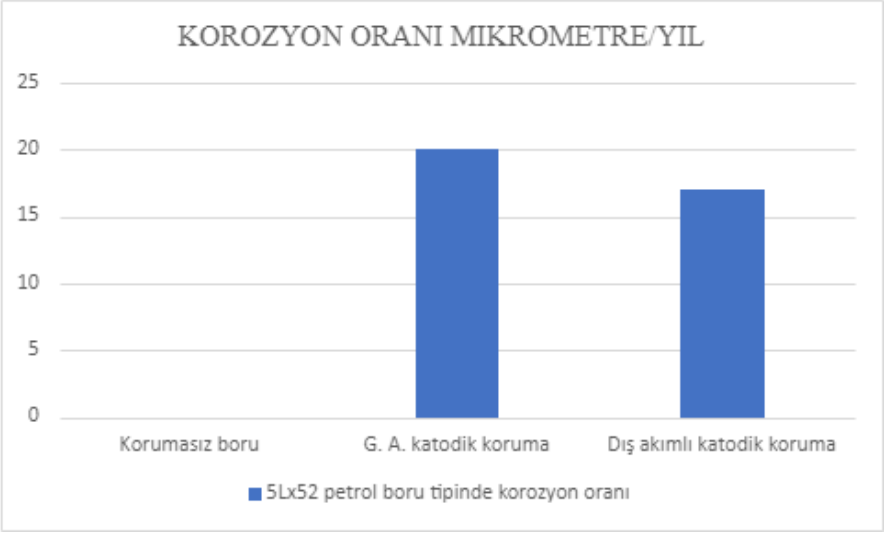
Deneysel çalışmada 5LX52 boru tipli kullanıldı, çalışmada ayrıca katodik korumanın iki metodunu kullanıldı, karşılaştırması yapıldı ve tabloda çıkan sonuçlar gösteriyor ki dış kaynaklı katodik korumalı, galvanik anotlu katodik korumasına göre az farkla koruma oranı daha iyidir. Şekil 7'de İki Katodik koruma yöntemi arasında koruma oranı karşılaştırması gösterilmektedir.



Şekil 7. İki Katodik Yöntemi Arasında Koruma Oranı Karşılaştırması

Korumasız ve Katodik Korumalı Türlerinin Korozyon Etkisini İncelemesi

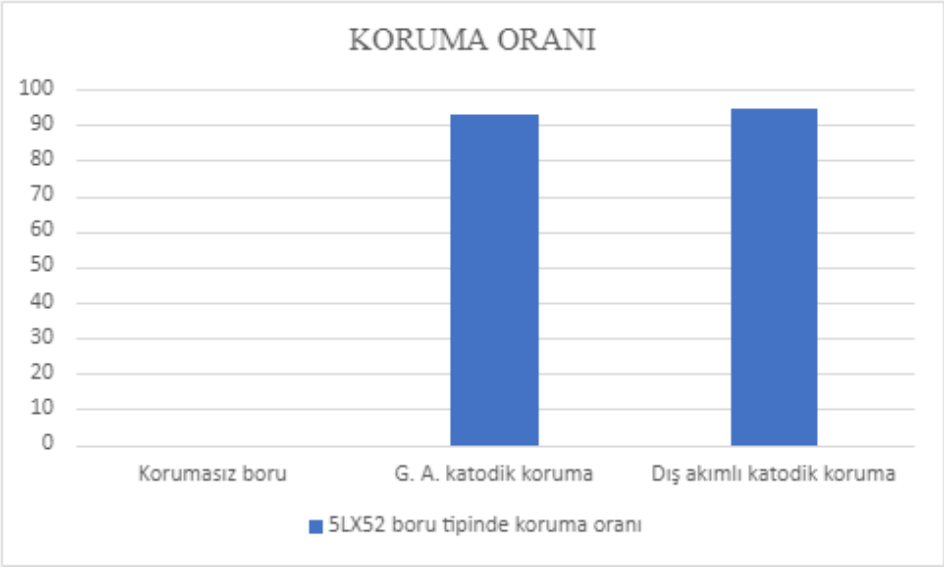
Deneysel çalışmada 5LX52 tip boru kullanıldı, korozyon oluşum oranı gösteren bir grafiktir, görüldüğü gibi en fazla korozyon oluşumu korumasız boru hattında ve katodik korumanın iki koruma metodu ile korozyona karşı dirençli olduğunu görülmektedir**.** Şekil 8'te 5LX52 petrol borusunda ölçülen korozyon oranı grafiği gösterilmiştir.



Şekil 8. 5lx52 Petrol Borusunda Korozyon Oranı

Korumasız ve Katodik Korumalı Türlerinin Korozyondan Koruma Oranı;

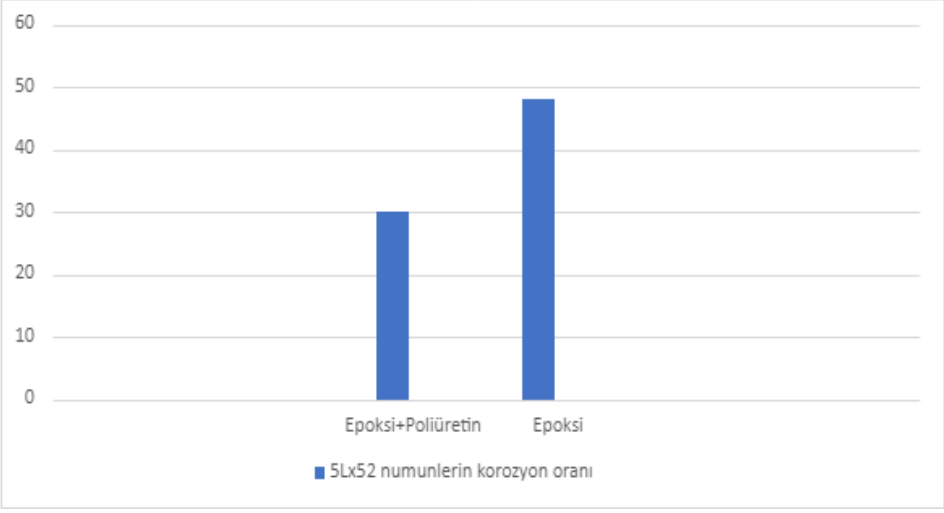
Deneysel çalışmada 5LX52 tip boru kullanıldı, koruma oranının gösteren bir grafiktir, korumasız boru tipinde koruma oranı sıfırdır. Katodik korumanın iki metodunda ise koruma oranı birbirlerine yaklaşık aynı değere sahiplerdir. Şekil 9'te 5LX52 petrol borusunda koruma oranı gösterilmiştir.



Şekil 9. 5lx52 Borusunda Koruma Oranı.

Epoksi ve Poliüreten Kaplama Türlerinin Korozyona Etkisinin İncelemesi:

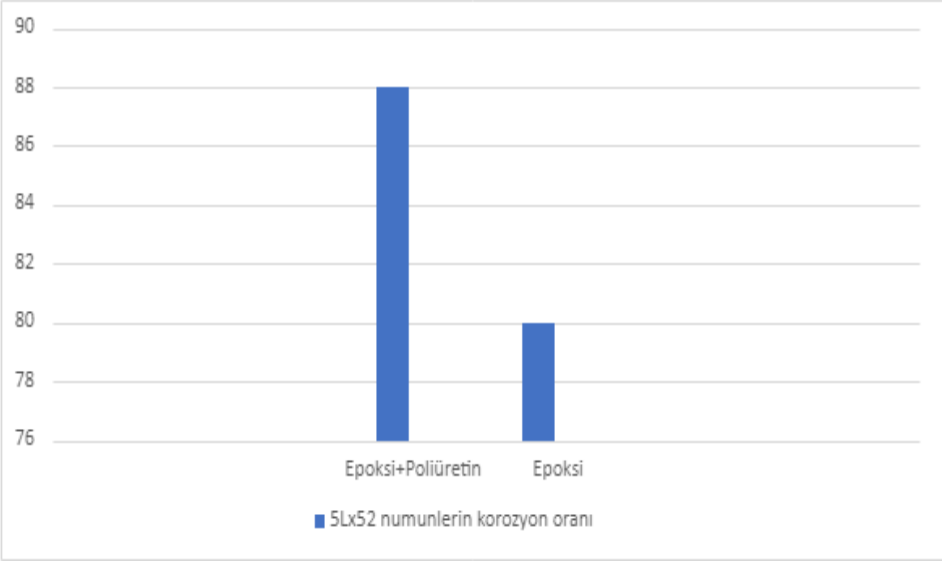
Çalışmada kullanılan Epoksi+Poliüretan ve Epoksi kaplaması yapıldı. Yapılan deneysel uygulamada korozyon oranı Epoksi kaplanan boruda daha yüksek çıktığı görüldü. Deneysel çalışmada kullanılan 5LX52 Numune boru malzemesinin korozyon oranı grafiği Şekil 10'de gösterilmiştir.



Şekil 10. 5LX52 Numune Malzemenin Korozyon Oranı

Epoksi ve Poliüreten Kaplama Türlerinin Korozyondan Koruma Oranı:

Çalışmada kullanılan Epoksi+Poliüretan ve Epoksi kaplaması yapıldı. Yapılan deneysel uygulamada koruma oranı Epoksi+Poliüretan kaplanan boruda daha yüksek çıktığı görüldü. Deneysel çalışmada kullanılan 5LX52 Numune boru malzemesinin korozyon oranı grafiği Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 11. 5LX52 Numune Malzemenin Koruma Oranı

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Korozyon, endüstrinin gelişimini ve ilerlemesini etkileyen olaylardan biridir. Korozyon birçok endüstriyel süreci bozduğundan, üretici korozyona maruz kalan ekipmanlarını ve mekanizmalarını korumak için üretim süreçlerini durdurmak zorunda kalır. Korumasız numunelerin korozyon karşı daha az direnç gösterdiğini, beklenen bir sonuçtur. Korumanın türü ve toprak türünden bağımsız olarak korumalı tipler korozyon oranları ile korumasız numuneler arasındaki büyük farkla ortaya çıkmıştır. Dış akım kaynakla katodik koruma, Galvanik anotlu katodik koruma ile korunan çelik numuneler ve bu çalışmada kullanılan korumasız numunelere göre en iyi korozyon direncini vermişlerdir. Koruma oranı yüzdesi olarak, dış akım kaynaklı katodik koruma çelik numunelerin koruma oranıyla en yüksek koruma değerine sahiptir. 5LX52 tip boruda korozyon oluşum görüldüğü gibi Epoksi + Poliüreten kaplaması korozyon oranı daha düşük olduğu görülmüştür. Epoksi kaplaması korozyon oranı yüksektir. Koruma oranı iki kaplama için görüldüğü gibi Epoksi kaplaması koruma oranı diğer kaplama türüne göre daha düşüktür.

KAYNAKÇA

Ambat,R., and Dwarakadasa, E.S., (1993), "Effects of Chloride ion Concentration during Corrosion of Medium Strength Aluminum Alloys 8090,2091,and 2014",British Corrosion Journal 28 142-148,Doi:10.1179/bcj.1993.28.2.142.

Öner A., Yalçinkaya S.,"Çelik yüzeylerine lazer kaplama (LC) Yöntemi ile Süper Alaşimlar Kaplanmasi ve Aşınma/ Korozyon Dirençlerinin İncelenmesi", 4th International Congress on Engineering and Technology Management, Istanbul, Türkiye, 13 - 14 kasım 2020, cilt.4, ss.110-120

Amir Samimi, Soroush Zarinabadi., (2011), "An Analysis of Polyethylene Coating Corrosion in Oil and Gas Pipelines", Chemical Engineering Journal Journal of American Science,7(1):1032-1036.

Amir Samimi, Soroush Zarinabadi., (2012), "Application Polyurethane as Coating in Oil and Gas Pipelines", International Journal of Science and Engineering Investigations, Volume:1, Issue:8.

D.H. Mesa, A. Toro, A. Sinatora, A.P., (2003), " The effect of testing temperature on corrosion–erosion resistance of martensitic stainless steels", Science direct Wear 255 139–145,Doi:10.1016/S0043-1648(03)00096-6 Denny A. Jones.,(1996), Principles and Prevention of Corrosion, Department of Chemical and Metallurgical Engineering , University of Nevada, Reno.

Fontana, M.G., (1986), Corrosion Engineering. 3rd Edition, McGraw-Hill, New York.

Gülensoy, B.A., (2006). Doğalgaz Boru Hatlarında Uygulanan Korozyon Tedbirleri ve Kayseri Doğalgaz Hatlarındaki Uygulamaların İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi,Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

Ismaeıl, K., Yalçınkaya, S., (2020) "Petrol Boru Hattı 5lx52 Malzeme Yüzeyine Katodik Korumanın Korozyon Etkilerinin İncelenmesi" 4.Uluslararası Mühendislik Ve Teknoloji Yönetimi Kongresi (13-14 Kasım 2020)

İller Bankası Genel Müdürlüğü İçme suyu ve Kanalizasyon Daireleri Başkanlıkları, (2005), "İçme suyu ve Kanalizasyon Tesislerinde Motopomp, Hava Kazanı, Hidrofor, Türbin Seçim ve Hesapları, Motopomp, Katodik Koruma, Klorlama Montaj, İşletme ve Bakım Seminer Notları", Ankara, 305-388.

J. H. Fitzgerald.,(2011), “Engineering of Cathodic Protection Systems’’, Uhlig's corrosion handbook, Wiley Online Library, Doi:10.1002/9780470872864.ch69.

James, B. Bushman ,P.E., (2010), “Corrosion And Cathodic Protection Theory”, Principal Corrosion Engineer Bushman & Associates, Inc Medina, Ohio, USA.

Jie Kou*, Xince Zhang, Gan Cui and Xueming Yin., (2016), “Research Progress on the Cathodic Protection Current and Potential Distribution of the Tank Bottom Plate”, Corrosion Reviews, Volume 34: Issue 5-6. DOI: 10.1515/corrrev-2016-002.

M Roche, D Melot, G Paugam., (2006), “Recent Experience with Pipeline Coating Failures”.

Mark. E. Orazem., (2014), “Underground Pipeline Corrosion Detection”, Analysis and Prevention.

Mark. E. Orazem., (2014), “Underground Pipeline Corrosion Detection”, Analysis and Prevention ”.

P.R. Roberge., “ Handbook of Corrosion Engineering”., (2005), first edition, McGraw-Hill, New York.

Perez, N., (2004), “ Electrochemistry and Corrosion Science, Kluwer Academic Publishers, Boston, USA.

Rana, M. Hussein., (2012), “ Cathodic Protection Of Stroge Tank”, Thesis, University of Technology, Chemical Engineering Department,Iraq.

S. Guan, P. Mayes, A. Andrenacci & D. Wong, Bredero Shaw & ShawCor., (2007), “Advanced Two Layer Polyethylene Coating Technology For Pipeline Protection”.

Talbot, D. Talbot, J., (1998), “ Corrosion Science and Technology”, CRC Press LLC, USA.

Uhlig, H. H, Revie, R. W., (2008), Corrosion and Corrosion Control, A John Wiley and Sons, Inc., Publıcatıon, USA.

Winston Revie, R. and Erbert., (2008), U.H.H., “Corrosion and Corrosion Control an Introduction”, Corrosion Science and Engineering, 4th Edition, Publishing John Wiley&Sons, Canada.

Yalçın, H., Koç, T., (1999), Katodik Koruma, Palme Yayınları, Ankara.

Yalçınkaya, S., Ismaeil, K., (2020) "5Lx52 Petrol Boru Hattında Malzeme Yüzeyinin Kaplama Yöntemiyle Korozyon Etkilerini İncelenmesi" 4.Uluslararası Mühendislik Ve Teknoloji Yönetimi Kongresi (13-14 Kasım 2020)

İNTERNET KAYNAKÇASI

URL-1 https://www.api.org/products-and-services/standards/important-standards-announcements/standard-5l E.T 11/20/2020

URL-2 http://www.esenmetal.net/urunler.htm E.T 11/18/2020

BÖLÜM 11
SICAK PRESLEME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ B_4C PARÇACIK TAKVİYELİ MAGNEZYUM MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMENİN RADYOAKTİF ÖZELLİKLERİNİN TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

Doç. Dr. Uğur GÖKMEN[1], Özlem YILMAZ[2], Prof. Dr. Sema BİLGE OCAK[3]
[1-2-3]Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler, Ankara / Türkiye

Öz: Radyasyondan korunmak için gerekli malzeme seçimi radyasyonun malzeme ile etkileşmesinin incelenmesi açısından oldukça önemlidir. Buna göre, farklı amaçlarla kullanılabilecek malzemelerin ve alaşımların araştırılması, geliştirilmesi nükleer teknolojide radyasyonun olumsuz etkilerinden korunmak için önemlidir.

Magnezyum ve magnezyun alaşımları son günlerde hafif yapılar içinde önemli birer malzeme olarak kabul görmektedir. Magnezyum matrisli kompozitler (Mg-MMK) yüksek dayanım, düşük yoğunluk özellikleri ile otomotiv ve havacılık uygulamalarında kullanılır. Aynı zamanda, bu malzemelerin mekanik özellikleri ticari saflıktaki magnezyum ve magnezyum alaşımlarından daha yüksektir. Magnezyumun düşük elastisite modülü ve artan sıcaklıkla azalan dayanım özelliğini iyileştirmek için, Al_2O_3, B_4C, TiC ya da SiC gibi farklı partiküllerin takviyesi kullanılır. Gama radyasyonu zırhlanmasında kullanımı düşünülen toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş B_4C seramik malzeme katkılı AZ91 metal matrisli kompozit malzemelerin ^{137}Cs (662 keV), ^{60}Co (1173 keV, 1332 keV ve bu değerlerin ortalaması olan 1250 KeV) gama ışınları karşısında teorik olarak tepkisi incelendi. %0, %10, %15, %20 B_4C katkılı AZ91 metal matrisli kompozit malzemenin XCOM bilgisayar programı yardımıyla yarım değer kalınlık (HVL) değerleri, onda bir kalınlık değerleri (TVL), kütle ve lineer soğurma katsayıları radyasyon zırhlaması etkinliğini değerlendirmek için hesaplandı.

GİRİŞ ve KURAMSAL ÇERÇEVE

Kompozit malzeme (veya sadece kompozit), iki veya daha fazla malzemenin karışımı olup üstün özelliklere sahip olan malzemedir. Birbiri içerisinde çözünemeyen ve tek başına uygun olmayan malzemeleri kullanım alanlarına göre uygun hale getirmek için kompozit üretimi yapılarak malzemeye yeni özellikler katılır. Bu malzemeler, özellikle savunma, havacılık, otomotiv ve sağlık gibi büyük endüstrilerde kullanılır. Aynı zamanda, tek bir malzeme istenen herhangi bir uygulamada istenen özelliklerin hepsini taşımadığı için kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Matris malzemeleri (seramik esaslı malzemeler, polimerler, metal alaşımlı malzemeler ve metaller) ve takviye malzemeleri (naylon , karbür, çelik, aramid, vb.) olmak üzere iki fazdan oluşur.

Kompozit Malzemeler

- Seramik Matrisli (Alümina, Silika, Baryum Alümina Silikat)
- Metal Matrisli (Aliminyum, Titanyum, Magnezyum)
- Plastik Matrisli (Epoksi, Polietilen, Polipropilen)

olarak sınıflandırılmaktadır.

Magnezyum ve magnezyun alaşımları son günlerde hafif yapılar içinde önemli birer malzeme olarak görülmektedir. Magnezyum en önemli özellikleri; 1,7 g/cm^3 düşük yoğunluğa, alüminyumla aynı dayanım değerine, ağırlık olarak demirden %78 ve alüminyumdan %36 daha hafif olması olarak gösterilebilir. Mg-MMK malzemeler düşük yoğunluk ve yüksek dayanım özellikleri ile otomotiv ve havacılık uygulamalarında kullanılır. (Atalay, 2006). Aynı zamanda, bu malzemelerin mekanik özellikleri ticari saflıktaki magnezyum ve magnezyum alaşımlarından daha yüksektir. Magnezyumun düşük elastisite modülü ve artan sıcaklıkla azalan dayanım özelliğini iyileştirmek için, Al_2O_3, B_4C, TiC ya da SiC gibi farklı partiküllerin takviyesi kullanılır. (Demir, 2006)

MMK'ler içerisine ilave edilen güçlü seramik takviyeler ile iyi aşınma direnci, yüksek sertlik, özel dayanım ve mükemmel korozyon direnci sergileyen yeni nesil mühendislik malzemeleri oluşturulmaktadır. (Kok, 2005). Metal matrisli kompozitlerde (MMK) SiC, Al_2O_3, B_4C, TiC ve Si_3N_4 gibi malzemeler takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır (Shorowordi, Laoui, Haseeb, Celis, Froyen 2003, Rajan, Pillai, Pai, 1998, Kerti, 2005). Metal malzemelerin tokluk ile

süneklik, seramik malzemelerin iyi mukavemet ve yüksek elastik modül gibi özelliklerinin bir araya getirilmeleri sonucunda metal matrisli kompozitler oluşturulur. (Özdin, 2006, Toptan, 2011).

B_4C sahip olduğu yüksek sertlik, üstün fiziksel özellikleri, yüksek kimyasal direnç, darbe direnci, aşınma direnci ve ergime sıcaklığı ile üstün mekanik özellikleri sayesinde metal matrisli kompozitler için tercih edilen bir takviye malzemesidir. (Zhang, Ramesh, Chin, 2004, Aizenshtein, Shapiro-Tsoref, Dariel, Frage, 2005, Jung, Kang, 2004, Zhu, Dong, Lu, 2008, Shrestha, Saji, 2005, Khan, Kutty, Surappa, 2006).

Al_2O_3 veya SiC gibi benzerlerine göre daha yüksek maliyetli olmaları sebebiyle B_4C tozlarının metal matrisli kompozitlerde kullanımı üzerine daha az araştırma yapılmaktadır.

RADYASYON

Çok uzun ömürlü radyoaktif elementler dünyanın oluşumuyla birlikte çevrede doğal bir radyasyon düzeyi oluşturmaktadır. Dünyadaki tüm canlılar kozmik ışınlar, radyoaktif maddeler ve dünyamızda var olan radyasyonla iç içe yaşamaktadır. Doğal radyasyon olarak kabul edilen bu radyasyonun kaynağı radyoaktif seri olan U-235, Th-232, U-238, ve Rb-87, K-40, In-115, Cd-113, Nd-144, La-138, Gd-152, Sm-147, Hf-174, Lu176, Pt-190, Re-187 doğal radyonüklitler ve yüksek enerjili proton, alfa, müon, elektron, pozitron, fotonlarla vb. kozmojenik radyonüklitlerdir. Radyasyon belirli dozlarda normal kabul edilse de nükleer deneyler, radyoizotopların endüstri ve tıptaki uygulamalarından açığa çıkan radyonüklitler gibi yapay radyasyon varlığı sebebiyle insanoğlunun maruz kaldığı radyasyon seviyesi artmaktadır. Bu gelişmelerin sonucu olarak; radyoaktivite ölçümleri, uygulamaları ve radyoaktiviteden korunma çalışmaları bilimde önemli bir yer almaktadır. (Glenn, 2010).

Radyasyondan korunmak için gerekli malzeme seçimi radyasyonun malzeme ile etkileşmesinin incelenmesi açısından oldukça önemlidir. Buna göre, farklı amaçlarla kullanılabilecek malzemelerin ve alaşımların araştırılması, geliştirilmesi nükleer teknolojide radyasyonun olumsuz etkilerinden korunmak için önemlidir. (Shultis, 2000).

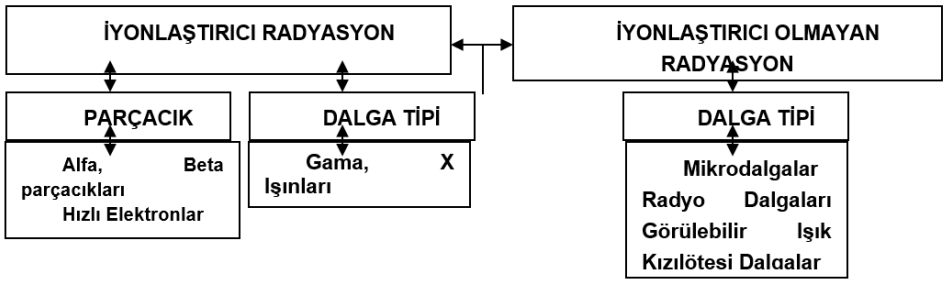
Radyasyonun neden olabileceği zararlı etkilerden insan ve çevrenin korunması radyasyon güvenliğinin temel amaçları arasındadır. Bu nedenle kompozit malzemelerin, radyasyon güvenliğini sağlamak amacıyla diğer endüstrilerde olduğu gibi nükleer teknolojilerde de, geniş kullanım alanı bulmaktadır. (Aybers, Bayülken, 1992).

Malzemelerin radyasyon ile etkileşmesini anlayabilmek için; elektronlar, protonlar, nötronlar, X- ışınları, Gama ışınları ve yüksek enerjili iyonlar kullanılır. Dolayısıyla radyasyonun malzeme ile etkileşiminin anlayabilmek için radyasyon türleri ve yapıları hakkında bilgi edinilmesi önemlidir.

Doğal radyoizotoplar radyasyonun önemli bir kaynağıdır. Ağır elementler, kararlı duruma gelebilmek için gama, beta, alfa olmak üzere, üç tip enerji salınımı yaparlar. Bu şekilde enerji yayan elementlere "radyoaktif elementler" denir. (Knoll, 2002).

Radyasyonun üç temel parametresi bulunmaktadır. Bunlar:

- Kaynak: Doğal Radyasyon- Yapay Radyasyon
- Çeşit: Parçacık Radyasyonu- Elektromanyetik Radyasyon
- Enerji: Düşük Enerjili- Yüksek Enerjili



Şekil 1. Radyasyon Türleri Gösterimi

Radyasyonu, farklı şekilde gruplandırmanın yanı sıra iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak da gruplandırılabilir. İyonlaşma terimi radyasyonun, geçtiği maddenin bir atomunu veya molekülünü iyonize edebilme kabiliyetini ifade eder. İyonlaştırıcı radyasyon tüm canlı ve cansız varlıklarda meydana gelebilir. Tüm canlılar için zararlı olabilecek radyasyon tipidir. İyonlaştırıcı radyasyon olarak beta (β), alfa (α),ve nötron parçacık türü radyasyonlar ile gama ışınları, x-ışınları ve yüksek enerjili morötesi ışınlar elektromanyetik dalga türündeki radyasyonlar iyonize özelliğine sahiptirler. İyonize olmayan radyasyonlar ise

etkileştiği madde içindeki atomlardan elektron koparamazlar. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon türüne mor ötesi ışınlar, mikro dalgalar ve radyo frekansı (RF), görünür ışık ve kızılötesi (IR) ışınlar şekil 1 de gösterildiği gibi iyonlaştırıcı olmayan radyasyon türüne girer. Dalga tipi iyonlaştırıcı olmayan radyasyon, dalga boyu 10 nm veya daha büyük olan elektromanyetik radyasyondur. Bunlar radyo dalgaları, mikro dalgalar ve görülebilir ışık (λ=770- 390 nm) ve ultraviyole ışık (λ=390-10 nm) dır. İyonize radyasyon elektromanyetik spektrumun geri kalanını içerir (X-ışını, λ=0.01-10 nm) ve daha kısa dalga boyuna sahip olan γ-radyasyondur (Tsoulfanidis,1995)

Alfa Parçacıkları

Yüksek enerjili Helyum ($_2He^4$) çekirdeği Alfa parçacığı olarak adlandırılmaktadır. 2 proton ve 2 nötrona sahiptir. Alfa parçacığı en düşük giriciliğe sahiptir. İnce kağıt parçası ile bile alfa parçacığı durdurulabilir.

Çizelge 1. Alfa Radyoizotopların Bazıları (Knoll,2002)

Kaynak	Yarı Ömür	Kinetik Enerji(MeV)	Yüzdesi
^{148}Gd	93 y	3.182787	100
^{232}Th	$1.4x10^{10}y$	4.012	77
^{238}U	$4.5x10^{9}y$	4.196	77
^{235}U	$7.1x10^{8}y$	4.598	56
^{236}U	$2.4x10^{7}y$	4.494	74
^{230}Th	$7.7x10^{4}y$	4.6875	76.3
^{234}U	$2.5x10^{5}y$	4.7739	72
^{243}Am	$7.4x10^{3}y$	5.2754	87.4

Beta Parçacıkları

Beta parçacıkları, alfa parçacıkları gibi atom çekirdeğinin parçalanmasıyla oluşur. Elektron veya pozitron atom çekirdeğinden koparak bir nötron protona veya bir proton nötrona dönüşür.

Beta parçacıkları Alfa parçacıklarının yaklaşık 2 katı daha fazla yüke ve çok küçük kütleye sahiptirler. Bu da alfa parçacıklarından daha büyük nüfuz etme gücüne sahip olduklarını göstermektedir.

Çizelge 2. Beta Radyoizotop Kaynaklar (Knoll,2002)

Kaynak	Yarı Ömür	Kinetik Enerji (MeV)
^{3}H	12.26 y	0.0186
^{14}C	5730 y	0.156
^{32}P	14.28 g	1.710
^{33}P	24.4 g	0.248
^{35}S	87.9 g	0.167
^{36}Cl	$3.08x10^{5}$ y	0.714
^{45}Ca	165 g	0.252
^{63}Ni	92 y	0.067
^{99}Tc	$2.12x10^{5}$ y	0.292
^{147}Pm	2.62 y	0.224
^{204}Tl	3.81 y	0.766

Gama Işınları

Gama ışınları, zırhlama malzemesinden geçerken üstel olarak azalan, yüksek giriciliğe sahip olan ışınlardır. Böylece malzemenin kalınlığı nasıl olursa olsun gama ışınları tamamıyla soğurulmaz. (Knoll, 2002). Uygun kalınlık değeri seçilerek alınan doz makul seviyeye indirgenebilir.

Çizelge 3. Gama Aktif Radyoizotoplar (Knoll, 2002)

Kaynak	Yarı Ömür	Kinetik Enerji
^{60}Co	5.26 y	1.17, 1.33 MeV
^{137}Cs	30 y	0.66 MeV
^{192}Ir	74 g	0.3, 0.6 MeV
^{124}Sb	60 g	0.6, 2.1 MeV
^{22}Na	2.6 y	1274.5 KeV
^{24}Na	15.0 s	1368.5, 2754 KeV
^{46}Sc	83.7 g	889.2, 1120.5 KeV

Nötronlar

Nötronlar, elektrik yükleri olmayan ve kütlesi protona eşit olan parçacıklardır. Nükleer reaksiyonlar sonucu meydana gelirler. Güneşte meydana gelen nükleer patlamalar sonucu uzaya yayılır ve dünyaya ulaşabilirler. Işımanın sonucu olarak oluşan parçacıkların giriciliği çok fazladır. Bazı ikili sistemler kullanılarak nötron kaynakları oluşturulabilir. Çizelge 4'te bu ikili sistemlerin bazıları gösterilmektedir.

Çizelge 4. Bazı Nötron Yayımı Yapan İkili Sistemler (Knoll,2002)

Kaynak	Yarı Ömür	Kinetik Enerji (MeV)	10^6 α için Nötron Kazancı		% de Kazanç E_n < 1.5MeV	
			Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel
^{239}Pu/Be	24000 y	5.14	65	57	11	9-33
^{210}Po/Be	138 g	5.30	73	69	13	12
^{238}Pu/Be	87.4 y	5.48	79	-	-	-
^{241}Am/Be	433 y	5.48	82	70	14	15-23
^{244}Cm/Be	18 y	5.79	100	-	18	29
^{242}Cm/Be	162 g	6.10	118	106	22	26
^{226}Ra/Be	1602 y	Çoklu	502	-	26	33-38
^{227}Ac/Be	21.6 y	Çoklu	702	-	28	38

Radyasyon Madde ile Etkileşimi

Bir malzeme ile etkileşen radyasyon, malzeme ile etkileşimine bağlı olarak enerjisinde değişikliğe uğramaktadır. Ayrıca malzemede de değişikliğe sebep olmakta ve kendi enerjisinin bir kısmını ve ya tümünü kaybetmektir. Diğer bir ifadeyle radyasyonun zırhlanması, şiddetinin ölçülmesi, algılanması ile radyasyon güvenliği madde ile etkileşimine bağlıdır. Bu etkileşim ise malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Farklı radyasyon tipleri ve farklı malzemeler için radyasyonun zırh özelliği de değişmektedir.

Bir başka deyişle farklı radyasyon türleri için farklı zırhlama malzemeleri kullanılmaktadır. Malzeme ile etkileşim mekanizması, parçacığın enerjisine ve çeşidine bağlı olmakla beraber parçacığın girdiği ortamın yoğunluğuna ve atomun proton sayısına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu sebeple, yüksüz parçacıkların ve yüklü parçacıkların madde ile etkileşiminin farklı farklı düşünülmesi gerekir. (Knoll, 2002).

Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimi

Yüklü parçacıklar soğurucu bir ortam veya herhangi bir madde içerisine girdiklerinde enerjilerini kaybederek gidiş doğrultularından saparlar. Yüklü parçacıkların madde ile etkileşmesi ağır (proton, muon, alfa, pion, ve diğer ağır çekirdekler) ve hafif yüklü parçacıklar (e, e^+) olarak 2 gruba ayrılmaktadır.

Yüksüz Parçacıkların Madde ile Etkileşimi

X ışınları, gama ışınları ve frenleme radyasyonları elektromanyetik radyasyon olarak tanımlanır. Fotonlar, elektriksel yükleri olmadığı için Coulomb kuvvetine maruz kalmazlar. Madde içerisindeki davranışları yüklü parçacıklarınkinden farklıdır. Atomun elektronları ile etkileşmeleri sonucunda enerjisinin büyük bir kısmını veya tamamını tek bir olayda kaybedebilir. Yüklü parçacıklar gibi menzilleri yoktur. (L'Annunziata, 2003). Aynı zamanda elektromanyetik kuvvet taşıyıcıları olup, madde ile iyonlaşmayla ve ortama enerji depolamayla etkileşme yaparlar. (Knoll, 2002).

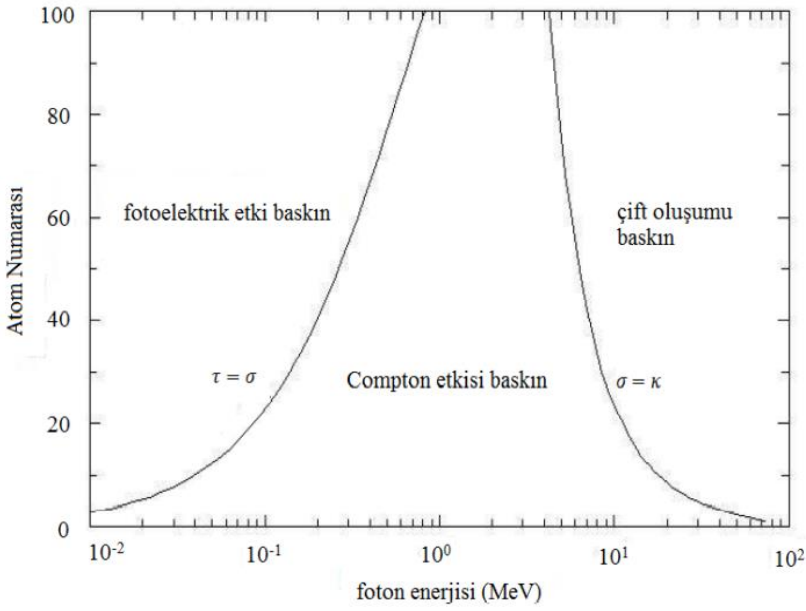
Gama ve X ışınları maddeyle 3 farklı biçimde etkileşme yaparlar.

- Fotoelektrik olay
- Compton saçılması
- Çift oluşumu

Fotonlar Bragg saçılması, Rayleigh saçılması, nükleer rezonans saçılması ve fotobozunum yapabilirler. Etkileşmeler sonucunda azalma ve enerji depolanması küçüktür ve ihmal edilir. (Martin, 2006).

Foton Soğurma Katsayıları

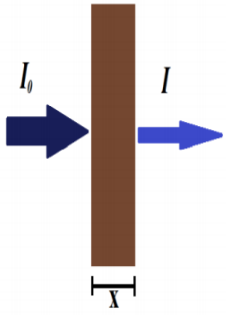
Fotonlar, etkileştiği malzemenin atom numarasına ve sahip olduğu enerjiye bağlı olarak, Compton saçılması, çift oluşumu ve fotoelektrik olay oluştururlar. Şekil 2 de malzemenin atom numarasının foton enerjisine bağlı olarak üç etkileşme bölgesi tanımlanmıştır. Çift oluşumu olasılığı, yüksek enerjilerde yüksek atom numaraları için, fotoelektrik etki olasılığı ise düşük enerjilerde yüksek atom numaraları için arttığı görülmektedir. Gama radyasyonu, düşük atom numaralı malzemelerde her enerji değerinde Compton saçılmasıyla enerjilerini kaybedebilirler. Bütün atom numaraları için E=1 MeV civarında Compton saçılması olma ihtimali yüksektir (Turner, 2007).



Şekil 2. Atom Numarasının Foton Enerjisine Bağlı Üç Etkileşmenin Baskın Olduğu Aralıklar (Doğan,2015)

Çizelge 5. Gama Etkileşimlerinin E ve Z Bağımlılığı (Wood,1987)

Etkileşme Türü	Z- Bağımlılığı	E-Bağımlılığı
Fotoelektrik	$Z^{4.5}$	1/E için E > 0.5 MeV $1/E^3$ için E < 0.5MeV
Compton	Z	1/E
Çift Oluşumu	Z^2 veya Z	4 MeV < E < 10Mev



Şekil 3. Radyasyon Şiddetinin Malzeme Tarafından Soğurulması

Şekil 3'te, görüldüğü gibi malzemeye gelen fotonların şiddeti, malzemede soğurma ve saçılma olayları sonucu şiddeti azalarak malzemeden çıkar.

Lineer soğurma katsayısı (μ), atomların toplam gama etkileşme olasılıklarının toplamıdır (Hubble, 1982). Birimi cm^{-1} 'dir. μ birim uzunluk başına etkileşme olasılığını gösterir. Bir foton demeti x kalınlığındaki bir soğurucu maddeden geçerken foton şiddetindeki değişim denklem 1 gösterilir. (Martin, 2006).

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

Denklemde *I*, I_0, μ ve x sırasıyla malzemeden çıktıktan sonraki radyasyon şiddetini, malzemeye gelen radyasyon şiddetini, toplam soğurma katsayısını ve malzeme kalınlığını gösterir.

μ katsayısı fotolektrik (τ), Compton (σ) ve çift oluşum (κ) katsayıları şeklinde denklem 2 ile gösterilir.

$$\mu=\tau+\sigma+\kappa \quad (2)$$

Denklem 1 teorik olarak, bir foton demetinin tam soğurulmasının asla gerçekleşmeyeceğini gösterir. ile bulunur ve. Kütlesel soğurma katsayısı (μ_m) denklem 3 ile hesaplanabilir. Birimi cm^2 /g dır.

$$\mu_m = \mu / \rho \quad (3)$$

Denklemde;

μ_m: Kütle soğurma katsayısını

ρ: Malzeme yoğunluğunu

ifade eder.

Eğer bir malzeme farklı elementlerden oluşuyorsa, μ katsayısı, malzemeyi oluşturan elementlerin soğurma katsayılarının toplamıdır. Denklem 4 bir karışım için kütle soğurma katsayısını göstermektedir.

$$\mu / \rho = \sum_i \omega \cdot (\mu / \rho)_i \quad (4)$$

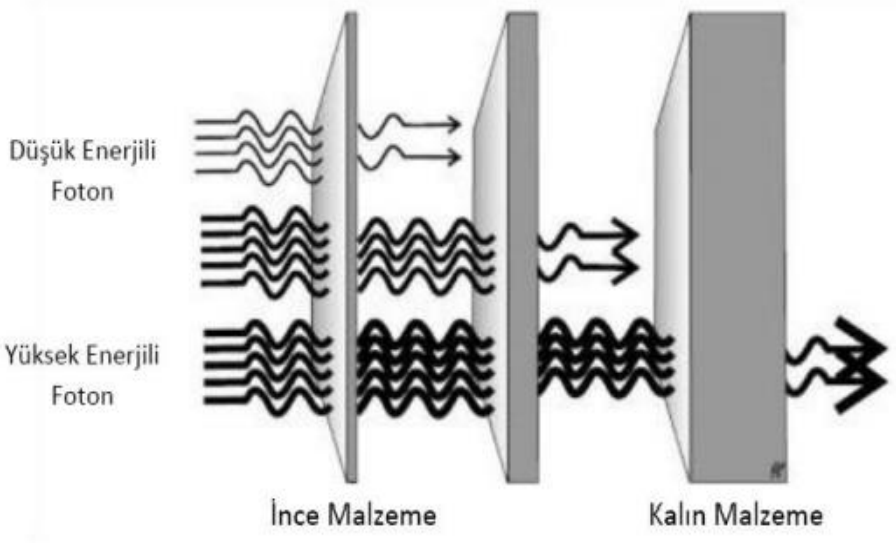
Yarı Değer Ve On Kat Değer Kalınlıkları

Gama radyasyonun ilk değerinin, yarıya düştüğü kalınlığa yarı değer kalınlığı (HVL), gama radyasyonun ilk değerinin, onda birine düştüğü kalınlığı da on kat değer kalınlığı (TVL) denilir. HVL ve TVL malzemelerin radyasyon zırhlaması için kullanılan en önemli bir parametreleridir.

$$HVL = \ln 2/\mu \quad (5)$$

$$TVL = \ln 10/\mu = 2.3026/\mu \quad (6)$$

Fotonlar herhangi bir kalınlıktaki malzemeyi geçerken şiddetinde azalma gözlenir. Şekil 4'te fotonların maddeye nüfuz etme mekanizması görülmektedir.



Şekil 4. Fotonların Soğurucu Malzeme İçinden Geçişi (Powsner ve Powsner,2006)

Lineer soğurma katsayısı malzemenin farklı fazlarındaki yoğunluğunun farklı olması sebebiyle malzemeye özgü bir değer olmamaktadır. Böylece malzemelerin lineer soğurma katsayılarına göre karşılaştırması yapılamaz. Ancak kütle soğurma katsayısı, lineer soğurma katsayısının malzeme yoğunluğuna oranı olması nedeniyle malzemeler arasında karşılaştırmaya imkan vermektedir. (Knoll, 2002).

XCOM Bilgisayar Programı

XCOM programı karışım, element ve bileşiklerin 1KeV ile 100GeV enerji aralıklarındaki radyasyon yayılımı karşısındaki Compton saçılması, fotoelektrik olay, çift oluşumu etki kesitlerinin hesaplanarak malzemelerin soğurma katsayısının teorik olarak bulunmasını sağlayan bilgisayar programıdır. Kullanılan malzemelerin yüzdece bileşen değerleri ve cinsleri programa kullanıcı tarafından girilerek programca değerlendirilmekte böylece verilen enerji aralıklarında kütle soğurma katsayıları teorik olarak hesaplanmaktadır. (Berger, Hubbell, Seltzer ,Chang, Coursey, Sukumar., Zucker, Olsen, 2013).

METARYAL METOT

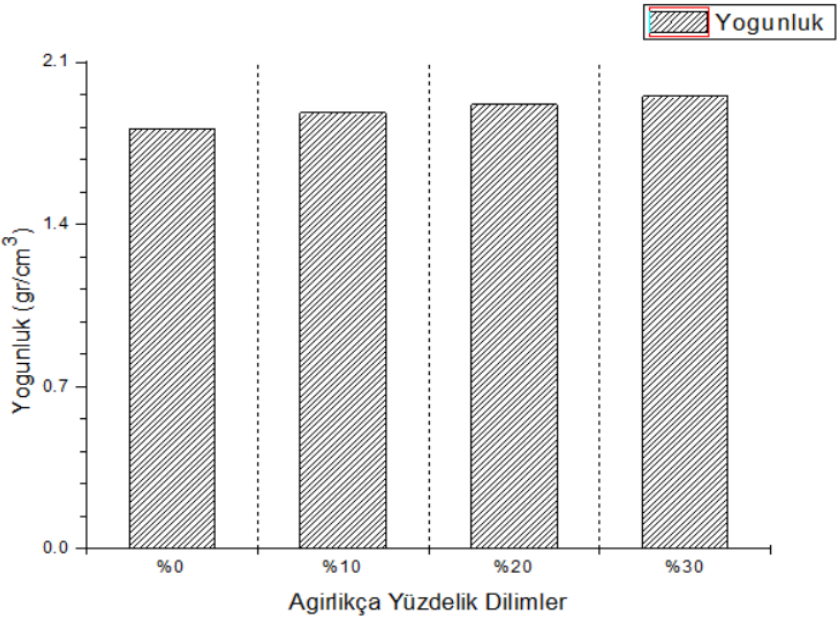
Bu çalışmada Toz metalurjisi ve sıcak presleme yöntemi kullanırak üretilecek olan AZ91 matrisli B_4C(ağırlıkça %10, %15, %20) parçacığı için 137Cs (662 keV), 60Co (1173 keV,1332 keV) gama enerjilerini kullanan Magnezyum matrisli kompozitler için XCOM bilgisayar programı ile lineer ve kütle zayıflama katsayıları teorik olarak hesaplanmıştır.

SONUÇLAR

Saf B_4C ve AZ91d malzemelerinin yoğunluk değerlerinden yola çıkılarak Çizelge 6'deki değerler hesaplanmış ve bu değerlere bağlı olarak ağırlıkça %10,%15,%20 B_4C içeren kompozit malzemelerin yoğunluk grafikleri çizilmiştir.

Çizelge 6. AZ91 ve B_4C Yoğunlukları

Malzeme	**Yoğunluk(gr/cm^3)**
AZ91d	1.81
Saf B_4C	2.52
%0 B_4C Katkılı AZ91	1.81
%10 B_4C Katkılı AZ91	1.881
%15 B_4C Katkılı AZ91	1.9165
%20 B_4C Katkılı AZ91	1.952

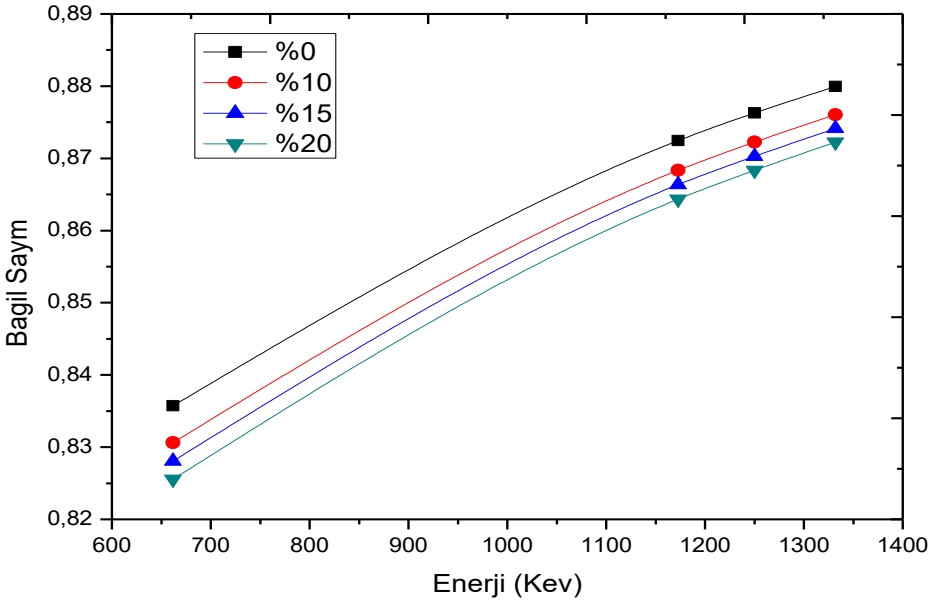


Şekil 5. B_4C Katkılı AZ91 'in B_4C Oranlarına Bağlı Yoğunlukları

Şekil 5 de kompozit malzememizde B_4C oranı arttıkça AZ91 kompozit malzememizin yoğunluğunun artığı görülmektedir. Toz metalurjisi yöntemi kullanılarak üretilen kompozit malzemelerde gözenekli yapılar oluştuğu bilinmektedir. XCOM programında malzeme ve ortam koşullarının mükemmel olduğu düşünülerek hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Bu sebeple deneysel olarak elde edilen yoğunluk sonuçlarının Çizelge 7 'dekinden daha düşük çıkacağı düşünülmektedir.

Çizelge 7. Enerjilere Bağlı Bağıl Sayımlar

Enerji	**Bağıl Sayım (I/I_0)**			
	%0 B_4C	**%10 B_4C**	**%15 B_4C**	**%20 B_4C**
662 Kev	0.83573	0.83061	0.82808	0.82556
1173 kev	0.87247	0.86836	0.86635	0.86434
1250 Kev	0.87627	0.87227	0.87029	0.86835
1332 Kev	0.87995	0.87606	0.87416	0.87225

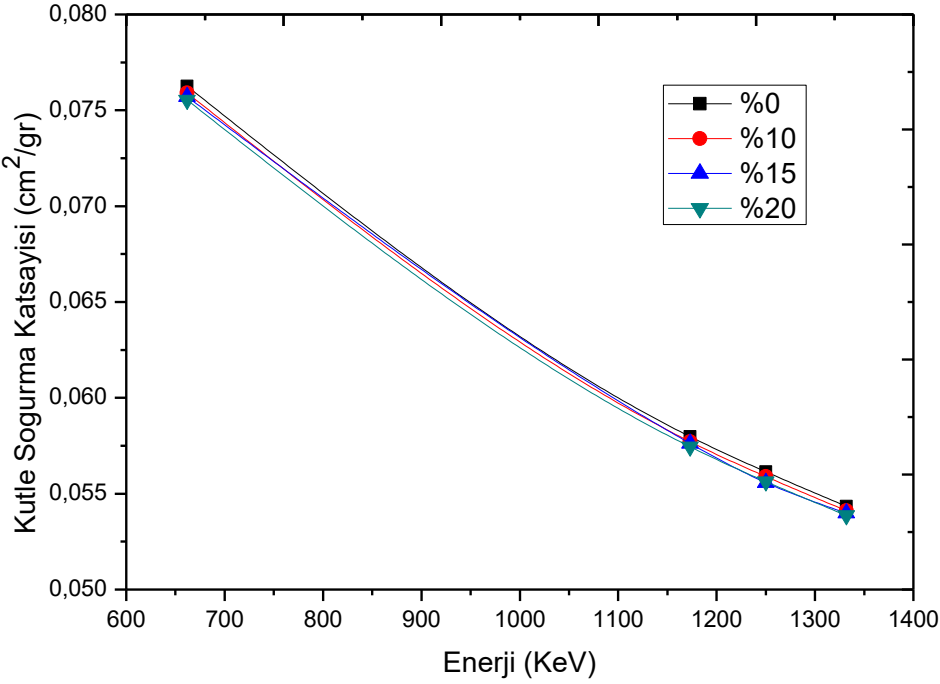


Şekil 6. Enerjilere Bağlı Bağıl Sayım Grafiği

Co-60 ve Cs-137 radyoizotop kaynakları gama radyasyonun için 2 önemli radyoizotop kaynaktır. Nükleer teknolojide önemli yer tutan bu 2 radyoizotop kaynağın enerji seviyeleri yüksek ve Co-60 için 2 pik değeri bulunmaktadır. Bu çalışmada da Cs-137(662Kev) ve Co-60 (1173Kev,1332 Kev) enerji seviyeleri kullanılmıştır. Ayrıca Co-60 kaynak için ortalama değer olan 1250 Kev enerji seviyesindeki etkileşimler hesaplanmıştır. Çizelge 8'de görüldüğü gibi XCOM programı kullanılarak teorik μ_m değerleri hesaplanmıştır. %0,%10,%15,%20 B_4C içeren kompozit malzemelerin Çizelge 8 yardımıyla enerjiye bağlı grafikleri çizilmiştir.

Çizelge 8. Enerjilere Bağlı Kütle Soğurma Katsayıları

Enerji	Kütle Soğurma Katsayısı (cm^2/gr)			
	%0 B_4C	**%10 B_4C**	**%15 B_4C**	**%20 B_4C**
662 Kev	0.07626	0.0759	0.07572	0.07554
1173 kev	0.05798	0.05772	0.05758	0.05745
1250 Kev	0.05614	0.05589	0.0576	0.05563
1332 Kev	0.05435	0.05411	0.05398	0.05386

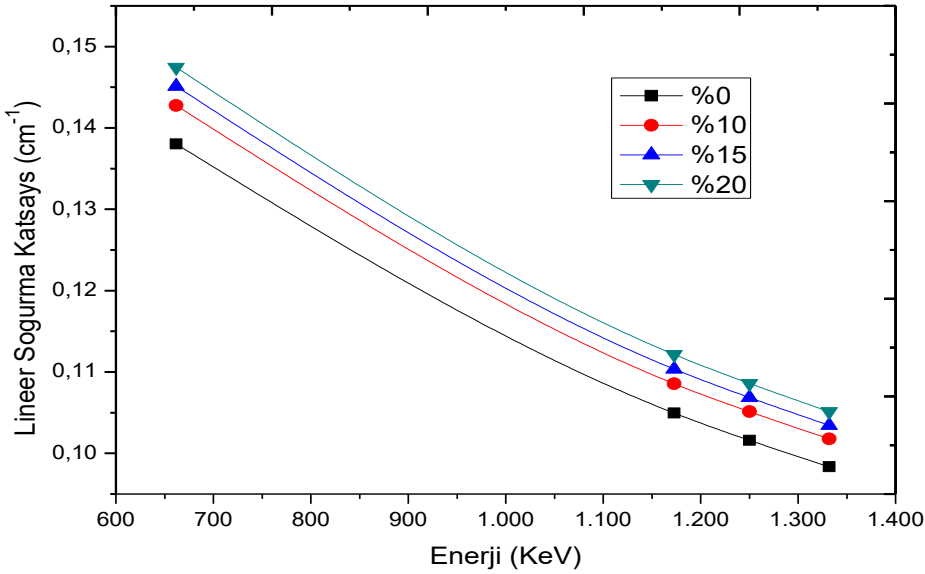


Şekil 7. Kütle Soğurma Katsayısını Enerjiye Bağlı Grafiği

Kompozit malzeme için lineer soğurma katsayısının enerji ile değişim çizelgesi Çizelge 9'da verilmiştir. Bu çizelgeye bağlı olarak Lineer soğurma katsayısının enerji ile değişim grafiği çizilmiştir.

Çizelge 9. Enerjilere Bağlı Lineer Soğurma Katsayıları

Enerji	Lineer Soğurma Katsayısı(μm) cm^{-1}			
	%0 B_4C	**%10 B_4C**	**%15 B_4C**	**%20 B_4C**
662 Kev	0.13803	0.14276	0.14511	0.14745
1173 kev	0.10494	0.10857	0.11035	0.11214
1250 Kev	0.1016	0.10512	0.10686	0.10858
1332 Kev	0.09837	0.10178	0.10345	0.10513



Şekil 8. Lineer Soğurma Katsayısının Enerjiye Bağlı Grafiği

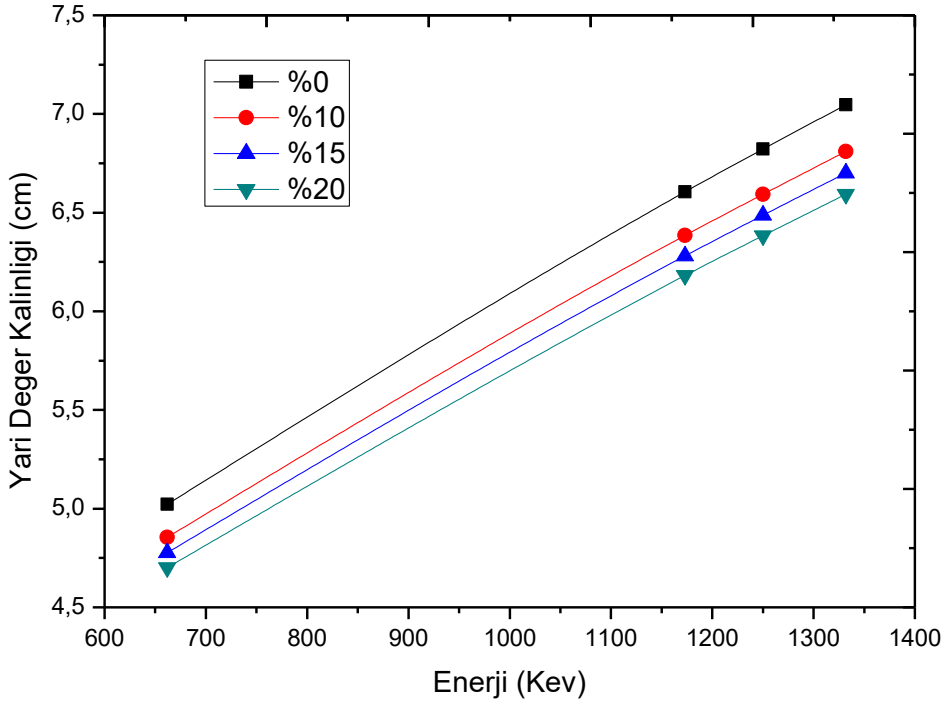
Gama radyasyonunda lineer soğurma katsayısının enerjiye bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Radyasyonun enerjisi ile orantılı olarak enerji arttıkça lineer soğurma katsayısının azaldığı gözlenmiştir. Bunun sebebi Fotoelektrik olayın düşük enerjilerde daha çok yaşanmasından kaynaklanmaktadır. Fotonun enerjisi artarken soğurulma azalmakta bunun yerine saçılmalar artmaktadır. Bu durum fotonların malzeme ile etkileşiminde compton ve çift oluşumu ihtimalinin artmasından kaynaklanmaktadır. Gama radyasyonunun enerjisi arttıkça maddenin foton ile

etkileşimi daha çok compton ve çift oluşumu olaylarını gerçekleştirir. Bu da soğurmanın azaldığını yani lineer soğurma katsayının azaldığını göstermektedir.

Radyasyonun malzeme ile etkileşmesinde, maddenin yoğunluğunun etkisi de incelenmelidir. Kompozit malzemede B_4C oranı ağırlıkça arttıkça yoğunluğun ve lineer soğurma katsayısının arttığı görülmektedir. Yarı Değer Kalınlık değerinin enerji ile değişimi çizelge 10'da verilmiştir.

Çizelge 10. Enerjilere Bağlı Yarı Kalınlık Değerleri

Enerji	Yarı Kalınlık Değeri (HVL) cm			
	%0 B_4C	%10 B_4C	%15 B_4C	%20 B_4C
662 Kev	5.0217	4.8553	4.7767	4.7008
1173 kev	6.6051	6.3843	6.28135	6.18108
1250 Kev	6.8223	6.5938	6.4864	6.3837
1332 Kev	7.0463	6.8102	6.7003	6.5932

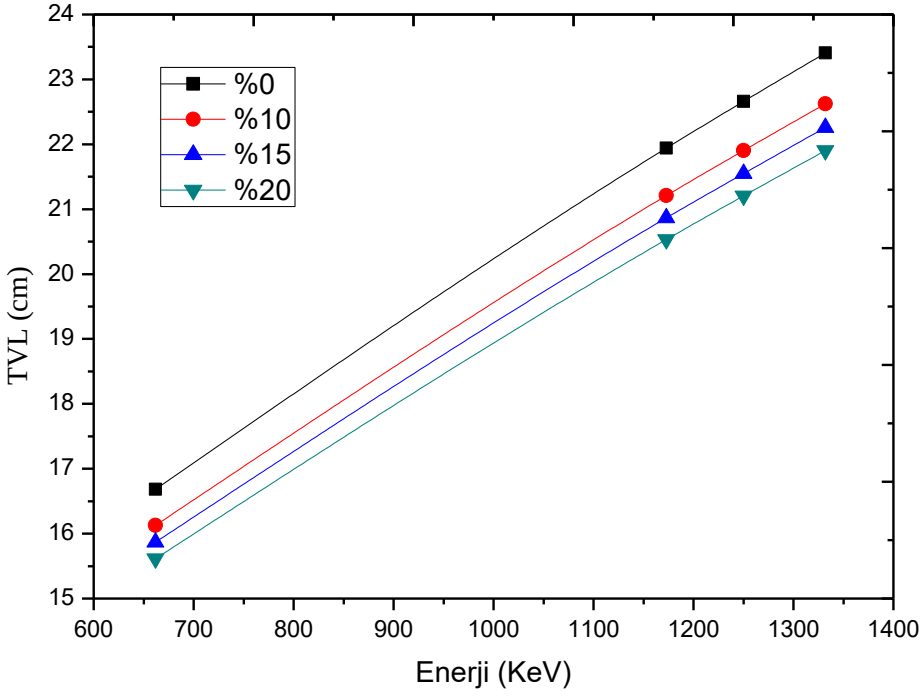


Şekil 9. Yarı Kalınlık Değerinin Enerjiye Bağlı Grafiği

AZ91 kompozit malzemesine bor karbür eklenmesi ve hacimce % B_4C oranının artırılması ile Cs-137 ve Co-60 gama kaynakları karşısında malzemenin HVL değerleri azalmaktadır. Dolayısıyla bu durum radyasyon zırhlama kabiliyetini arttırmaktadır. Enerjilere Bağlı Onda Bir Kalınlık Değerleri çizelge 11'de verilmiştir.

Çizelge 11. Enerjilere Bağlı Onda Bir Kalınlık Değerleri

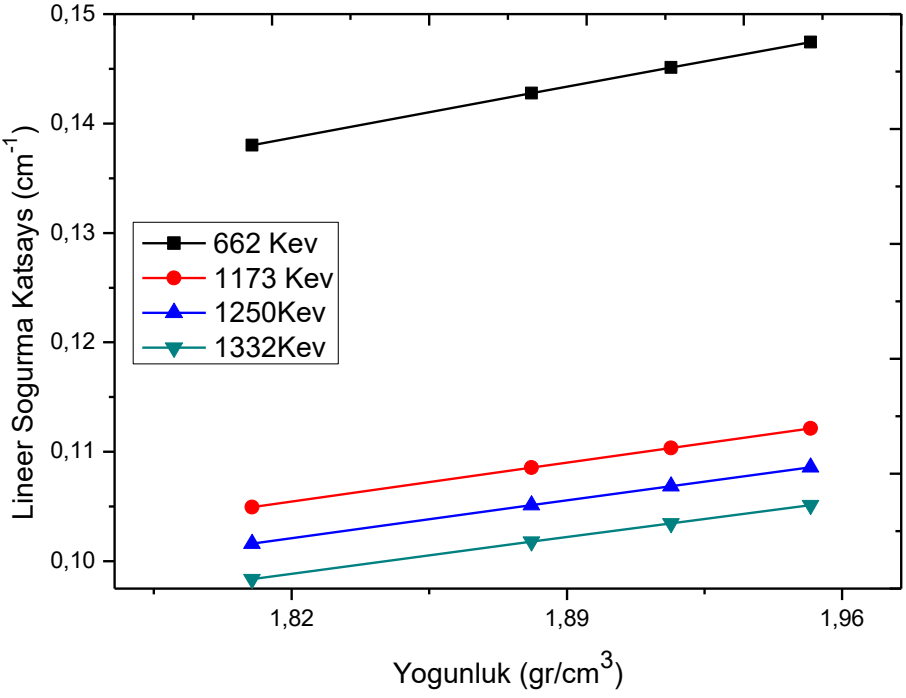
Enerji	**Onda Bir Kalınlık Değeri (TVL) cm**			
	%0 B_4C	**%10 B_4C**	**%15 B_4C**	**%20 B_4C**
662 Kev	16.6817	16.12906	15.8678	15.616
1173 kev	21.9419	21.20829	20.8661	20.5331
1250 Kev	22.6632	21.9043	21.5476	21.20634
1332 Kev	23.4073	22.6231	22.2579	21.9022



Şekil 10. Onda Bir Kalınlık Değerinin (TVL) Enerjiye Bağlı Grafiği

Çizelge 11 ve şekil 10'da görüldüğü gibi malzemenin hacimce B_4C oranı arttıkça onda bir kalınlık değeri azalmaktadır. Bu da B_4C'ün malzemenin zırhlanma özelliklerini artırdığını göstermektedir.

Şekil 11 de görüldüğü gibi lineer soğurma katsayısı yoğunluğa bağlı olarak artmaktadır. Lineer soğurma katsayıları ile kütle soğurma katsayıları $C_{0\text{-}60}$ (662Kev) ve $C_{s\text{-}137}$ (1173 Kev ve 1332 Kev ve bunların ortalama değeri olan 1250Kev) değerlerinde karşılaştırılabilir.



Şekil 11. Yoğunluğa Bağlı Lineer Soğurma Katsayısı Grafiği

Bu çalışma, 65/2020-04 proje kodlu, "AZ91 ve Al-Cu Esaslı Seramik parçacık (B_4C) Takviyeli Kompozit Malzeme Üretimi ve Radyoaktif Zırhlama Özelliklerinin İncelenmesi" proje ismi ile Gazi Üniversitesi Bağımsız Bilimsel Araştırma Birimi tarafından desteklenmektedir.

KAYNAKÇA

Aizenshtein, M., Froumin, N., Shapiro-Tsoref, E., Dariel, M.P., Frage, N., (2005), Wetting and interface phenomena in the B4C/(Cu–B–Si) system, Scripta Materialia 53, 1231–1235, doi:10.1016/j.scriptamat.2005.08.006.

Atalay O., (2006). Magnezyum ve Alaşımlarının Konstrüksüyon Malzemesi Olarak Otomotivde Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Aybers N., Bayülken A., (1992). Nükleer Reaktörlerin Güvenliği. İTÜ Rektörlüğü (Sayı:1475). İstanbul.

Berger M.J., Hubbell J.H., Seltzer S.M.,Chang J., Coursey J.S., Sukumar R., Zucker D.S., Olsen K.(t.y).“XCOM: photon crossection database. http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm,”A.B.D. Alındığı Tarih (12.04.2013)

Demir, A., (2006). Metaller Arası Bileşik Mg2Si Takviyeli AZ91/Mg2Si Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Doğan, B. (2015). Yapı malzemelerinin gama radyasyonu karşısındaki davranışının incelenmesi (Yüksek lisans tezi). İ.T.Ü.E.E, İstanbul.

Hubbell, J.H., 1982. Photon mass attenuation and energy-absoption coefficients from 1 keV to 20 MeV. International Journal of Applied Radiations and Isotopes,33, 1269–1290.

Jung, J., Kang, S., (2004), Advances in Manufacturing Boron Carbide–Aluminum Composites, J. Am. Ceram. Soc., 87 [1] 47–54, doi: 10.1111/j.1551-2916.2004.00047.x

Kerti, I., (2005), Production of TiC reinforced-aluminum composites with the addition of elemental carbon, Materials Letters, 59, 3795 – 3800, doi:10.1016/j.matlet.2005.06.032

Khan, K.B., Kutty, T.R.G., Surappa, M.K., (2006), Hot hardness and indentation creep study on Al–5% Mg alloy matrix–B4C particle reinforced composites, Materials Science and Engineering A 427, 76–82, doi:10.1016/j.msea.2006.04.015

Kok, M., (2005). “Production and mechanical properties of Al_2O_3 particle-reinforced 2024 aluminium alloy composites”, Journal of Materials Processing Technology, 161 (3): 381-387.

Knoll Glenn, F. (2010). Radiation Detection and Measurement. Newyork: John Wiley&Sons, Inc.

Knoll G.F.,(2002). Radiation Detection and Measurement. University of Michigan

L'Annunziata M.F.(2003). Handbook of Radioactivity Analysis. Elsevier Science, 2nd Ed, ABD.

Martin, J.E. (2006). Physics for Radiation Protection, 3nd. Ed,Wiley-VCH

Powsner R.A., Powsner E.R.(2006). Essential Nuclear Medicine Physics. Blackwell Publishing, 2nd Ed, ISBN 1-4051-0484-8, Massachusetts.

Rajan, T. P. D., Pillai, R.M., Pai, B. C., (1998), Review, Reinforcement coatings and interfaces in aluminium metal matrix composites, Journal of Materials Science Vol.33, 3491-3503, doi: 10.1023/A:1004674822751

Özdin, K., (2006), Production of aluminium based SiC-reinforced composite materials and investigation of their wear properties, PhD Thesis, Gazi University. (in Turkish)

Shorowordi, K. M., Laoui, T., Haseeb, A. S. M. A., Celis, J. P., Froyen, L., (2003), Microstructure and interface characteristics of B4C, SiC and Al2O3 reinforced Al matrix composites: a comparative study, Journal of Materials Processing Technology, 142, 738-743, doi:10.1016/S0924-0136(03)00815-X.

Shrestha, N.K., Kawai, M., Saji, T., (2005), Co-deposition of B4C particles and nickel under the influence of a redox-active surfactant and anti-wear property of the coatings, Surface & Coatings Technology 200, 2414– 2419, doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.08.192 .

Shultis J. K., Faw R.E.,(2000). Radiation Shielding.

Toptan, F., (2011), Production of high wear resistant B4C particle reinforced aluminium matrix composites, PhD Thesis, Yildiz Technical University. (in Turkish)

Tsoulfanidis, N. (1995). Measurement and Detection of Radiation, Abingdon: Taylor&Francis

Turner, J.E. (2007). Atoms, Radiation and Radiation Protection 3rd. Wiley-VCH.

Wood, J.(1987). Computational Methods in Reactor Shielding, Pengamon Press.

Zhang, H., Ramesh, K. T., Chin, E.S.C., (2004), High Strain Rate Response of Aluminium 6092/B4C Composites, Materials Science and Engineering, A 384, 26-34, doi:10.1016/j.msea.2004.05.027.

Zhu, X., Dong, H., Lu, K., (2008), Coating different thickness nickel–boron nanolayers onto boron carbide particles, Surface & Coatings Technology 202, 2927–2934, doi:10.1016/j.surfcoat.2007.10.021.

BÖLÜM 12
SAĞLIKTA KABLOSUZ VÜCUT ALANI SENSÖR AĞI SİSTEMİ

Perihan DİKİLİ
Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul / TÜRKİYE

Öz: Gelişmiş toplumlarda birey ve onun ter türlü refahı önemlidir. Siyaset, ekonomi, eğitim gibi pek çok alandaki çalışmalar bu refah düzeyini korumak ve yükseltmek amacıyla, ihtiyaçların karşılanması, sağlığın korunması ve geliştirilmesi yönündedir. Dünya Sağlık Örgütü sağlığı, bireyin biyolojik, psikolojik ve sosyal yönden tam bir iyilik hali olarak tanımlamaktadır. Bireyin her yaşta iyi olmasını hedefleyen bu tanıma bir yaş sınırı getirmemekte ve bu hedef sosyal hizmetinde temelini oluşturmaktadır. Salgın hastalıklar, doğal afetler, kronik rahatsızlıklar gibi çok çeşitli nedenlerle yaşlı ve riskli gruptaki bireylerin evde kalma gerekliliği sürecinde, hem teknolojik, hem sosyal, hem de sağlık hizmetlerine erişim sürecinde zorluklar yaşanmaktadır. Bu zorlukların yanı sıra sağlık hizmeti sunucularının işlerini kolaylaştırmak, iş yükünü hafifletmek, sağlık bakım hizmetlerinin maliyetini düşürmek amacıyla; sağlıklı veya hasta bireyleri korumak, yaşam kalitesini artırmak, en önemli risklerden olan enfeksiyon bulaşma riskini önlemek ya da azaltmak amacıyla bazı teknolojik gelişmelerin önemi artmıştır. Son yıllarda özellikle yaşlı ve bakıma ihtiyacı olan bireylerin, takibi ve sağlıklı bireylerinde ihtiyaç duyulduğunda sağlık kontrolünün sağlanabilmesi, erken uyarı sistemleriyle teşhis ve tedavinin kolaylaştırılması için geliştirilmiş olan Kablosuz Vücut Alan Sensör Ağı sistemi, sağlık sektörüne yönelik uygulamaları nedeniyle oldukça ilgi görmüştür. Kablosuz Vücut Alan Ağı veya kablosuz Vücut Alan Sensör Ağı, Kablosuz Sensör Ağı'nın belli bir olgunluğa ulaşması sonucu ortaya çıkan bir alt alanıdır. Küçük boyutlu elektronik bileşenler ve giyilebilir teknolojiler kablosuz vücut alan sensör ağının daha da gelişmesine katkıda bulunmuştur. Genel kullanım alanları göz önüne alındığında, bu çalışmanın amacı, sağlıkta kablosuz vücut alanı sensör ağının çeşitli yönleri ele alınmıştır.

GİRİŞ

Sağlık, toplumların, ülkelerin gelişmişlik düzeyinin temel göstergelerinden biridir. Buna karşılık; her ülke, gelişmişlik düzeyi ne olursa olsun, sağlık sorunlarıyla ile karşı karşıyadır. Kimi ülkeler yaşlanan nüfusun kronik hastalıkları ile mücadele ederken kimi ülkeler de ise beslenme (yetersiz/dengesiz beslenme, obezite) sorunlarından kaynaklanan hastalıklarla mücadele edilmektedir.

Yaşlanan nüfus küresel sağlığın önemli bir faktörüdür. Gelişen bilimsel ve teknoloji yaşam ömrünü uzatmaktadır. 2022 yılında, 65 yaşın üstündekilerin, dünya nüfusunun 668 milyonunu oluşturacağı ve küresel nüfusun %11.67si olacağı öngörülmektedir(STM-Thinktech, 2019). Yaşlı nüfusun giderek artması, mevcut tıbbi kaynaklar, hastaların ve yaşlıların gelecekte sağlık hizmeti taleplerini karşılamada yetersiz kalacaktır. Sağlık durumlarının gerçek zamanlı veya belirli aralıklarla izlenmesi gereken çoğu hastalar için ekonomik kısıtlılıklar, çalışma zorunluluğu, sosyal ve diğer nedenlerden dolayı uzun süreli bakım gerektiren durumlarda hastanede kalmanın karşılanması oldukça zordur.

Son zamanlarda bilimsel ve teknolojik gelişmeler hızla ilerlemekte hayatımızın parçası haline gelmektedir. Sağlık sektörü de bu gelişmelerin en yoğun görüldüğü alanlardandır. Özellikle iletişim alanındaki teknolojik gelişmeler, sağlık hizmetinin hastane merkezli olmasının aksine hasta merkezli olması yönüne doğru evrilme yönündedir. Tanılama yöntemlerindeki teknolojiler, kişiye özel tedavi yöntemlerinin gelişmesi yönünde ilerlemektedir (CGI,2015).

KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Geçmişten günümüze sağlık ve hastalık kavramının birçok tanımı yapılmıştır. Bu iki kavramın birbirini tamamlayıcısı nitelikte olduğu düşünülmüştür. Yani hastalığın ya da sağlığın tanımı bir diğerinin varlığıyla anlam kazanmıştır.

Sağlık algısı, kişiden kişiye farklılık gösterdiği gibi toplumdan topluma, kültürden kültüre de farklılık göstermektedir (Öztürk ve Kıraç,2019). Tarihsel olarak sağlık, anlamsal bir evrim sürecinden geçmiş, zaman zaman hastalığın ya da sakatlık durumunun olmayışı olarak tanımlanmıştır (Tengilimoğlu, 2009). Eski çağlarda sağlık, zengin ve fakire göre farklı şeyleri ifade eder, zengin için hastalık, yemek, içmek, doktor tavsiyeleri, günlük aktiveteleri yerine getirememekti. Fakir için hastalık düşük düzeyde tıbbi hizmet alabilmek, kısa sürede ayağa kalkabilmek ya da ölmekti (Bölükbaşı,2014). Hipokrat Aforizmalarında, “Hastanın aklının ye-

rinde olması ve besinlerden tat alabilmesi iyi birer belirtidir" diyerek akıl ve bedenin birbiriyle ilişkili olduğunu ve etkilediğini savunmuştur (Uğurlu,1997). İnsan ve onun davranışlarını anlamak üzerine odaklanan psikoloji ve sosyoloji bilimlerinde ise; bu tanımların yetersiz olduğu, insanı bir bütün olarak değerlendirmek gerekliliği son yüzyıllarda önem kazanmıştır. Dünya Sağlık Örgütü 1948'de bireyi tüm yönleriyle ele alınması gerekli olduğuna dikkat çekerek tanımı genişletmiş ve bireyi tüm yönleriyle ele alarak sağlığı tanımlamıştır.

DSÖ'ne göre sağlık, sadece hastalık ve sakatlığın olmayışı değil, aynı zamanda fiziksel, ruhsal ve sosyal yönden tam bir iyilik halidir. Bireyin her yaşta iyi olmasını hedefleyen bu tanıma bir yaş sınırı getirmemekte ve bu hedef sosyal hizmetinde temelini oluşturmaktadır. Yaşamı odak alan anlayış, yaşamın her türlü olumlu ve olumsuzluklarıyla ilgilenilmesi ve desteklenmesini gerekli kılmaktadır.

Yakın yüzyılda, gelişmiş ülkeler yaşam kalitesini yükseltmek amacıyla pek çok alanda olduğu gibi bilime ve teknolojiye yatırım yapmışlardır. Bu yatırımlar küresel ekonominin en büyük sektörlerinden sağlık alanına da yansımıştır. Teknolojinin tedavi yöntemlerine getirdikleri yenilikler benzersizdir. İnternet ağının gelişmesi, mobil iletişim teknolojileri, bulut bilişim, robotlar, yapay zeka ve giyilebilir teknolojik ürünler, öğrenen makinalar gibi yenilikler sayesinde sağlıkta da büyük bir gelişim yaşanmaktadır. Teknolojinin sunduğu bu imkanlar, sağlık profesyonellerinin çalışmalarına her geçen gün katkı sağlamakta, hastalıkların önlenmesi, teşhis koyma, tedavi etme ve tedavi sonrasındaki hizmetlerin vazgeçilmezi hale gelmiştir. Ancak, bu gelişmelerin yansıması her ülke için aynı değildir. Az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde durum oldukça farklıdır. Önlenebilir hastalıklardan ölümler bu ülkelerde yüksektir. Dünya Sağlık Örgütü'nün,2019 Küresel Sağlığa Etki Eden On Tehdit (Ten Threat to Global Health in 2019) raporuna göre; 2019 yılında, gelişmiş ülkelerde dahil olmak üzere tüm ülkelerin sağlık sorunlarının başında hava kirliliğine bağlı gelişen hastalıklar, obezite ve antibiyotiğe dirençli patojenler ilk sıralarda yer almaktadır. Her on kişiden dokuzu kirli hava soluyor. Havadaki bu kirlilik, solunum ve dolaşım sistemlerine nüfuz ederek akciğerlere, kalbe ve beyne zarar vererek, kanser, felç, kalp ve akciğer hastalıkları nedeniyle 7 milyon insanın erken ölümüne sebep olabilmektedir. Diyabet, kanser ve kalp hastalığı gibi bulaşıcı olmayan hastalıklar, dünya çapındaki tüm ölümlerin % 70'inden veya 41 milyon insanın ölümünden sorumludur. Bu ölümlerin 15 milyonu 30 ila 69 yaşları arasındadır ve % 85'inden fazlası düşük ve orta gelirli ülkelerde görülmektedir. 1.6 milyon insan; açlık, kuraklık, savaş ve zorunlu göçlerin

olduğu bölgelerde temel sağlık hizmetlerine erişimden yoksun olarak yaşamaktadırlar. Tütün ürünleri kulanımı, alkol bağımlılığı, kötü beslenme ve hareketsizlik erken ölümleri artmasına sebep olmaktadır. Rapora göre Türkiye'nin de sağlık sorunu, diğer orta gelir düzeyindeki ülkeler gibi bulaşıcı olmayan hastalıklardır(WHO,2019). DSÖ'nün başka bir raporuna göre 2015 yılında yaklaşık 17.9 milyon kişi kardiyovasküler hastalıklar nedeniyle ölmekte ve tüm küresel ölümlerin %31'ni temsil etmektedir. Bu ölümlerin %85'i kalp krizi ve felçtir. 2015 yılında bulaşıcı olmayan hastalıklara bağlı 17 milyon erken ölümün(70 yaş altı) %82'si düşük ve orta gelirli ülkelerde ve %37'si kardiyovasküler hastalıklardan kaynaklanmaktadır (WHO, 2015).

Küresel sağlığın önemli bir faktörü olan yaşlı nüfusun giderek artması, mevcut tıbbi kaynaklar, hastaların ve yaşlıların gelecekte sağlık hizmeti taleplerini karşılamada yetersiz kalacaktır. Sağlık durumlarının gerçek zamanlı veya belirli aralıklarla izlenmesi gereken çoğu hastalar için ekonomik kısıtlılıklar, çalışma zorunluluğu, sosyal ve diğer nedenlerden dolayı uzun süreli bakım gerektiren durumlarda hastanede kalmayı karşılaması zordur.

Sağlık hizmetlerindeki bilimsel ve teknolojik gelişmeler hızla gelişmesini ve değişimini sürdürmekte, özellikle iletişim alanındaki teknolojik gelişmeler, sağlık hizmetinin hastane merkezli olmasının aksine hasta merkezli olması yönüne doğru evrilme yönündedir.

Dünya Sağlık Örgütü, Sağlık teknolojisi, yaşam kalitesini iyileştirmek, sağlık problemlerini çözmek için geliştirilen tıbbi cihazlar, ilaçlar, aşılar, prosedürler, sistemler şeklinde organize edilmiş bilgi ve becerilerin uygulanması olarak geniş kapsamlı ele almıştır.(WHO,2020)

Akıllı/Uzaktan Takip Sistemleri

Son yıllarda bilgi ve iletişim teknolojilerinin gelişmesi ve ilerlemesi, hayatın farklı boyutlarını kolaylaştırmaktadır. Bu bilgi ve iletişim tabanlı hizmetler, her geçen gün sağlık alanında başarılı uygulamalarla ilerlemektedirler. Bu hizmetlerden en önemlilerinden biri, sağlık hizmeti sunucularının, sağlıklı ya da hasta bireylere, fiziksel olarak bulundukları yerde olmadan gözlemleyebilmeleri, teşhis ve tedavi hizmetlerini uzaktan sunma imkanı sağlayabilmeleridir.

Klasik hasta izleme yönteminde, kişi sağlığıyla ilgili olumsuzluk, rahatsızlık durumunu gidermek amacıyla sağlık merkezine başvurur. Sağlık merkezinde hekim/ler tarafından yapılan muayene ve tetkikler sonucuna göre teşhis konur. Hasta

için en uygun tedavi yöntemi belirlenir. Zaman açısında yavaş ilerleyen bu yöntemin, maliyeti yüksektir.

Bununla birlikte hastanelerde kliniklerde, yoğun bakımlarda hastalar aralıklı veya sürekli olarak izlenmektedir. Bu ortamlar kısıtlayıcı olduğu kadar yoğun bir iş gücü ve raporlama gerektirir. Ayrıca uzun süreli hastane ortamında yatan hastalarda hastane enfeksiyonları gelişme riski yüksektir.

Dijital iletişimin yaygınlaştığı günümüzde, kablosuz ağ teknolojilerindeki gelişmeler, internet, uzaktan ve gerçek zamanlı sağlıklı/hasta bireyler için yaşam alanlarında, evlerinde takip sistemlerini kurmak mümkündür. Bu sistemler hedef kitlenin belirlenmesi ve ihtiyaçları doğrultusunda maliyet göz önünde bulundurularak uygun teknolojilerle tasarlanması gerekir.

Uzaktan sağlık/hasta takip sistemleri, insanların hastaneler ve bakım evleri gibi pahalı tesislerin yerine evde kalmalarını sağlar. Non-invaziv(yani insan vücudu içerisine yerleştirilmemiş) ve rahatsız etmeyen giyilebilir ve/veya sensörlerle tasarlanmış bu sistemler, gerçek zamanlı olarak hastaların önemli fizyolojik verilerini, aktivitelerini uzaktaki sağlık tesisine iletme, teşhis, tanı ve erken müdahale etme olanağı sağlar.

Uzaktan sağlık/hasta takip sistemleri, özellikli evde sağlık hizmetlerini ve diğer tele-sağlık sunum yöntemlerini kullanan sağlık hizmeti sağlayıcılar, hastaneye geri yatışları büyük ölçüde azaltmıştır. Örneğin, Pittsburgh Üniversitesi Tıp Merkezi, hastaları tabletler ve uzaktan izleme ekipmanı ile donatarak hastaneye yeniden yatma riskini % 76 azaltmış ve hasta memnuniyeti puanlarını% 90'ın üzerine yükseltmiştir (www.businessinsider.com, 2020).

Sağlık Hizmetlerinde Akıllı/Uzaktan Hasta Takip Sistemleri (Remote Pation System)

Sağlıkta uzaktan takip sistemleri, sağlıklı ve rahat yaşama, sağlık hizmeti sunucularının hastaları yakından izleme, yaşamsal sağlık verilerinin ölçülmesi, rutin konsültasyonlar ve sağlıklı yaşam için, genel olarak daha erişilebilir bir iletişime destek olmak amacıyla geliştirilmiştir.

Başlangıçta sağlıkta sağlıklı/hasta takip sistemleri, akıllı ev sistemlerinin bir modülü olarak ortaya çıkmış, huzurevleri, hastaneler veya bakım evleri gibi tesislerin yerine, bireyin evde rahat ve bağımsız bir yaşam sağlayabilmek amacıyla

yaşlılar ve engelliler için tasarlanmıştır. Bilimsel ve teknolojik gelişmelerle birlikte üretimdeki maliyetlerinde azalması, kullanıcıları için daha ucuz ve konforlu sistemlerin üretilmesini ve gelişmesini sağlamıştır.

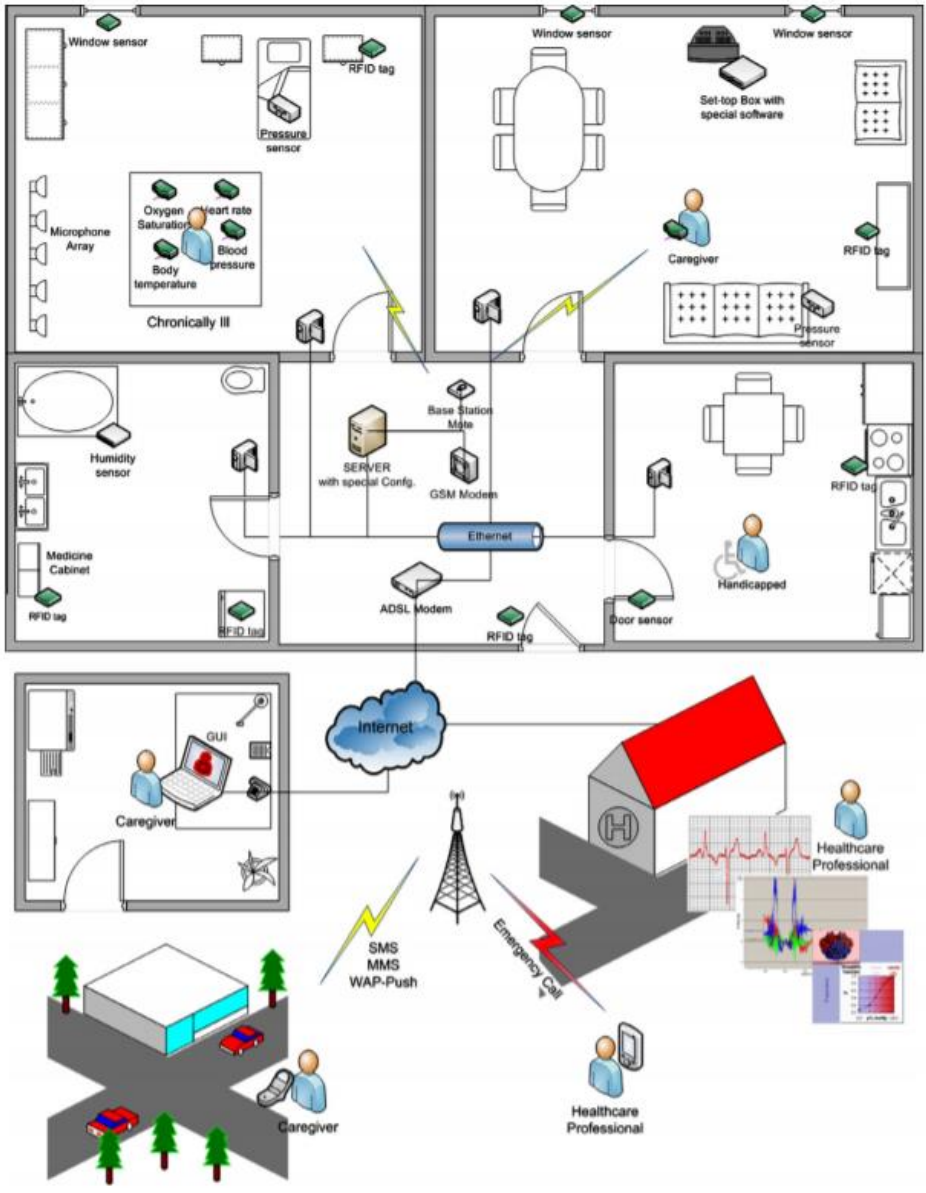
Uzaktan sağlık takip sisteminin ilk uygulayıcılarından biri 2010 yılında Norveç'in başkenti Oslo'da Dignio Yazılım Şirketi tarafından kurulmuştur. Oslo Belediye Meclisi, sağlık hizmeti sağlayıcılarından oldukça uzakta yaşayan, diğer çeşitli sağlık sorunları nedeniyle yönetilmeleri ve bakımı zor olan, kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAH) olan, 250 yaşlı ve bakıma muhtaç vatandaşı belirlemiştir. Hastaların evinde, bir dizi yaşamsal belirti kayıtlarını alan, giyilebilir, kişiye özel, fizyolojik verilerine odaklanan bir program ve tablete ileten diğer bir program sayesine veriler, bulut ortamına iletilmiş, bulut ortamından da hastanın durumundaki değişiklikler bir uyarı sistemiyle çok disiplinli sağlık profesyonellerinden oluşan bir ekibe gerekli müdahaleler yapılabilmesi için ulaştırılmıştır. Dignio'nun yazılımı şu anda 141 Norveç eyaletinde ve İskandinavya ve Baltık ülkelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (www.thejournalofhealth.com. 2020).

Son zamanlardaki kayda değer buluşlardan biri olan sensörler; sıcaklık, nesnelerin hareketi, yoğunluk, özellikle ışık yoğunluğu, manyetizma gibi çeşitli parametreleri gözlemleyebilen, genellikle birbirleriyle veya diğer cihazlarla iletişim kurabilen, verileri toplama, işleme ve depolama için geliştirilmiş boyutları küçük elektronik cihazlardır (Yick ve ark. 2008). Sağlık/hasta takip sistemleri, vücut veya kişisel alan ağları ve çevreye yerleştirilmiş çeşitli algılayıcı veya sensörlerden oluşabilir. Sistemin kategorilerini, çocuklar(genellikle yürümeye başlayan bebekler), yaşlılar, kronik hastalar, bakıcılar ve sürekli takip, acil müdahale gibi durumlarda yanıt veren sağlık çalışanlarından oluşan birkaç prototip ve ticari uygulamaları bulunmaktadır. Bu gruplardaki kişiler farklı alt yapılar kullanarak birbirleriyle sürekli iletişim halindedirler.

Kablosuz(Wireless) Ağ Algılayıcıları konusu, 1978'den itibaren bilgisayar ve iletişimdeki gelişmelerle başlamış, mikro elektromanyetik teknolojisindeki ilerlemelerle birlikte 1998'den sonra önemli bir araştırma alanı oluşturmuştur. Kablosuz algılayıcılardaki bu gelişmelere bağlı olarak kablosuz sistemler, ortamı gözlemleyen ve elde edilen verileri aktaran algılayıcılar da yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu sistemlerin kullanılmasının birçok sebebi olmakla birlikte en önemlileri; düşük güç tüketimi, düşük maliyet, veri işleme, kablosuz iletişim kapasiteleri, sınırlı sayıda ekipman kullanımı ve küçük algılayıcılar olmasıdır. Kablosuz algılayıcılar bu özellikleri nedeniyle iletişim, gözlem ve veri aktarımı

alanında önemli bir yer tutmaktadır(Soylu,2012). İlk kablosuz ağ, askeri uygulamalar için kullanılmış, sensör teknolojisinin gelişmesi ve düşen maliyetlerle birçok alanda yaygın hale gelmiştir. Kablosuz Algılayıcı Ağ kullanım alanlarından biri de sağlık hizmetleridir.

Alemdar ve Ersoy göre; genel olarak, Vücut Alan Ağ Sistemi(Body Area Network-BAN), Kişisel Alan Ağ Sistemi, Geniş Alan Ağ Geçidi, Geniş Alan Ağları ve Son Kullanıcı Sağlık İzleme Uygulamaları olmak üzere beş alt sistem vardır. (Alemdar ve Ersoy,2010). Bu uygulamalar günlük yaşam faaliyetlerini izleme (hareket etme, nabız, vücut ısısı, oksijen satrasyonu, v.b), ilaç alımı, konumu ve normal dışı durumları tespit etme ve bildirimde bulunma, hatırlatma gibi görevlerle donatılmışlardır. Şekil 1'de çok modlu sorunsuz bir uzaktan sağlık takip sistemi örneği görülmektedir.



Şekil 1. Çok Modlu Sorunsuz Bir Uzaktan Sağlık Takip Sistemi Örneği (Alemdar ve Ersoy, 2010)

Vücut Alanı Ağları- Body Area Networks (BAN)

Sensör teknolojilerinin her geçen gün daha da minyatürleşmesi, kişinin fizyolojik verilerini kablosuz olarak uzaktaki sunuculara iletilebilen, insan vücudunun dışına veya içine yerleştirilebilen çok özel iletişim tasarımları Vücut Alan Ağları (BAN) olarak adlandırılır (Cao,Leung,Chan,2009).

Vücut Alan Ağı (BAN) teknolojisi hala gelişmekte olan bir teknolojidir ve bu nedenle çok kısa bir geçmişe sahiptir. BAN teknolojisi, mevcut sensör ağ teknolojisi ve biyomedikal mühendisliğinin doğal yan ürünü olarak ortaya çıkmıştır. Profesör Guang-Zhong Yang, 2006 yılında Body Sensor Networks adlı kitabının yayınlanmasıyla "Body Sensor Network" (BSN) ifadesini resmi olarak tanımlayan ilk kişidir(Karulf,2008).

Sensörler esas olarak üç görevi yerine getirir; algılama, işleme ve iletişim. Algılama görevinde, sensörler yapabildikleri parametreyi izler veya algılar. İşleme görevinde, bir sensör toplanan verileri havuza göndermeden önce karşılaştırma ve depolama amacıyla işler, işlenen veriler, yani bilgiler daha fazla iletişim veya işlem için havuza iletir(Han ve Pathan, 2018).

BAN, çok girişli kablosuz kanalı algılayabilen, çalıştırabilen, hesaplayabilen ve birbirleriyle iletişim kurabilen heterojen düğüm kümesinden oluşan bir ağdır. Bir BAN nabız, solunum, bunlarla ilgili normal/anormal fizyolojik verilerinin yanında, aktivite durumu, ortamın nemi çevresel verileri, hastanın ilacını alıp almadığını, uyku gibi verilerini toplar, işler ve sağlıklı/hastanın durumu hakkında bilgi verir. BAN'lar, Kablosuz Sensör Ağları(Wireless Sensor Networks-WSN) adı verilen çok daha genel bir cihaz ağı sınıfına aittir.

BAN'lar WSN'lerden bir dizi ara adımla geliştirilmiş ve bu sayede ilk olarak WSN konsepti dizüstü bilgisayarlar, telefonlar, kameralar ve yazıcılar gibi kişisel cihazlara uygulanmıştır. Bu tür ağlara Kişisel Alan Ağları veya Kablosuz Kişisel Alan Ağları (Personal Area Network Sensor-PANS) denir. Kablosuz Kişisel Alan Ağları(Wireless Body Area Network-WPAN), nabız oksimetreleri gibi tıbbi cihazların ve kişisel bilgi işlem veya akıllı telefonlar ve retina protezleri gibi yardımcı cihazların kablosuz kanal üzerinden ağa bağlandığı ve vücuda takıldığı BAN'lar ile geliştirilmiştir (Gupta ve ark. 2013). BAN teknolojisi için birçok potansiyel kullanım alanı vardır. En yaygın kullanım durumlarından bazıları: Vücut Sensör Ağları (Body Sensor Neywork-BSN), Spor ve Fitness İzleme, Kablosuz Ses, Mobil Cihaz Entegrasyonu, Kişisel Video Cihazları örnek olarak verilebilir(Karulf, 2008).

Daha fazla ilerlemeden önce, bu yazıda kullanılan terimin temel olarak kullanılan Kablosuz Vücut Alanı Sensör Ağı(Wireless Body Area Sensor Network-WBASN) olduğu, önceki ve son çalışmalarda bazen Kablosuz Vücut Alanı Ağı

(Wireless Body Area Network-WBAN) veya Kablosuz Vücut Sensörü Ağı (Wireless Body Sensor Network-WBSN) gibi ifade edildiğine dikkat edilmelidir. Tüm bu terimler sensörlerden oluşan aynı tür ağ anlamına gelmektedir. WBASN'nin en çok kullanıldığı uygulama alanı sağlık hizmetleridir. Bir WBASN'deki küçük boyutlu sensörler, insan vücuduna invazif (yani insan vücudu içerisine yerleştirilebilir) veya non-invaziv olabilir. Bu cihazlar kişinin rutin aktivitesini bozmaz, ancak herhangi bir aktivite sırasında fizyolojik parametrelerini sürekli izler ve kaydedebilir (Han ve Pathan,2018).

Kablosuz Vücut Alanı Ağları (Wireless Body Area Networks-WBANs)

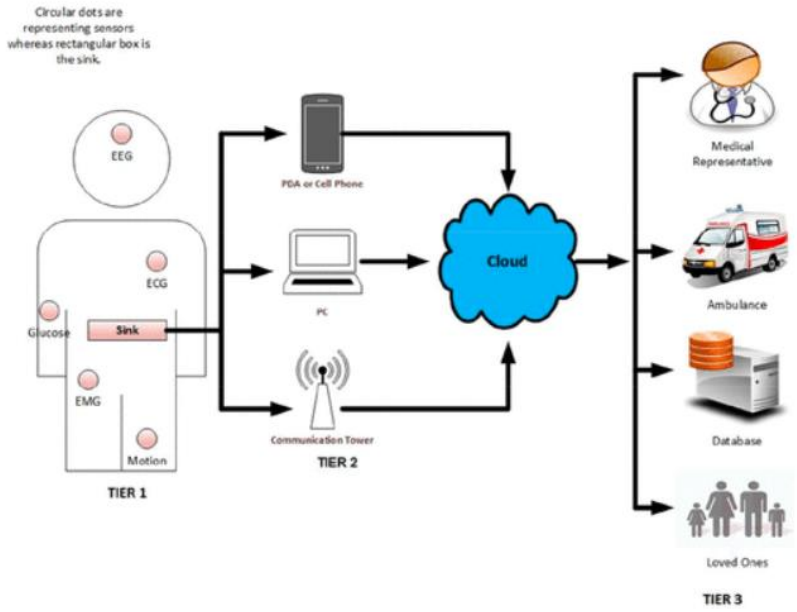
Kablosuz Vücut Alanı Sensör Ağları (Wireless Body Area Networks-WBASNs)

Kablosuz Vücut Alanı Ağları (WBAN), kablosuz iletişim özelliklerine sahip, küçük, düşük enerjiyle çalışan, giyilebilir, insan vücudu çevresine veya içerisine implante edilebilir cihazlardan oluşan ağlardır. Bu cihazların ve ağın amacı vücudu ve çevreyi izlemek ve istendiğinde harekete geçmeyi sağlamaktır(Lima ve ark. 2019).

WBAN bireyin durumunu gözlemlemek, kritik durumlarda alarm gönderilmesini sağlayan vücudun farklı alanlarına yerleştirilen bio-sensörlerden oluşan sistemlerdir. Bu sensörler gerekli durumları kaydetme, numune alma, vücut ısısı, nabız, solunum, kan şekeri, yakılan kalori miktarı gibi fizyolojik parametreleri izleme, işleme, iletme, kişiyi rahatsız etmeden gerçek zamanlı bilgi sağlama, gerektiğinde veya talep edildiğinde harekete geçme yeteneklerine göre tasarlarmıştır(Ferreira ve ark.2020). Küçük bir alanda bulunacak büyük miktarlarda sensör düğümleri mevcuttur. Bu düğümlerin merkezi bir koordinatöre bağlıdır.

Genellikle WBAN veya WBASN iletişim mimarisi 3 temel katmandan oluşur. Bu katmanlar, bazı yerlerde baz istasyonu veya düzenek olarak da adlandırılmaktadır. 1.Katmanda insan vücudunun farklı yerlerine yerleştirilen, elektroensefalogram (EEG), elektrokardiyogram (EKG), elektromiyografi (EMG) veya kan basıncı, vücut ısısı, solunum/oksimetre, hareket sensörü, gövdenin konumunu izlemek için eğim sensörü, adımları izleyebilmek için akıllı çorap sensörü veya ayakkabı iç tabanı gibi ölçüm sensörlerden oluşur. Aynı zamanda bu sensörlerden gelen veriler toparlayan, sınıflandıran ve ön işlem yapan sistemlerden oluşmaktadır. 2.Katman; elde edilen verileri bir ağ koordinatörü aracılığıyla iletişimini sağlayan baz istasyonu görevindedir ve internet özellikli kişisel data, cep telefonu

veya ev bilgisayarından oluşur. 3.Katman; birkaç baz istasyonundan ve güvenlik ağından oluşur. Elde edilen veriler uzaktaki sağlık hizmeti sunucularına (hekim, hemşire, acil servis) veya verilerin daha fazla işlenmesi ve hastalık teşhisi için herhangi bir tıbbi veri tabanına işlenir (Jovanov ve ark,2005), (Han ve Pathan,2018). Şekil 2'de bir WBAN veya WBASN iletişim mimarisi örneği görülmektedir.



Şekil 2. WBAN/WBASN İletişim Mimarisi (Han ve Pathan,2018)

WBAN, sağlık uygulamalarında, başlıca hasta izlemek amacıyla kullanılan çok çeşitli Giyilebilir Sağlık İzleme Sistemleri(Wearable Health Monitoring Systems-WHMS) mevcuttur. Bu tür bir ağda, insan vücudunun farklı fizyolojik parametreleri ölçecek şekilde yerleştirilen sensörler, iletken malzemeleri organik tekstillerle birleştiren akıllı kumaşlar sayesinde, hastanın durumunu uzun süre izlemeyi sağlayan, kullanıcı dostudur. Uygun fizyolojik parametreleri ölçmekten sorumlu sensörler, bir BAN oluşturan akıllı cihazlarla(telefon tablet gibi) doğrudan iletişim kurabilir ya da BAN'dan gelen ham verilerin yerel olarak akıllı cihazda değil, "bulutta" (örneğin, akıllı cihazda pil tasarrufu yapmak için) toplayabilir. Uzaktan teşhisi amaçlayan veya evde bulunan bir hasta veya hasta grubunun sağlık durumunu uzaktan izlemeyi amaçlayan teletıp uygulamalarında farklı ağ segment kullanımları tercih edilebilir(Custado ve ark. 2012).

Özel ultra düşük güç devresi tasarımında, entegre devre teknolojisindeki son gelişmeler, biyomedikal işlevleri izleyebilen, tamamlayabilen ve hatta değiştirebilen işleme yeteneklerine sahip lider sistemler geliştirmiştir. Genel olarak bu biyomedikal cihazlar kalp pilleriydi. Bu tür kalp pilleri, insan vücudunun derisinin altına yerleştirilen, tek bir pille yıllarca çalışmayı gerektiren ve enerji açısından da oldukça kısıtlıydılar. Güç tüketimi seviyeleri, hesaplama işlemlerinin sayısı ve telsiz ön uç güç tüketimi için bir üst sınır belirler. Bununla birlikte kalp pillerinde, temel bir arada varoluş desteğine sahip *ad hoc* tescilli kablosuz iletişim arayüzlerini kullanılmaktadır. Bu tescilli çözümler, standart uyumlu çözümlere göre daha az pratik ve pahalıdır. Öte yandan, BAN uygulamalarının potansiyel pazarı son derece ümit verici olduğundan, BAN standartlarına uygun ürünlere duyulan ihtiyaç esastır. Yakın zamanda bu sorunlar çözülmeye çalışıldı ve WBAN'lar için en spesifik standart, 2012 yılında yayınlanan ve insan vücudunun içinde, üzerinde veya çevresinde kablosuz iletişim için tasarlanmış IEEE 802.15.6'dır (Hernandez ve Mucchi,2014).

WBAN'lar için standartların tasarlanmasında en önemli şeylerden biri, QoS gereksinimlerinin düğümlerin düşük güç kısıtlamaları ile dengelenmesidir. Bluetooth (IEEE 802.15.1) veya ZigBee (IEEE 802.15.4) protokolleri gibi bazı standartlar sağlık uygulamaları için uyarlanmıştır. Bu kablosuz standartları iyi belgelenmiş ve test edilmiştir, ancak daha esnek olan ve daha uzun iletim aralıkları için kullanılan ağları hedefledikleri için verimli değildir. Bu, onları, bir WBAN için özel olarak tasarlanmış protokollerden daha az enerjiyi verimli kılar(Filipe ve ark.2015). Bir WBAN'ın merkezi düğümü; IEEE 802'den geliştirilen mevcut kablosuz teknolojiler, Bluetooth, Bluetooth Low Energy, ZigBee, UWB, NFC, RFID, Zarlink, RuBee gibi uluslararası standardizasyonda, Sensium, Insteon, Z-dalgası, ANT, video izlem sistemleri ve hücresel ağlar ile etkileşime girebilir(Movassaghi ve Ark.2012).

WBAN'nin veri aktarımı için Kablosuz Tıbbi Telemetri Servisi (Wireless Medical Telemetry Services-WMTS), Endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi(Industrial, Scientific and Medical-ISM,2.4-2.4835GHz) ultra geniş bant(Ultra-wideband-UWB) ve Tıbbi İmplant İletişim Servisleri(Medical Implant Communication Services-MICS) gibi farklı teknolojiler kullanılır. Uygulamaların çeşidine göre yüksek veya düşük veri hızı teknolojileri teknolojileri kullanılmaktadır(Hasan ve ark.2019).

SONUÇ ve ÖNERİLER

Sağlık, bireysel olarak önemli olduğu kadar toplumsal olarak da çok önemlidir. Toplumsal açıdan sağlık, refahın merkezinde yer alırken ekonomik açıdan ise sağlık hizmetlerinin büyük bir sektör olduğu görülmektedir. Günümüzde sağlık alanında geliştirilen modern ve yeni teknolojiler, tanı ve tedavi yöntemlerine büyük katkı sağlamakta özellikle de erken tanı yöntemleriyle yaşamı ve kalitesini artırmaktadır.

Şubat 2015' te Dünya Sağlık Örgütü, Sağlık teknolojilerinin kullanım durumunun tespiti amacıyla üye ülkelere yaptığı anket bulgularına göre; ülkelerin gelir seviyesi ile sağlık teknolojilerinin bağlantılı olduğunu ortaya koymuştur. Gelir seviyesi düşük olan ülkelerin sağlık müdahaleleri için teknoloji kullanma eğiliminin(%85) düşük olduğunu, bununda ilaç (%62), tıbbi cihazlar(%54) ve cerrahi müdahaleler(%38) için kullanıldığı görülmektedir. Öte yandan yüksek gelirli ülkelerde bu oranı daha yüksektir ve ilaçlar (%89), tıbbi cihazlar(%83) veya cerrahi müdahaleler (%69) için oransal farklılıklar görülmektedir(WHO, 2015). Türkiye'nin sağlık teknolojileri derleme sisteminde ülke profiline baktığımızda 2013 yılında yıllık kişibaşı sağlık harcaması 608 Amerikan Doları'dır(WHO,2015).

AB pazarında 500.000'den fazla tıbbi cihaz ve In Vitro Diagnostik türü bulunmaktadır. Tıbbi cihazlara örnek olarak yapışkan sıvalar, kontakt lensler, X-ışını makineleri, kalp pilleri, göğüs implantları, yazılım uygulamaları ve kalça protezleri verilebilir. IVD'ler numuneler üzerinde test yapmak için kullanılır ve örnekler arasında HIV kan testleri, gebelik testleri ve şeker hastaları için kan şekeri izleme sistemleri bulunur. Tıbbi cihazlar sektörü, vatandaşlara sağlık hizmetlerinin sağlanması için çok önemlidir. Bu sektör, hem Avrupa hem de küresel ekonomide önemli bir oyuncudur (EC,2020).

Bununla birlikte sağlık hizmetleri, teknolojik gelişmeleri benimsediği kadar ileriyi düşünerek ölçülü ve kendi kuralları doğrultusunda yaklaşım sergileyen bir alandır.

İnsan sağlığının korunması, hastalık durumlarında iyileştirilmesi ve geliştirilmesi sürekliliği olan bir süreçtir. Nüfusun yaşlanmasıyla birlikte, mevcut tıbbi kaynaklar yaşlıların ve hastaların gelecekteki sağlık hizmeti gereksinimlerini karşılamada yetersiz kalacaktır. Kaynaklar sınırlıdır ve çoğu hasta için sağlık durumlarının eş zamanlı veya kısa periyodik zaman modunda izlenmesi gerekmesine rağmen ekonomik kısıtlamalar, çalışma ve diğer nedenlerden dolayı uzun süreli hastanede kalışlarının karşılanması imkansızdır.

Gelecekte tıbbi verilerin eş zamanlı uzaktan takip sistemleri ile izlenmesi, sağlık hizmetlerinin bir parçası haline gelecektir. Mevcut sağlık takip sistemleri, sağlıklı/hasta bireyi uzaktan izleyebilme olanağı sağlamasıdır. Uzaktan sağlık takip sistemleri, hastaların acil durumlarının tanımlanmasını kolaylaştırır, engelli bireylerin (zihinsel,fiziksel), rahat, konforlu ve bağımsız bir yaşam standardı için oldukça etkilidir. Sağlıklı/hasta bireyin kalbinin veya solunumunun durması, yavaşlaması, ritim bozuklukları gibi hayati durumlarının tespit edilmesi ve erken müdahale edilebilmesi olanağı sağlar. Özellikle sürekli kontrolü gereken hastalar veya durumlar için avantaj sağlar. Böyle durumlarda farklı ve çeşitli algılayıcılar sayesinde; takibi gereken kişinin yerinin belirlenmesi, fizyolojik durumunun izlenmesi gibi faaliyetlerin tespitinde doğru veri kaynağıdır.

Bu bağlamda, sağlık hizmeti uygulamalarını destekleyen WBAN/WBASN teknolojisi, hastaların tıbbi rehabilitasyonu ve takibinde ilk adımlarını atmıştır. Bu teknoloji, teşhis ve/veya terapötiklerin izlenmesi dahil olmak üzere, hasta bireyin sağlığını iyileştirmek için değerli katkılar sağlamaktadır. Ancak, altta yatan teknoloji hala erken bir geliştirilme aşamasındadır ve tipik olarak çok özel kablosuz iletişim teknolojilerine dayanmaktadır. Temelde birçok kablosuz ağ iletişim ağı protokolü içeren bir sistem olan WBAN/WBASN insan vücudu ve çevresinden aldığı sinyali toplayan, ileten bir sistemdir. Dijital ortamların insan vücudu üzerindeki etkileri hala araştırılan ve gelecekte iyi veya kötü etkilerinin belirsizliği olan yapılardır. Bu konuyla ilgili çok araştırma mevcuttur.

WBAN/WBASN teknolojisinin kendi içinde sinyal ağı ve aldığı sinyali iletirken ki aktarım yolu performansı diğer bir önemli konudur. Bilindiği üzere, insan vücudundaki sinyal ve yol kaybı, düz uzaydaki kurallardan büyük ölçüde farklıdır. Bu nedenle verilerin güvenirliği önemlidir. Yanlış ve gereksiz verinin iletilmesi, sağlık çalışanlarının yanlış bilgilendirilmesi ve gereksiz iş meşguliyeti yaratmasına, zaman kaybına neden olabileceği gibi, hastanın mağduriyetine de neden olabilir. Özellikle acil durumlar göz önüne alındığında, bilginin gerçek ve güvenilir olması esastır.

WBAN/WBASN teknolojisi aslında bir İnsan-Bilgisayar etkileşimidir. Bu nedenle WBAN/WBASN teknolojisinin kullanılabilirliği önemli bir konudur. Hem sağlık/hasta tarafından hem de sağlık profesyonelleri tarafından kullanımı kolay olmalıdır veya bu teknolojinin nasıl kullanılabilir hale getirileceği, pratikliği ve güvenliği multidisipliner çalışmalar yapılarak dizayn edilmelidir.

İnsanın özel yaşam alanına girmesi, çoğunlukla her türlü aktivitesini kayıt altına alması, WBAN/WBASN teknolojisinin kısıtlılığının yanında mahremiyet gibi etik sorunları da beraberinde getirmektedir. Bununla birlikte dijitalleşmenin getirdiği en büyük sorunlardan biri olan siber saldırılara yönelik çalışmaların önemi büyüktür.

Asıl önemle üzerinde durulması gereken bir diğer konu, bu teknolojinin sağlık bakım maliyetlerine katkısıdır. Maliyet mal veya hizmetin edinilebilmesi için katlanılan fedakarlık olarak tanımlanabilir. Maliyet; direkt, dolaylı, verimlilik ve soyut olarak değerlendirilir. Öncelikle direkt maliyeti temsil eden sağlık bakım hizmetlerine yönelik değerlendirdiğimizde WBAN/WBASN teknolojisi; tanı, teşhis ve tedavi aşamalarına olumlu etkileri vardır. Teşhis ve tedavi için sağlık kuruluşunda kullanılacak radyoloji ve laboratuvar giderlerini, ayakta/yatan hasta maliyetlerini önemli ölçüde azaltacaktır. Sağlık hizmetlerinin düşük/yüksek maliyetli olması sağlık sistemine yön veren ekonomi ve politikayı etkilemektedir. Sağlıklı/hasta açısından maliyetler, dolaylı maliyetlerdir. Bireyin sağlık hizmetlerine erişim sürecinde kaybettiği zaman, hasta ise hastalığın kötüye gitmesi nedeniyle tedavi ve bakım giderlerindeki artış, sağlık kuruluşuna gitmek için harcadığı para gibi tüm giderler dolaylı maliyetlerdir. WBAN/WBASN teknolojisi, bireyin yaşamsal alanında sağlık verilerine ulaşma imkanı sağladığı için tüm bu dolaylı maliyetlerin azalmasına etki etmektedir. Verimlilik maliyetlerine etkisi, bireye sağlık hizmetine erişimde hız kazandıracağından WBAN/WBASN teknolojisi morbidite ve mortalite oranlarına olumlu yönde etki edecektir. İnsanın en değerli varlığı olan, sağlığını koruma ve geliştirmesini sağlayacaktır. Soyut maliyetler ise hastalık durumunda gelişen acı, ağrı gibi sıkıntılarını ifade eder. WBAN/WBASN teknolojisi, teşhis ve tedaviye kazandırdığı hız ile soyut maliyetleri azaltacak, bu maliyetlerin sonucu olan iş kaybı, aile içi huzursuzluk gibi indirekt sorunların da azalmasına katkı sağlayacaktır.

Kısacası, bu tür çalışmalar hem sağlıklı/hastanın konforunu artıracak, hem de sağlık hizmeti maliyetlerini büyük ölçüde azaltacaktır.

Bunun yanında WBAN/WBASN teknolojisi, insan sağlığı için önemli olan, mesleki açıdan yetişmesi ve yetiştirilmesi uzun zaman alan sağlık profesyonellerinin zamanını daha iyi ve verimli kullanmasına katkı sağlayacak, iş süreçlerinde zaman kaybını önleyecektir. İhtiyacı olan daha çok hastaya sağlık hizmeti sağla-

nacaktır. Hasta açısından baktığımızda sağlık kuruluşuna erişim, sağlık kuruluşundaki geçirdiği zaman, ayıca ikincil enfeksiyon gibi risklerin oluşmasını büyük oranda azaltacaktır.

WBAN/WBASN teknolojisinin sağladığı bir diğer konu, salgın hastalıklardaki kazanımıdır. Hali hazırda küresel COVID-19 pandemisi nedeniyle 71 milyondan fazla kişi hastalanmış ve 1.598.104 vaka ölümle sonuçlanmıştır(www.jhu.edu,2020). Ülkemiz dahil olmak üzere dünya genelinde karantina ve evde kalma gibi süreçler yaşanmaktadır. Bu nedenle sağlık hizmeti sunucularının iş yükünün ve bakım hizmetleri maliyetlerinin azaltılması, sağlık kuruluşlarının gereksiz meşguliyetinin önlenmesi, hastalık bulaşma oranının düşürülmesi, ağır vakalara yönelik hizmet planlanması, yaşlı ve bakıma muhtaçların korunması amacıyla bu teknolojinin önemini daha da artırmaktadır. Bazı ülkelerde COVID-19 Pandemisi sürecinde bu ve benzeri teknolojiler kullanılmış ve hastalık yayılımı büyük oranda gerilemiştir. Örneğin İsrail pandemi sürecinde, yoğun bakım kapasitesini dengelemek, enfekte olmuş hastaları yönetmek ve tedavi etmek aynı zamanda ön saflarda çalışan sağlık profesyonellerini korumak için "Tele-ICU çözümü CLEW-ICU" sistemini kullanmaya başlamıştır (Lovell, 2020). Bir başka örnek ise San Diego Üniversitesi geliştirdiği uzaktan hasta takip sistemi olan "eCOVID" platformu ile hastanede yatmaya ihtiyacı olmayan COVID-19 hastalarını evlerine göndererek, kendilerine verilen giyilebilir cihaz, kalp atış hızı ve oksijen satürasyon seviyeleri gibi yaşamsal belirtilerini sürekli tıbbi takibi sağlanmıştır (www.beckershospitalreview.com,2020).

Sonuç olarak; Kısa sürede gelişen WBAN/ WBASN teknolojileri kapsamı, işlevi ve etkinliği her geçen gün artmakla birlikte, gelecekte sağlık hizmetinde geniş uygulama alanlarında kullanılacağı yönündedir. Sağlık profesyonellerinin işini kolaylaştıracağı gibi sağlık hizmetlerinin yeniden yapılanmasında da etkili olacağı ortadadır. Sağlık sektörü açısından WBAN/WBASN teknolojisinin gelişmesi heyecan vericidir ve desteklenmelidir.

KAYNAKÇA

Alemdar, H. Ersoy, C. (2010)."Wireless Sensor Networks for Healthcare: A Survey", Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, Volume 54, Issue 15.

Bölükbaşı, O.(2014). Nöroloji Tarihinden, Türk Nöroloji Dergisi. Türk Nöroloji Derneği Yayını, 20(1):I-0.

Cao H., Leung V., Chow C., Chan H.(2009). Enabling Technologies for Wireless Body Area Networks: A Survey and Outlook. IEEE Commun. Mag. ;47:84–93.

Custodio,V. Herrara,F.J. Lopez,G. Ignacio,J.(2012). A Review on Architectures and Communications Technologies for Wearable Health-Monitoring Systems. https://doi.org/10.3390/s121013907

Gupta,S.K.S, Mukherje, T. Venkatasubramanian, K.K. (2013). Body Area Networks, Safety, Security and Sustainability, Cambrdge University Press, UK.

Ferreira,V. Munchaluat-Saade,D. Albuquerque.C, (2020). B-move: A Transmission Scheduler Based on Human Body Movement for WBANs. Doi: 10.1109/CBMS49503.2020.00066

Filipe,L. Fdez-Riverola,F. Costa,N. Pereira,A. (2015). Wireless Body Area Networks for Healthcare Applications: Protocol Stack Review, Internatiol Journal of Distributed Sensor Networks. https://doi.org/10.1155/2015/213705

Han,R.A. Pathan,E-S,H. (2018). The State-of-The-Art Wireless Body Area Sensor Networks: A Survey. https://doi.org/10.1177/1550147718768994

Hasan,K. Biswas,K. Ahmet,K. Nafi,N.S. Islam,M.S. (2019). A Comprehensive Review of Wireless Body Area Network.Journal of Network and Computer Applications. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.06.016.

Hernandez,M. Mucchi, L. (2014). Body Area Networks Using IEEE 802.15.6 TM, ss:1-44 Doi: https://doi.org/10.1016/C2011-0-07212-5

Jovanov, E. Milenkovic, A. Otto, C. C de Groen, P. (2005). A Wireless Body Area Network of İntelligent Motion Sensors for Computer Assisted Physical Rehabilitation. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, Doi:10.1186/1743-0003-2-6

Karulf, E. (2008). Body Area Networks(BAN), CSE574S: Wireless and Mobile Networking. https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-08/ftp/ban/index.html#toc (Erişim Tarihi: 13 Aralık 2020).

Lovell,T.(2020). Two Israeli Hospitals Launch AI-Based Tele-ICU to Support COVID-19 Patients. https://buildinghealth.eu/two-israeli-hospitals-launch-ai-based-tele-icu-to-support-covid-19-patients/ (Erişim Tarihi:18 Aralık 2020).

Majumder.S, Mondal.T, Jamal Deen.M, (2017). Wearable Sensor for Remote Health Monitoring, Sensors. Doi: https://doi.org/10.3390/s17010130

Movassaghi,S. Arab,P. Abolhan, M. (2012). Wireless Technologies for Body Area Networks: Characteristics and Challenges. 2012 International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT).

Öztürk, Y.E, Kıraç, R,(2019). Sağlık ve Hastalık, Scientific Development, Gece Akademi, Ankara.(ss 382-389).

R. A. Lima, V. C. Ferreira, E. Caballero, C. V. Albuquerque, and D. Muchaluat-Saade.(2019).Simulation of ISO/IEEE 11073 Personal Health Devices in Wbans, in Proceedings of the 22nd ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM 2019).

Soylu,T.(2012). Kablosuz Algılayıcı Ağların Uygulama Alanları ve Bir Algılayıcı Düğüm Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Edirne ss.5

Tengilimoğlu, D. (2009). Sağlık İşletmeleri Yönetimi, Nobel Yayınları, Ankara.

Uğurlu, M.C,(1997). Hipokrat, Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi Mecmuası, Cilt 50,Sayı 2, ss: 67-78.

Yick, J, Mukherjee, B, Ghosal, D.(2008) Wireless sensor network survey. Comput Netw . 52(2): 2292–2330

STM-Thinktech Teknoloji Düşünce Merkezi.(2019). İleri Sağlık Teknolojileri I, Akıllı Sağlık Uygulamaları ve Veri Analizi ile Sağlık Sorunlarını Tanımlamak, Araştırma Raporu Mayıs, 2019. https://thinktech.stm.com.tr/detay.aspx?id=235 (Erişim Tarihi: 18 Aralık 2020).

Business Insider, The Technology, Devices, and Benefits of Remote Patient Monitoring in The Healthcare İndustry. https://www.businessinsider.com/remote-patient-monitoring-industry-explained?r=US&IR=T (Erişim Tarihi: 18 Aralık 2020)

The Journal of mHealth, The Rise of Remote Patient Monitoring. https://thejournalofmhealth.com/the-rise-of-remote-patient-monitoring/ (Erişim Tarihi: 18 Aralık 2020).

World Health Organization, Ten Threat to global health in 2019, https://www.who.int/news-room/spotlight/ten-threats-to-global-health-in-2019 (Erişim Tarihi:12 Aralık 2020)

World Health Organization, (2020). https://www.who.int/health-technology-assessment/about/healthtechnology/en/ (Erişim Tarihi: 5 Aralık 2020)

World Health Organization, 2015 Global Survey on Health Tecnologiy Assessment by National Authorities, Main Finding. https://www.who.int/health-technology-assessment/MD_HTA_oct2015_final_web2.pdf?ua=1 (Erişim Tarihi: 5 Aralık 2020).

World Health Organization, Health Technology Assessment Country profile, https://www.who.int/health-technology-assessment/country-profile/htatr.pdf?ua=1 (Erişim Tarihi: 5 Aralık 2020).

Johns Hopkins University, https://coronavirus.jhu.edu/map.html (Erişim Tarihi: 12 Aralık 2020)

CGI, Healthcare Challenges and Trends, The Patients at the Heart of Care, https://www.cgi.com/sites/default/files/white-papers/cgi-health-challenges-white-paper.pdf (Erişim Tarihi: 5 Aralık 2020).

European Commission, https://ec.europa.eu/health/md_sector/overview_en (Erişim Tarihi: 6 Aralık 2020).

World Health Organization, Cardiovascular Diseases(CVDs), https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds) (Erişim Tarihi: 13 Aralık 2020).

Becker's Health IT, https://www.beckershospitalreview.com/digital-transformation/uc-san-diego-builds-automated-remote-monitoring-platform-for-at-home-covid-19-patients.html (Erişim Tarihi: 18 Aralık 2020).

BÖLÜM 13
3B YAZICILAR VE 3B METAL YAZICILARDA BASKI HATALARININ İNCELENMESİ

Alper ÖNER[1], Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA[2]
[1]Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, İstanbul / TÜRKİYE
[2]Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, İstanbul / TÜRKİYE

Öz: İmalat sanayinde bir çok proses imalatın gerçekleştirilmesi için kullanılır. Bunların en başında talaşlı imalat sanayisi gelir. Teknolojinin her geçen gün daha da gelişmesinin sonucunda imalat prosesleri de gelişmiş ve erilmiştir. Bu imalat yöntemlerinden bazıları talaşsız imalat yöntemleri; döküm, saç kalıpçılığı, haddeleme, dövme, toz metalurji, talaşlı imalat yöntemleri ise; tornalama, frezeleme, raybalama, matkap, taşlama vs. olarak sıralanabilir. Günümüzde en yaygın olan imalat metodu ise talaşlı imalat metodudur. Bunun yanında farklı metodlarda imalat işlemleri esnasında kullanılır. 3B yazıcılar da teknolojinin ilerlemesi ve 1984 yılında Charles Hull tarafından geliştirilmeye başlandı. Bu araştırmamda 3B metal yazıcılarda baskı esnasında meydana gelen hataların incelenmesi nedenlerinin tespit edilmesi ve hataların giderilmesi için yapılması gereken çalışmalar incelenmiştir. 3B Metal yazıcılar günümüzde teknolojileri yaygın hale gelmeye başlamıştır. Büyük şirketler bu teknolojiye ciddi yatırımlar yapmışlardır. 3B elektron ışını ile eritme ve doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) çalışmaları hususunda yeni birçok teknoloji uygulanmaktadır. Uygulanan bu yeni teknolojiler sonucunda birçok baskı hataları da beraberinde gelmektedir. Çalışma yapılırken işlem sıcaklığı, Sıcaklık sonucu parçanın genleşmesi ve büzülmesi (Artık Stres), Çatlaklar, Gözenekler oluşmaktadır. Bu tür problemleri gidermek için ve çarpılmaları önlemek için destek parçaları geliştirilmiştir. Yüzey Kaplama çalışmaları yüzeyde oluşan hatalar ve ölçü tamlığı sağlanmıştır.

GİRİŞ ve KURAMSAL ÇERÇEVE

3B YAZICILAR

Geleneksel üretim, bugün dünyamızı mümkün kılan sanayi devrimini özendirdi, ancak yeni yaklaşımlara duyulan ihtiyaca işaret eden içsel sınırlamalar içeriyor. Döküm, şekillendirme, kalıplama ve makineyle işleme; takım, makine, bilgisayar ve robotları içeren karmaşık süreçlerdir. Nihai ürünler, üretim süreçlerinde kullanılan aletlerin yetenekleri ile sınırlıdır.

Aksine, AM, her seferinde bir kesit katmanı malzeme ekleyerek aşağıdan yukarıya veya yukarıdan aşağıya nesneler oluşturan yeni ortaya çıkan bir teknoloji grubudur. AM teknolojilerinin genelleştirilmiş adımları Şekil 1'de gösterilmektedir (Campbell, Williams, Ivanova, Garrett, 2011).

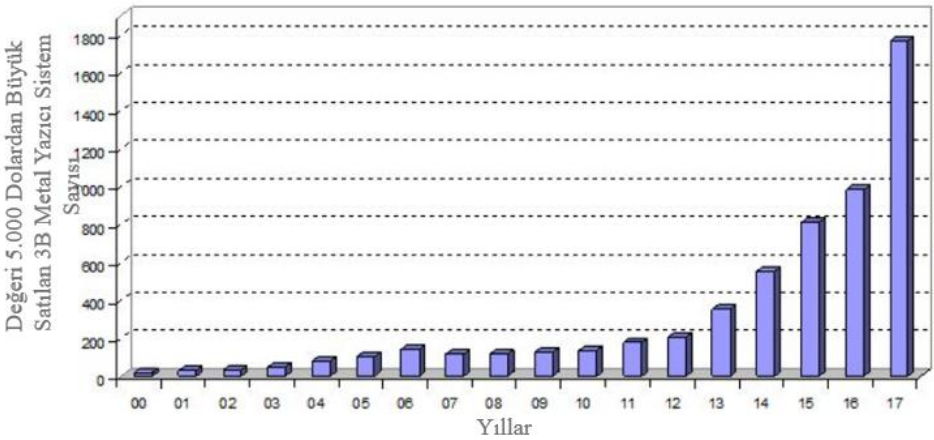


Şekil 1. Tasarımdan Ürüne Katmanlı İmalat Prosesi

AM süreci, genellikle bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı veya mevcut bir yapının taranması ile oluşturulan nesnenin bir 3B modeli ile başlar. Özel yazılım, bu modeli kesit katmanlarına bölerek AM makinesine gönderilen bir bilgisayar dosyası oluşturur. AM makinesi daha sonra, malzemenin seçici yerleştirilmesi (veya şekillendirilmesi) yoluyla her katmanı oluşturarak nesneyi oluşturur.

Günümüzün başlangıçta prototip üretiminde kullanılan makineler olan 3B yazıcılar ilk olarak Chuck Hull tarafından 08.08.1984 tarihinde Amerika patenti alması ile duyuldu (Hull, 1984). Hayatımıza girmesi ancak sanayi ölçekteki gelişimini 1987'de tamamlaması ile mümkün olmuştur. Bu ilk 3B yazıcı patent sahibi Chuck Hull'ın piyasaya sürdüğü stereolitografi (SLA) makinesidir. Daha sonra Stratasys firması Fused Deposition Modelling (FDM) 2000'lerden sonra 3B Systems firması Selective Laser Sintering (SLS) ve birçok firma çok çeşitli besleme

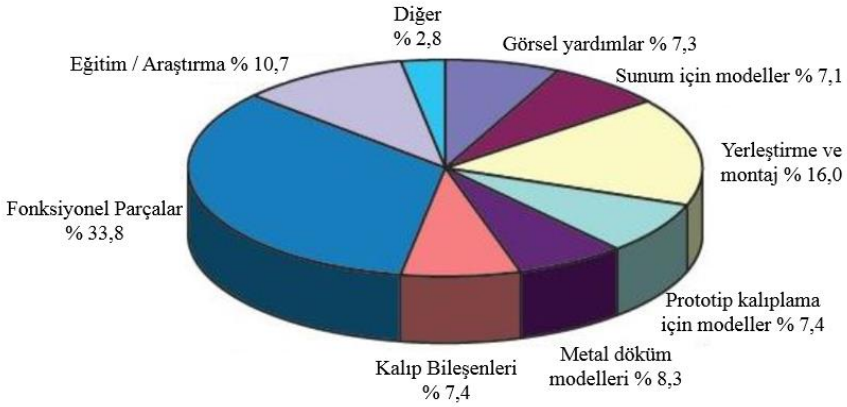
yöntemi ve beslenen malzeme farklı olmak üzere birçok 3B yazıcılar piyasaya çıkmıştır. 3B yazıcıların yaygınlaşmasında en önemli rollerden biriside kullanılan patentlerin 2010'lu yıllara yakın kullanım sürelerinin dolup devre dışı kalmalarıdır. RepRap firması 3B yazıcıların bazılarının fiyatlarını yaklaşık olarak yüz kat aşağı oluşturabilip piyasaya sürmüştür. Bu tip ucuzlamalar ve üretimin artışları 3B yazıcıların yaygınlaşmasını ve ilerlemesini sağlamıştır. Dünyada bu konuda en iyi araştırmaları yapan Wohlers şirketi 2016'da 97 şirketten 2017'de dünya çapında 135 şirketin endüstriyel düzeyde 3B yazıcı sistemleri ürettiğini ve sattığını tespit etmiştir. Bu sistemler, 5.000 dolardan fazla satış yapan makineler olarak tanımlanıyor. Yeni sistem üreticileri 3B yazıcı pazarına baş döndürücü bir hızla girerken, açık malzeme platformlarına, daha yüksek baskı hızlarına ve daha düşük fiyatlara sahip makineleri piyasaya sürmektedirler. Aşağıdaki Şekil 2'den de görüleceği gibi 2016'daki 983 Metal 3B yazıcı sistemine kıyasla 2017'de tahmini 1.768 Metal 3B yazıcı sistem satılmıştır. Bu da yaklaşık % 80 artış anlamına gelmektedir. Metal AM sistem kurulumlarındaki bu çarpıcı artış, ileride daha fazla iş olmasına rağmen, metal 3B yazıcılarda iyileştirilmiş proses izleme ve kalite güvence önlemlerinden etkilemektedir. Küresel üreticiler, 3B yazıcı (eklemeli üretim) yoluyla metal parça üretmenin faydalarının giderek daha fazla farkına varmaktadır (Wohlers Report, 2018).



Şekil 2. 2000 Yılından 2018'e Kadar Dünya Çapında Satılan 5.000 Dolardan Büyük 3B Metal Yazıcı Sistemi Sayısı

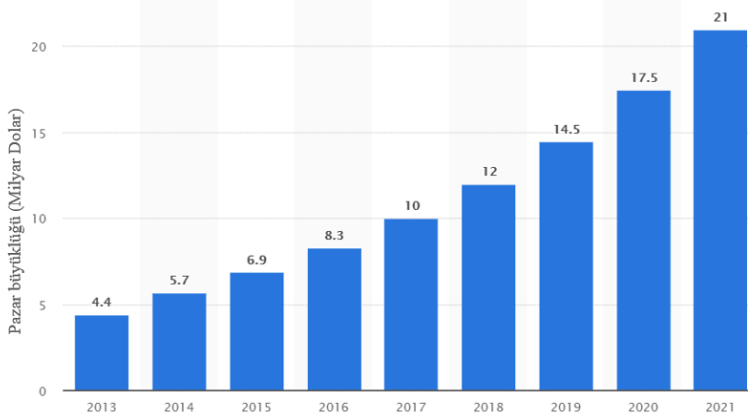
3B yazıcıların kullandığı malzeme çeşitliliği ve özellikle metal kullanan makine çeşitliliğin artması ile birlikte kullanım alanlarında büyük değişiklikler ol-

muştur. Başlangıçta sadece reçine ve plastik ile sadece prototip için kullanılabiliyorken günümüzde firmalar birçok farklı amaçlar kullanmaktadır. Wohlers (2018) aşağıda Şekil 3'de verildiği gibi bu dağılımı göstermiştir.



Şekil 3. Kuruluşların 3B Yazıcıları Hangi Amaçla Kullandıkları

Sayısal büyüklüğün yanı sıra 3B yazıcı pazarı ekonomik olaraktan da hızla gelişim göstermektedir. Statista'nın internet sayfasında Holst'un (2020) 2013 yılından 2021 yılına kadar dünya çapında 3B yazıcı pazar büyüklüğü çalışmasında da benzer bir gelişme görülmektedir. Aşağıda bu gelişen 3B yazıcı pazarının büyüklüğü yıllara karşı milyar dolar olarak Şekil 4'de verilmiştir (Holst, 2020)



Şekil 4. 2013'ten 2021'e Kadar Dünya Çapında 3B Yazıcı Pazarı Büyüklüğü

Bu kadar hızlı gelişen, yaygınlaşan ve Sanayi 4.0'ın en önemli unsurlarından olan 3B yazıcıların gücünün altında yatan gerçekler incelendiği zaman bunların nelerden kaynaklandığı aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

Malzeme seçenekleri: Önceleri plastik ağırlıklı olmakla beraber günümüzde metal kullanımı da yaygınlaşmıştır. Esas olarak plastikler ve çeşitli dolgulu tipleri, metaller ve yüksek entropili olanlar dâhil metallerin çeşitli alaşımları, çeşitli seramikler, polimerler ve çeşitli bağlayıcılar ile kullanılabilen malzemelerin hepsi 3B yazıcılarda kullanılabilmektedir. Son zamanlarda iki farklı malzemeyle (Sert plastik - SLA ve yumuşak esnek elastomer malzeme - FDM) önce birini kullanıp sonra üzerine ikinci malzemeyi kullanarak sırası ile olarak üretim yapabilen Hibrid 3D yazıcılar geliştirilmiştir (Ruiz, Kadimisetty, Yin, Mauk, Zhao, Liu, 2020).

Malzeme şekilleri: Malzemelerin tel veya filament hali, toz halleri, levha halleri ve bazılarının sıvı halleri kullanılabilmektedir.

Tasarım ve modelleme serbestliği: Hayalinizin alabileceği makul boyuttaki tüm şekiller, onların kafes veya diğer hallerdeki yapılanmaları, kendini taşıyabilsin veya taşıyamasın (destek ile üretimde mümkün) üretimlerini mümkün kılar. Eskiden bunlar el işçiliği ve bilinen üretim çeşitleri ile çok uzun süreçlerde ve yüksek maliyetlerde üretilmeye çalışılırdı. Solid model dışında karmaşık bir kafes yapının üretilmesi neredeyse imkânsızdı. 3B yazıcıların kullanımından önceki yıllarda yeni ürün tasarımı, modellemesi ve prototipinin üretilme süreci en uzun ve maliyetli süreçlerden biri olmaktaydı.

Uygulama alanları: Bu kadar geniş imkânları olan ve özellikle tek veya birkaç adet özel imalata da imkân veren bu teknolojik makineler, havacılık, uzay, otomotiv, mimari, inşaat, tıp, biyoteknoloji, endüstriyel tasarım, moda tasarımı, gıda ve suni uzuv ve belki ileride organ üreten sanayilerde kullanılmaktadır.

Üretin esnekliği: 3B yazıcılar bir adette olsa binlerce adette olsa çok yakın üretim maliyetlerinde üretebildikleri için artık seri üretimlerde daha fazla kullanılmaktadır. Satış rakamlarındaki ve üretim kapasitelerinin artmasındaki en önemli pay artık seri üretim amaçlı kullanımlardan kaynaklanmaktadır.

3B yazıcı ve üretici çeşitliliği: Günümüzde yoğun olarak kullanılan 3B yazıcıların özelliklerine göre çeşitleri derlenerek aşağıda Tablo. 1'de geniş olarak verilmiştir (URL 1).

Tablo 1. Eklemeli İmalat Çeşitleri

Katılaştırmanın yöntemi	Konturun Elde Edilmesi	Yöntemi	Sistemin Kısaltması ve İsmi	Yöntemin Gerçekleştirilmesi
Polimerizasyon	Lazer yazıcı kafa, Dijital projektör	Stereolitografi, Polimer Jet	SLA (Laser Stereolithography,Multi-Jetting), DLP (Digital light processing)	Karıştırılmış reçine polimerleştirilerek sertleştirilip imalat yapılır.
Seçmeli Ergitme Seçmeli Sinterleme Yeniden Katılaştırma	Lazer, IR Kaynak, Elektron Demeti	Lazerle Sinterleme, Lazerle Ergitme	SLS (Selective Laser Sintering), SLM (Selective Laser Melting), MJF (Multi Jet Fusion), EBM (Electron Beam Melting)	Tabaka olarak serilmiş olan metal tozlar lazer, IR kaynak,elektron demeti ile sinterleştirilerek,eritilerek katman oluşturulur.
Tabaka yapıştırma ile oluşturma ve kesme	Lazer, Bıçak, Freze	Katman Lamine Üretimi	LOM (Laminated Object Manufacturing)	Film, levha veya folyo halindeki tabakalar yapıştırılarak katman oluşturulur ve kesilir.
Seçmeli bağ oluşturma, Bağlayıcı ile yapıştırma	Çoklu Nozul Yazıcı Kafa	3B Yazıcı (3B Printer)	3BP (Three Dimensional Printing)	Çoklu kafa kullanımı ile filamentlerin şekil ve katman oluşturulması
Termal aktivite halinin seçici uygulamaları	Tekli Nozul	Ergitilmiş Katmanla Üretim	FDM (Fused Deposition Modelling)	Filament kafada eritilerek platform üstünde bulunan işin üzerine serilerek imalat

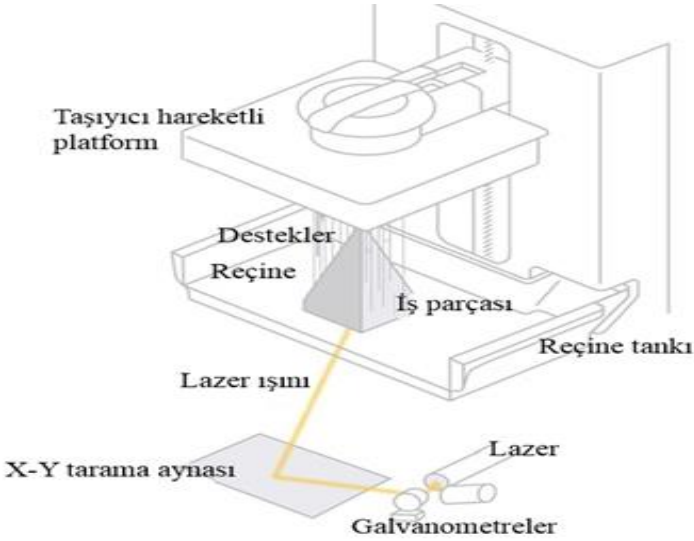
Eritip yığma, yeniden katılaştırma	Lazer, Elektron Demeti	Lazer veya elektron demeti ile ergitme	LMD (Laser Melting Deposition), LENS (Laser Engineered Net Shaping), EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing)	Taşıyıcı gaz ve metal tozları kafadan püskürtülürken lazer veya elektron demeti ile eritilip istenilen yere yığılarak imalat yapılır

Tablo 1'de belirtilen 2D yazıcıların, çalışma prensiplerini, kullanıldığı yerleri, kullandığı hammadde çeşidini ve özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

Stereolitografi (SLA)

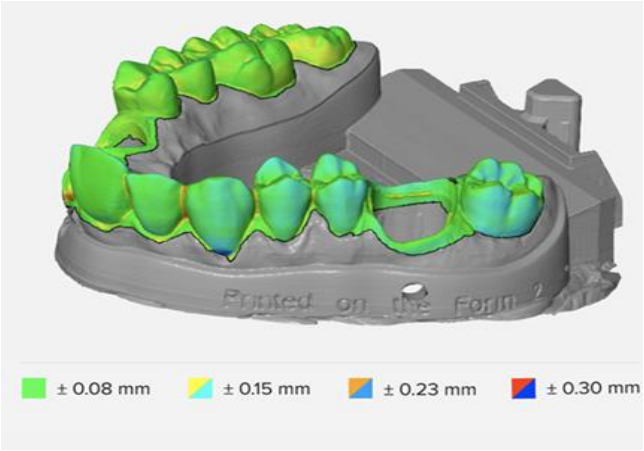
Stereolitografi terimi, bu konudaki patentin, ilk ultraviyole ışıkla çalışan teknolojinin ve 1986 kurulmuş olan ilk ticari şirket 3D Systems'in sahibi Chuck W. Hull'a aittir. SLA özelikle patentin dolmasından sonra hem ucuzlamış hem de değişikliklere uğramıştır. Halende uğramaktadır. Birçok firma daha ucuz olan LCD teknolojisini geliştirmiş, Formlabs firması ise baskı kalitesini yükseltmek için esnek bir tank ve doğrusal aydınlatma kullanan gelişmiş bir SLA biçimi olan Düşük Kuvvetli Stereolitografi (LFS) teknolojisini geliştirmiştir(URL 2).

Stereolitografi,genellikle reçine 3B baskı olarak bilinen, vat (reçine dolu kap) foto-Polimerizasyon tipi bir eklemeli üretim teknolojilerindendir. Bu makinelerin tümü, ışığa duyarlı termoset sıvı reçineyi sertleştirilmiş plastiğe dönüştürmek için lazer ışık kaynağı kullanılarak aynı prensip üzerine Şekil 5'te ki gibi inşa edilmiştir. Fiziksel farklılaşma, ışık kaynağı, yapı platformu ve reçine tankı gibi çekirdek bileşenlerin düzenlenmesinde yatmaktadır (URL 2).



Şekil 5. SLA 3B Yazıcının Basit Şekli

3B SLA yazıcının çalışması: Şekil 5'te gösterilen hareketli platforma bağlı destekler reçineye daldırılır ve en alt katmanı oluşturacak şekilde lazer ışınını galvanometreler ve X-Y tarama aynası vasıtası ile reçine tankına alttan yansıtır. Işığa duyalı reçine sertleşerek en alt katmanı oluşturur. Taşıyıcı hareketli platform bir kademe üste çıkar ve aynı işlem ikinci katman için başlar. 3B baskı bitince üretilen iş parçası desteklerden temizlenir ve özel bir sertleştirme, boyama vb gibi işlemler gerekiyorsa yapılır. Stereolitografi yöntemiyle üretilen parçaları, tüm 3B baskı teknolojilerinin en yüksek çözünürlüğü ve doğruluğuna, en keskin ayrıntılarına ve en pürüzsüz yüzey oluşturmaya sahiptir, aşağıda Şekil 6'da dişçilikte kullanılan Stereolitografi ile üretilmiş bir takma diş protezi minimal düzeydeki hataları ile birlikte verilmiştir. Ayrıca stereolitografinin bir güçlü yanı da çok yönlü olmasından kaynaklanmaktadır (URL3).



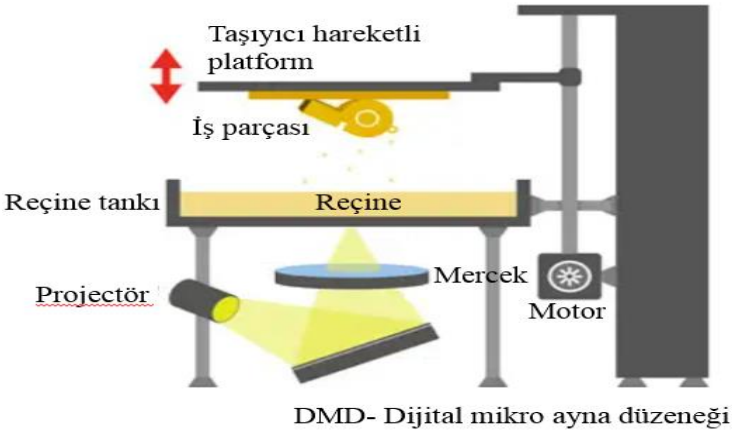
Şekil 6. Stereolitografi Yöntemi ile Üretilmiş Diş Protezi Ve Minimal Hataları

Diğerlerine göre bir lazer ışını kadar hassas olabilmesi (en küçük 25 mikron) aynı zamanda yavaş olması anlamına gelmektedir. Üretimin uzun sürmesi ve reçine maliyetinden dolayı diğerlerine göre daha pahalı durumdadır (URL 4).

Malzeme üreticileri, standart, mühendislik ve endüstriyel termoplastiklerle eşleşecek çok çeşitli optik, mekanik ve termal özelliklere sahip Stereolitografi için reçineler piyasaya çıkarmışlardır. Daha gelişmiş reçineler, prototip oluşturmanın ötesinde, endüstrilerdeki üretim ve son kullanım parçalarında uygulamaların önünü açtığı için artık SLA tipi 3B yazıcılar endüstride seri imalatta da yaygın kullanılmaktadır. Buna örnek geliştirilmiş seramik reçine verilebilir. Bu reçine ile taş benzeri bir yüzeyle 3B parçalar üretilebilmektedir. Bu da tamamen seramik bir parça oluşturmak anlamına gelmektedir (URL 2).

Dijital ışık işleme (DLP- Digital light processing)

Dijital Işık İşleme, DLP 3B yazıcılarda kullanılan bir üç boyutlu baskı teknolojisidir. Nesne, UV ışık kaynağı olarak bir dijital ışık projektörü kullanılarak bir foto-reaktif reçinenin katılaşması ile oluşturulur. DLP 3B yazıcıda kullanılan projektör normal bir video projektörü olabilir, çözünürlüğü 3B baskı çözünürlüğünün kalitesi ile belirlenmektedir. DLP 3D yazıcılar, SLA 3D yazıcılarda kullanılan lazerlerin yaptığı gibi reçine katmanını nokta nokta değil belli bir yüzeyi sertleştiren ışık projektörü sayesinde özellikle üstün baskı hızları nedeniyle fazla hassasiyet aranmayan durumlarda daha tercih edilmektedir. DLP 3B yazıcının basit şekli aşağıda Şekil 7'de verilmiştir (URL 5).



Şekil 7. DLP 3B Yazıcının Basit Şekli

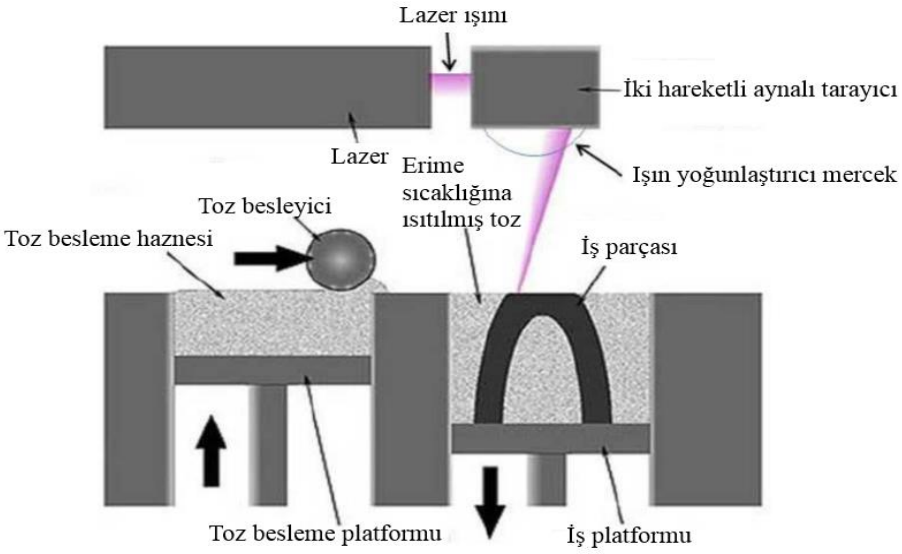
DLP'nin çalışması: Dijital ışık projektörü tarafından yansıtılan ışık demetini DMD (binlerce mikro aynadan oluşur) tam istenilen yerlere doğru altı ışık geçirgenliğine sahip şeffaf içi reçine dolu kazana gönderir. Alt tabaka DMD'den yansıyan ışıkla sertleşince hareketli platform yazdırılan tabakanın olduğu iş parçasını bir katman yukarı kaldırır. Yüksek viskositeli reçinelerde reçinenin doldurabilmesi için fazla yukarı çekilip tekrar birkatman mesafeye dönülür. Bu şekilde son katmana kadar olay tekrarlanır (URL 6). Bazı şirketler, kauçuk ve termoplastik gibi malzemeleri de kullanabilen DLP 3B yazıcılar üretmektedir.

LCD - LCD 3B yazdırma SLA ve DLP'ye göre daha az yaygındır. Neredeyse DLP ile aynıdır. Aynı zamanda reçine tankında tüm katmanları yanıp söner, ancak UV ışığı bir projektörden değil bir LCD'den (bir dizi LED'den gelen) gelir. LCD ekran, yalnızca geçerli katman için gerekli pikselleri ortaya çıkaran bir maske görevi görür. Bu nedenle, hem SLA hem de DLP'de olduğu gibi ışığı yönlendirmek için özel bir cihaz gerekmez (URL 6). LCD 3B yazıcılar SLA ve DLP yazıcılardan çok daha ucuzdur birkaç bin dolara Avrupa yapısı masa üstü tipleri alınabilmektedir (Cherdo, 2020). CLIP (Continous Liquid Interface Production) - Sürekli Sıvı Arayüz Üretimi, sıvı reçine banyosunun altındaki oksijen geçirgen, UV geçirgen bir pencereden bir dijital ışık projektörü tarafından oluşturulan sürekli bir UV görüntü dizisini yansıtarak çalışır. Pencerenin üzerinde oluşturulan ölü bölge, parçanın altında sıvı bir ara yüz sağlar. Ölü bölgenin yukarısında, sertleştirme kısmı reçine banyosundan çekilir (URL 7) .

SEÇİCİ LAZER SİNTERLEME (SLS)

Seçici lazer sinterleme, toz haline getirilmiş plastik malzemeyi bir 3D modele dayalı katı bir yapıya sinterlemek için bir lazer kullanan bir eklemeli üretim (AM) teknolojisidir. SLS 3D baskı, onlarca yıldır ürün geliştirmede mühendisler için popüler bir seçim olmuştur. Parça başına düşük maliyet, yüksek üretkenlik ve yerleşik malzemeler, teknolojiyi hızlı prototiplemeden küçük parti veya köprü imalatına kadar bir dizi uygulama için ideal hale getirmiştir (URL 8).

Seçici lazer sinterleme (SLS), 1980'lerin ortasında Austin'deki Texas Üniversitesi'nde Dr. Carl Deckard ve Dr. Joe Beaman tarafından geliştirilen ilk katmanlı üretim tekniklerinden biriydi. Yöntemleri o zamandan beri plastikler, metaller, cam, seramikler ve çeşitli kompozit malzeme tozları dahil olmak üzere bir dizi malzeme ile çalışmak üzere uyarlanmıştır. Bugün, bu teknolojiler toplu olarak toz yatağı füzyonu - termal enerjinin bir toz yatağının bölgelerini seçici olarak birleştirdiği katmanlı üretim çeşitleri olarak lanse edilmektedir (URL 8). Aşağıda Şekil 8'de Seçici lazer sinterleme 3B yazıcının basit şekli verilmiştir (Legutlo, 2018).



Şekil 8. Seçici Lazer Sinterleme (SLS) 3B Yazıcının Basit Şekli

Seçici lazer sinterleme (SLS) 3B yazıcının çalışma prensibi: Yazıcı tarafından önceden hammaddenin erime noktasının hemen altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılan toz, yapı haznesinin içindeki platformun üstüne ince bir tabaka halinde toz besleyici tarafından serilir. Lazer, 3B modelin bir kesitini tarar ve tozu, malzemeyi

hemen hemen erime noktasına kadar ısıtır. Bu, tek bir katı parça oluşturmak için parçacıkları mekanik olarak bir araya getirir. Kaynaşmamış toz, baskı sırasında parçayı destekler ve özel destek yapılarına olan ihtiyacı ortadan kaldırır. İş platformu, tipik olarak 50 ila 200 mikron arasında olmak üzere iş bölmesine bir katman alçalır ve bir yeniden kaplama, üstüne yeni bir toz malzeme katmanı uygular. Lazer daha sonra yapının bir sonraki kesitini tarar. Bu işlem parçalar tamamlanıncaya kadar her katman için tekrarlanır ve biten parçalar yazıcının içinde yavaş yavaş soğumaya bırakılır. Parçalar soğuduktan sonra, operatör iş bölmesini yazıcıdan çıkarır ve bunu bir temizleme istasyonuna aktararak, basılı parçaları ayırır ve fazla tozu temizler (URL 8).

Çok Başlıklı Püskürmeli (MJF – Multi Jet Fusion)

Çok başlıklı Püskürmeli 3B yazıcılarda genellikle iki veya daha fazla püskürtme kafası bulunur. Bir kafa yapı malzemesini püskürtmek içindir, diğer kafalar destek malzemesini püskürtmek içindir. Çok sayıda baskı kafasına sahip yazıcılar çok malzemeli ve çok renkli nesneler basabilir.

Çalışma prensibi: Önce ince bir toz tabakası, neredeyse sinterleme sıcaklığına ısıtıldığı yapı platformunun üzerine yayılır. Mürekkep püskürtmeli püskürtme uçlarına (Masaüstü 2D yazıcılarda kullanılan püskürtme uçlarına benzer) sahip bir taşıyıcı, yatağın üzerinden geçerek tozun üzerine kaynaştırıcı madde bırakır. Aynı zamanda, sinterlemeyi engelleyen bir detaylandırma ajanı, parçanın kenarına yakın bir yerde basılır. Yüksek güçlü bir IR enerji kaynağı daha sonra inşa yatağının üzerinden geçer ve tozun geri kalanını değiştirmeden bırakırken kaynaştırma ajanının dağıtıldığı alanları sinterler. İş parçasını taşıyan platform bir katman kadar aşağı hareket eder ve işlem, tüm parçalar tamamlanana kadar tekrar etmektedir.

Aşağıda Şekil 8'de HP Çok Başlıklı Püskürtmeli 3B yazıcının çalışmasının iki sahnesi verilmiştir. Sağ tarafta olan birincisinde iş parçası bir katman aşağı inmiş aşağı yukarı hareket eden yazıcı püskürtme başlığı beyaz renkli kaplama gibi gözüken reçineyi püskürtüyor. Solda olan ikincisinde IR enerji kaynağını taşıyan sağ - sol çalışan başlık geri dönerken reçinenin olduğu katmanı sertleştiriyor. Aşağı yukarı çalışan başlık bir hareketinde (Aşağı veya yukarı) reçineyi püskürtmektedir. IR enerji kaynağını taşıyan sağ - sol çalışan başlık sağa giderken reçinenin olduğu katmanı biraz sertleştirebilmektedir. Geri dönüp sola giderken Şekil 9'da da görüldüğü gibi tam sertleştirmektedir. (URL 11.)

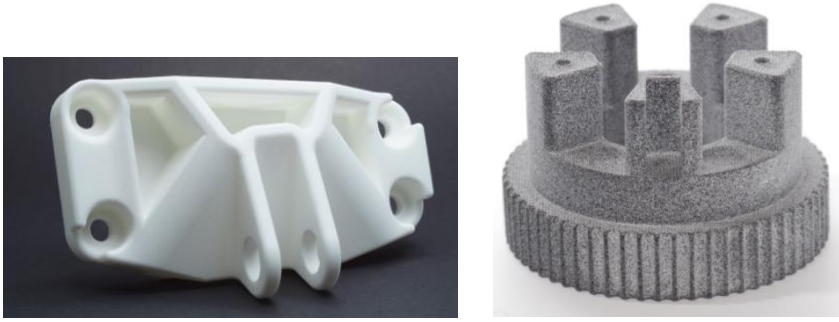


Şekil 9. HP Çok Başlıklı Püskürtmeli 3B Yazıcının Çalışmasının İki Sahnesi

SLS' ye çok benzer yapıda olduğu için SLS ile farklarını incelemiştir. Hem MJF hem de SLS'de kullanılan malzemeler granüler bir formda gelen termoplastik polimerlerdir (genellikle Naylon). MJF ve SLS arasındaki temel fark ısı kaynağıdır. SLS, her bir kesiti taramak ve sinterlemek için bir lazer kullanırken, MJF'de kızılötesi ışığın emilimini destekleyen toz üzerine bir mürekkep (kaynaştırıcı madde) dağıtılır. Bir kızılötesi enerji kaynağı daha sonra bina platformunun üzerinden geçer ve mürekkepli alanları birleştirir. SLS'ye benzer şekilde, basılı parçalar tozla kaplanmıştır ve çıkarılmadan önce soğumaları gerekir. SLS'de her bir kesit nokta nokta kaynaştırılırken, MJF'de kaynaştırma satır bazında gerçekleşir. Bununla birlikte, her iki işlem için de aynı olan toplam baskı süresini esas olarak belirleyen yeniden kaplama aşaması (ve toplam katman sayısı) olduğundan bu, baskı süresini önemli ölçüde değiştirmez. MJF'nin SLS'den önemli ölçüde daha hızlı olduğu yönlerden biri de hazne soğutma ve işlem sonrasıdır. HP, yazdırılan bölmenin soğutma hızını artıran ve tozun çıkarılmasına yardımcı olan özel bir son işlem istasyonu bulunmaktadır. MJF'de geri kazanılan tozun % 80-85'i geri dönüştürülebilirken ve yeniden kullanılabilirken, SLS'de toz yalnızca % 50 geri dönüştürülebilmektedir. Daha hızlı soğutma süreleri ve daha fazla geri dönüştürülebilirlik, MJF makine operatörlerinin, bölme yalnızca kısmen dolu olduğunda bir işe başlamak için daha az tereddütlü oldukları, SLS makine operatörleri ise yazdırmaya başlamadan önce genellikle bir bölmenin dolmasını bekleyeceği anlamına gelir. İş akışındaki bu temel fark, daha kısa teslim sürelerine neden olmaktadır (URL 10.).

MJF, SLS'ye göre daha yüksek boyutsal doğru imalat yapmaktadır ve bitmiş iş parçasının yüzey kalitesi çok daha iyidir (Cai ve Diğ. 2021). Her ikisi de destek parçasına ihtiyaç duymaz. Her ikisi de eğilmeye karşı hassastır, bu nedenle geniş düz alanlardan kaçınılmalıdır. MJF parçalarının SLS ile yazdırılan parçalara göre

bükülmeye daha yatkın olduğunu görülmüştür. Püskürtülen ajan siyah renkli olduğu için MJF'nin iş parçası gri renkli çıkar. Her ikisinden de çıkan parçalar aşağıda Şekil 10'da gösterildiği gibi kum desenli gibidir (URL 10.).



Şekil 10. Seçici Lazer Sinterleme (SLS) Ve Çok Başlıklı Püskürtmeli 3B Yazıcılardan Çıkan Parçalar

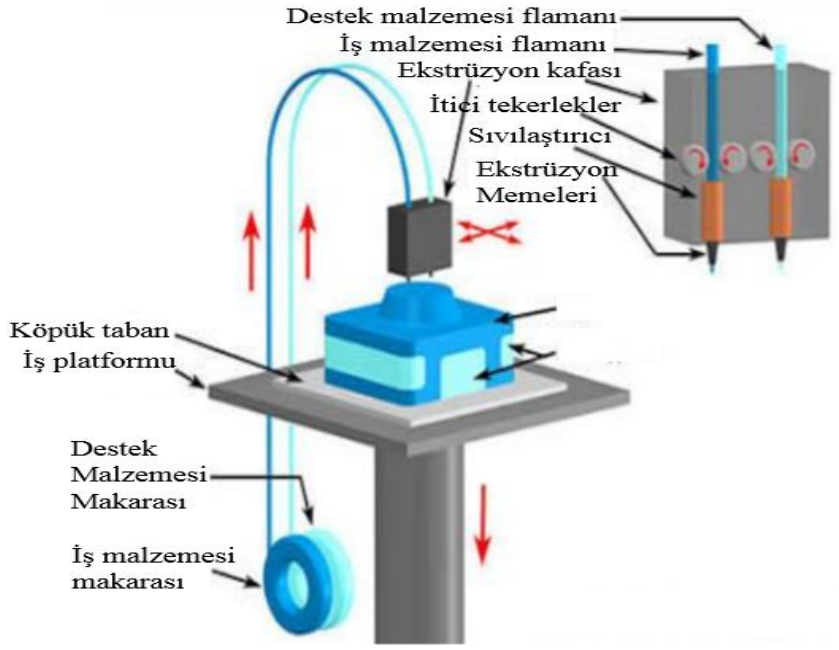
MJF parçaları, baskı yönü boyunca daha zayıf olan SLS parçalara kıyasla üstün mukavemet ve esnekliğe ve daha homojen mekanik özelliklere sahiptir. SLS yazıcıları karbon dolgulu PA, alüminyum dolgulu PA (Poliamit) ve esnek TPU gibi daha fazla malzeme seçeneği sunar. Dahası, SLS iyi yapılandırılmış ve iyi çalışılmış bir süreçtir. SLS malzemelerinin özellikleri hem üreticiler hem de bağımsız araştırmacılar tarafından kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve bu incelemeler yayınlanmıştır (URL 10).

Eriyik birikim modellemesi (FDM - Fused deposition modelling)

Eriyik birikim modellemesi, modelleme, prototip oluşturma ve üretim uygulamaları için yaygın olarak kullanılan bir eklemeli üretim teknolojisidir. FDM, 3B yazıcıların ticari olarak en çok bulunan çeşitlerindendir. Düşük maliyetli, FDM tabanlı masaüstü 3B yazıcıların mevcudiyeti, FDM kullanma ilgisinde bir artışa neden olmuştur. FDM, en soyut haliyle, bir eriyik ekstrüzyon tekniğidir ve bu, onu polimerik ilaç verme uygulamaları, yani amorf katı dispersiyonlar (ASD'ler) için kolayca kullanılabilir hale getirir (Nasereddin, 2020). FDM, malzemeyi katmanlar halinde yerleştirerek "ilave katkı" prensibiyle çalışır. Bir plastik filaman veya metal tel, bir bobinden çözülür ve akışı açıp kapatabilen bir ekstrüzyon memesine malzeme sağlar. Meme, malzemeyi eritmek için ısıtır ve bilgisayar destekli üretim (CAM) yazılım paketi tarafından doğrudan kontrol edilen sayısal olarak kontrol edilen bir mekanizma ile hem yatay hem de dikey yönlerde hareket ettirilebilir. Model veya parça, malzeme nozülden ekstrüzyondan hemen sonra sertleşirken tabakalar oluşturmak için küçük termoplastik malzeme boncuklarının

ekstrüde edilmesiyle üretilir. Ekstrüzyon kafasını hareket ettirmek için tipik olarak step motorlar veya servo motorlar kullanılır. Hızlı prototiplemenin öne çıkan bir biçimi olan FDM, prototipleme ve hızlı üretim için kullanılır. Hızlı prototipleme, yinelemeli testi kolaylaştırır ve çok kısa vadeler için hızlı üretim nispeten ucuz bir alternatif olabilmektedir. (Domain Group 3D Printing Workshop Notes).

Avantajlar: Plastik kullanıldığından daha ucuzdur, daha pahalı modellerde destekleri tamamen çıkarmak için farklı (suda çözünür) bir malzeme kullanır. Ucuz 3D yazıcı olarak birçok uygulama için yeterli çözünürlüğe sahiptir. Dezavantajları: Kaldırılması ve zımparalanması gereken katman izleri oluşturur. Termo-plastik malzeme nedeniyle çözgü, sınırlı testlere tabi tutulabilir. Yukarıda Şekil 11'de Eriyik birikim modellemesi (FDM) 3B yazıcının şekli verilmiştir (Waskar, Ugale, Taralekar, 2018).

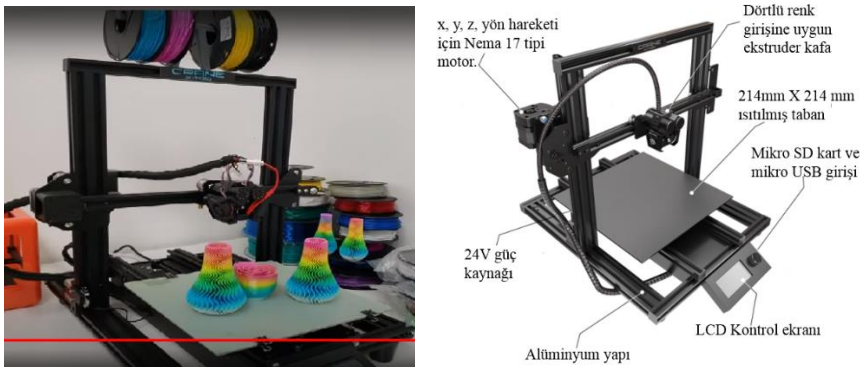


Şekil 11. Eriyik Birikim Modellemesi (FDM) 3B Yazıcı Şekli

Çok renkli 3 Boyutlu yazıcı (M3D Printers - Multicolor Three Dimensional Printing)

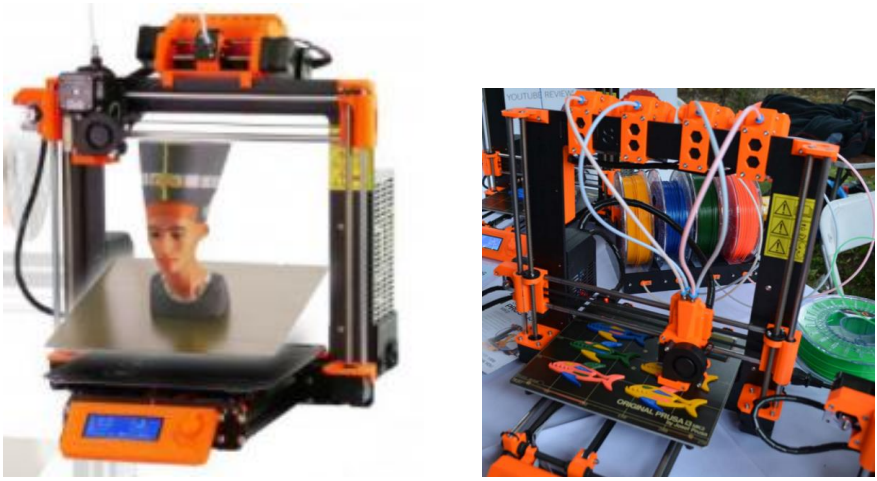
Bu konuda gelişmeler hızla devam etmektedir. Burada renkli flamanlar kullanan 3B renkli yazıcıyı ele alacağız. Bu tip yazıcılar FDM tipi yazıların çalışma

prensibi ile çalışmaktadır. Farkları ekstruder kafanın 2, 3, 4 ve 5 renkli aynı malzemeden veya farklı malzemeden flaman kullanmaya uygun olması ve sistemin bu sayıca farklı filaman makaraları ve beslemeye uygun olmasıdır. FDM'den farklı olarak burada yazılımlarda çok önem kazanmaktadır. Hangi makara ne zaman ne kadar beslenecek iyi ayırt etmek gerekiyor. Ayrıca siyah gibi baskın renklerden sonra sarı ve beyaz gibi zayıf renklere girildiği zaman iz ve kirlenme problemleri olabilmekte buradan da bu yazıcıları kullanmak için ayrı bir tecrübe gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Bu renkli üç boyutlu pratik masa üstü yazıcılar diğer yazıcıların arasından fiyat ve kalite olarak sıyrılıp renkli 3B yazıcı olarak en çok kullanılanlar arasına girmeyi başarmıştır hatta Amerikan Fitfourlounch firması masa üstü çok renkli 3B yazıcı fiyatını 500$ altına indiren ilk firma oldu. Aşağıda şekil 12'de Fitfourlounch firmasının 4 renkli yazıcının fotoğrafı ve basit olarak yapısı verilmiştir (URL 12).



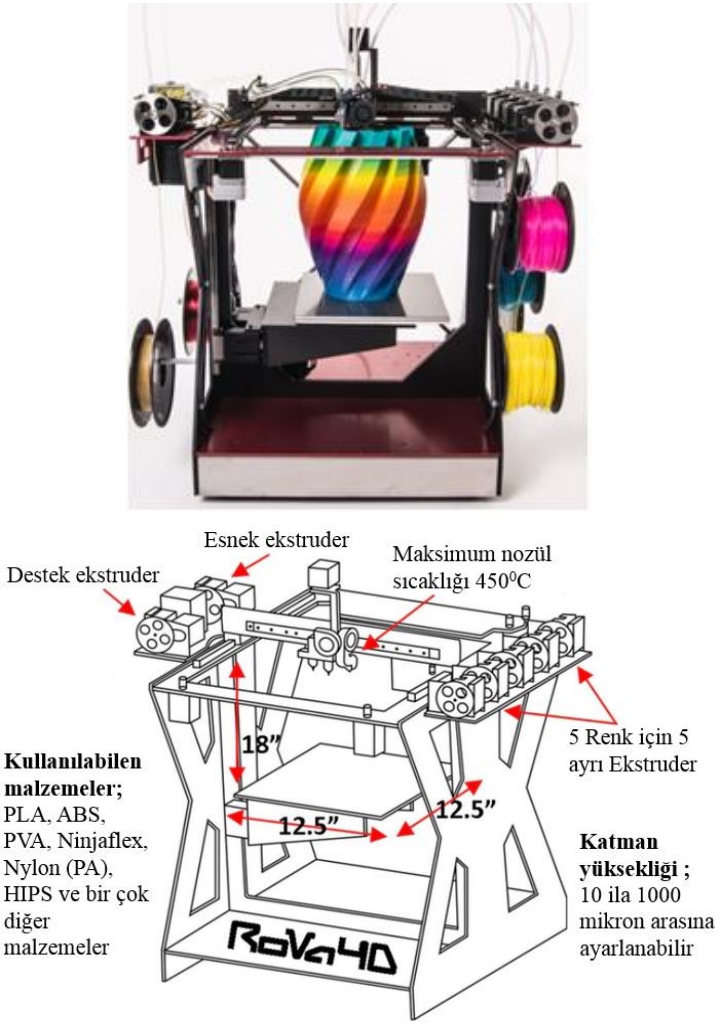
Şekil 12. Fitforlounch Firmasının Ucuz 4 Renkli Yazıcısı Ve Yapısı

Çek Prusa firması masa üstü küçük boyutlu 2 renkli M3D yazıcıları kit olarak (demonte) 300€'dan başlayan fiyatlarla gönderebilmektedir. Aşağıda Şekil 13'de Prusa firmasının böyle bir ucuz yazıcısı ve gelişmiş dört renkli yazıcısının fotoğrafları verilmiştir (URL 13).



Şekil 13. Prusa Firmasının Ucuz 2 Renkli Yazıcısı ve Daha Gelişmiş Dört Renkli Yazıcısı

Günümüzde 5 renkli olanları da mevcuttur. 2009 yılında kurulan Amerikan Kickstarter firması 2013 yılında ilk 5 ekstrüder 3D yazıcıyı üretmiştir. Müşterilerinden gelen geri bildirimleri değerlendirerek 2014 yılında 5 ekstrüder sistemleri güncellemiş ve bugün sizi 6. nesil 5 renkli ve çok daha esnek yapıda M3D yazıcıları üretmektedir. Kullanımı da çok basitleştirilmiştir. Modeli, bilgisayardaki rengi seçerek sanal olarak değişken boyutta bir fırçayla boyayıp 3B yazıcıya yüklediğinizde ve bunu yazdırdığınızda tam olarak bu renklerde basacaktır. Bu renkleri elde etmek için filamanları değiştirmenize gerek yoktur. Mavi (Cyan) Kırmızı (Magnenta) Sarı (Yellow) Siyah ve Beyaz flamanlar yazdırmaya hazır şekilde makinede yüklü olduğu için yazıcı, ekstrüderlerin her birinde hangi rengin olduğunu bilir ve ona göre besleyerek yeni rengin üretimini sağlamaktadır. Bu yazıcının kullanımı ilgili herkesin yapabileceği kadar kolaylaştırılmıştır. Aşağıda Şekil 14'de Kickstarter firmasının 5 renkli yazıcısının fotoğrafı ve basit olarak yapısı verilmiştir (URL 14).



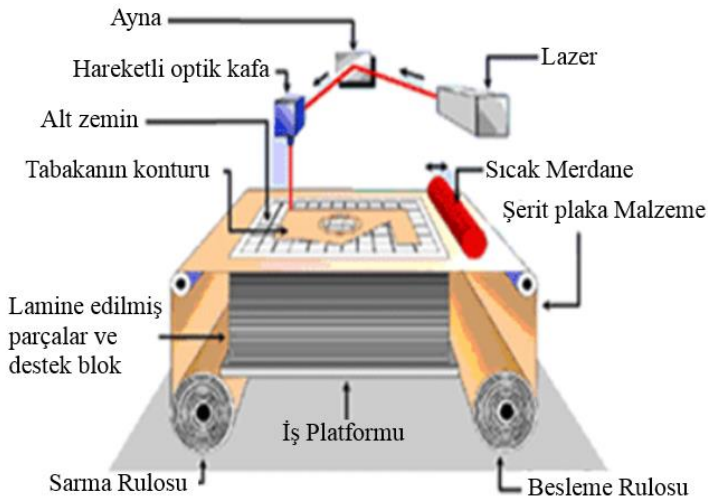
Şekil 14. Kickstarter Firmasının 5 Renkli Yazıcısının Fotoğrafı ve Basit Olarak Yapısı Verilmiştir

Lamine nesne üretimi (LOM -Laminated object Manufacturing)

Lamine Nesne Üretimi, Helisys Inc (şimdi Cubic Technologies) tarafından geliştirilen bir 3D baskı yöntemidir. Bu yöntemde malzeme katmanları, plastik veya kâğıt katmanları, ısı ve basınç kullanılarak birbirine kaynaştırılır veya lamine edilir. Bu teknik verimli, uygun fiyatlı ve oldukça hızlı olmasına rağmen, hala pek popüler değil. Teknoloji, plastik bir LOM makinesi öneren Cubic Technologies tarafından halka sunuldu. Son zamanlarda, MCor teknolojiye renk katan kâğıt tabanlı makinelerini piyasaya sürdü. Kâğıt kullanılarak basılan nesneler daha sonra ahşap benzeri özellikler kazanır ve kum döküm kaplamasından faydalanabilirken,

kâğıt nesneler genellikle nemi dışarıda tutmak için bir boya veya cila ile kapatılır (URL 16).

Çalışma prensibi: LOM teknolojisinde, katmanlı üretilen iş parçası iş platformu üzerinde birikir. Lamine yapılacak malzeme besleme rulosundan yazıcının üstüne serilir bu arada sarma rulosu bir önceki katmanın fazla olan kenarlarını sarar. Bu serilen malzeme yapışkan bir tabaka ile kaplanır ve yapıştırıcıyı eritmek için ısıtılmış olan merdane üzerinden geçerek katmanı önceki katmanların en üstüne yapıştırır. X – Y yönünde hareket edebilen bir bıçak veya lazer kullanılarak kenar kesimler yapılır ve iş platformu bir kat aşağı hareket eder. Sonra besleme rulosu yeni malzemeyi sererken sarma rulosu kesilen önceki malzemeyi sarar böylece devam eder. İş bittiğinde geri çekilecek kenar temizlikler ve iş bloğu kalır. Aşağıda Şekil 15'te verilmiştir (URL 15)



Şekil 15. Lamine Nesne Üretimi (LOM) Şeması

Neredeyse her malzeme yapıştırılabildiğinden bu teknoloji çok yönlüdür. Bu eklemeli imalat işlemi sırasında, yapışkan kaplı kağıt, plastik veya metal laminat katmanları art arda birbirine yapıştırılır. Kolayca kesildiği için en yaygın kullanılan malzeme kağıttır. Kesme aşamasında bıçak veya lazer kullanılarak plastik de kullanılabilir. Metal levhalar daha sıra dışıdır çünkü kesme aşaması daha karmaşıktır. Bu, kullanımı kolay, ucuz ve hızlı hale getiren çok basit bir işlemdir. Baskı hassasiyeti katman kalınlığına ve dolayısıyla malzemeye bağlıdır. Diğer teknolojilerle karşılaştırıldığında çok kesin olarak kabul edilmemektedir. Bir nesne "yazdırıldıktan" sonra, yapı platformundan kaldırılır ve fazla malzeme kesilir. Kağıda

basılan nesneler ahşap benzeri özellikler alır ve buna göre zımparalanabilir veya bitirilebilir. Kağıt nesneler genellikle nemi dışarıda tutmak için bir boya veya cila ile kapatılır (URL 17)

LOM'un avantajları; İmalat endüstrisinde LOM kullanmanın birçok avantajı vardır, bunlardan biri hızlı bir şekilde prototip üretme becerisidir. Bir üretim şirketi, bir ürünün bilgisayar tarafından oluşturulmuş bir modeline sahipse, LOM kullanarak hızlı bir şekilde bir prototip oluşturabilir. Prototipler oluşturmanın diğer üretim süreçlerinden daha hızlı ve daha verimli bir yoludur. LOM, hem katı hem de içi boş nesnelerin oluşturulmasını destekler. Belki bir imalat şirketi sağlam bir prototip yapmak istiyor veya belki içi boş bir prototip yapmak istiyor. Ne olursa olsun, LOM, her iki tür nesneyi de destekleyen çok yönlü ve etkili bir çözümdür. LOM'un bir başka avantajı da düşük maliyetidir. Kâğıt dâhil düşük maliyetli malzemelerin kullanımını desteklediğinden, LOM diğer katmanlı imalat biçimlerinden daha düşük maliyetlidir. Prototip oluşturma çabalarının maliyetini düşürmek isteyen imalat şirketleri için LOM cazip bir çözümdür. Hızlıdır, etkilidir, hem katı hem de içi boş nesneleri destekler ve diğer yöntemlerden daha ucuzdur (URL 18). Bazı LOM makinelerde, tam renkli modellerin yazdırılmasına izin veren bütünleşmiş bir renkli yazıcı bulunmaktadır (URL 19).

Metal yazıcılara geçmeden önce metal dışı yazıcılardan bazılarının karşılaştırıldığı aşağıdaki Tablo 2 incelendiği zaman plastik ve reçine esaslı yazıcıların kullandıkları malzemelere göre üstün ve zayıf yanları, yetenekleri, ölçü doğrulukları, yüzey kaliteleri, üretim hızları ve ekonomik üretim durumları mukayeseli olarak verildiği görülmektedir. Aşağıda Tablo 2'de plastik ve reçine kullanan bazı 3D yazıcıların kullandıkları malzemelere göre çıktı mukayeseleri verilmiştir (URL 9).

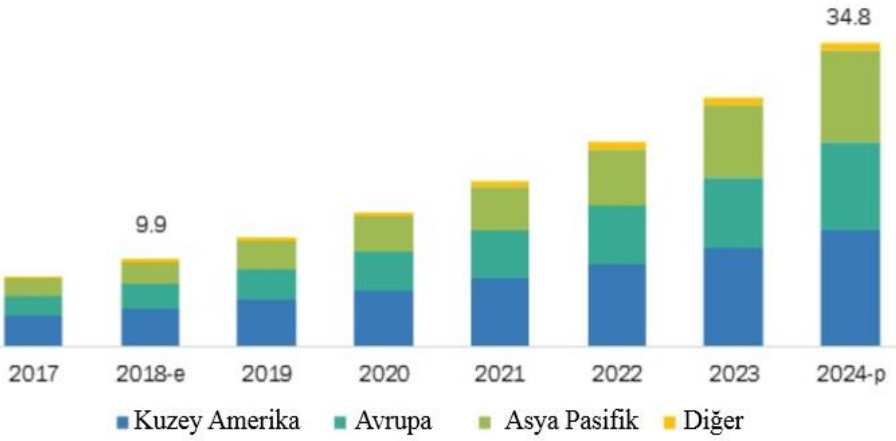
Tablo 2. Plastik ve Reçine Kullanan Bazı 3D Yazıcıların Çıktı Mukayeseleri

TEKNOLOJİ	MALZEME	DAYANIKLILIK	SERTLİK	ISIYA DAYANIM	YÜZEY DETAYI	ÖLÇÜ DOĞRULUĞU	ÜRETİM HIZI	EKONOMİK ÜRETİM
FDM	PLA	++++	++++	+++	+++	+++	++++	+++++
FDM	ABS	++++	++++	++++	++++	+++	++++	+++++
FDM	ABS+	++++	++++	++++	++++	+++	++++	+++++
FDM	TPU	++++	++++	+++	+++	+++	++++	+++++
FDM	PETG	++++	++++	+++	+++	+++	++++	+++++
FDM	NAYLON	++++	+++	++++	+++	+++	++++	+++++
FDM	ASA	++++	++++	++++	++++	+++	++++	+++++
FDM	PC	+++++	++++	++++	++++	+++	++++	+++++
FDM	PC ABS	+++++	++++	++++	++++	+++	++++	+++++
FDM	KARBON KATKILI ABS	+++++	++++	++++	+++	+++	++++	+++++
FDM	PEI ULTEM	++++	++++	++++	+++	+++	++++	+++++
MJF	NAYLON - POLYAMİD (PA)	+++++	++++	++++	++++	+++++	+++++	++++
SLA	STANDART REÇİNE	++	++++	++	+++++	+++	+++	+++
SLA	ŞEFFAF REÇİNE	++	++++	++	+++++	+++	+++	+++
SLA	RİJİT REÇİNE	+++	++++	++	+++++	+++	+++	+++
SLA	DÖKÜLEBİLİR REÇİNE	+	++++	+	+++++	+++	+++	+++
SLA	ESNEK REÇİNE	+++	++	++	+++++	+++	+++	+++
SLA	ELASTİK REÇİNE	+++	+	++	+++++	+++	+++	+++
SLA	YÜKSEK SICAKLIK REÇİNESİ	++	++++	++++	+++++	+++	+++	+++
COLORJET	KUMTAŞI	+	++++	++++	++++	++++	+++++	+

Metal 3B Yazıcılar

Konumuzun ikinci bölümü olan "3B metal yazıcılarda baskı hatalarının incelenmesi" metal 3B yazıcılarla ilgili olduğu için metal yazıcıları Tablo1'de de verdiğimiz bilgi doğrultusunda da sona bırakılmıştır.

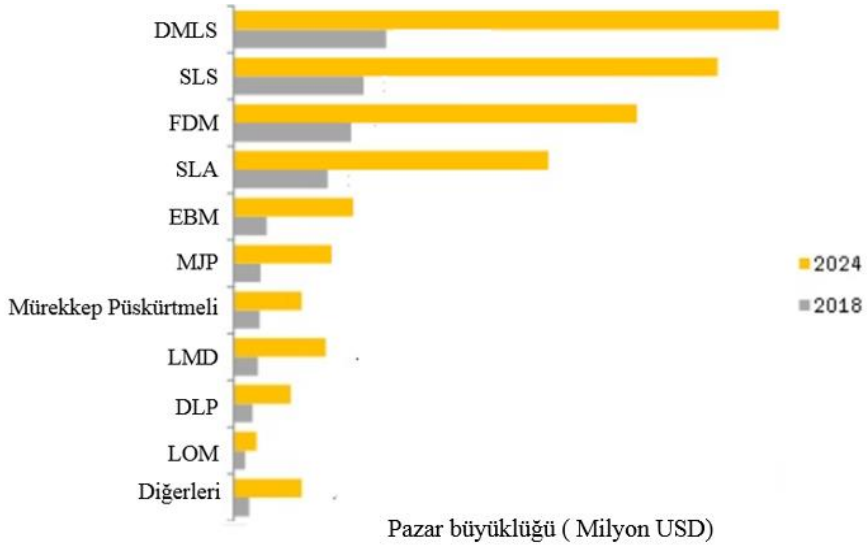
Bölgeye dayalı 3B baskı pazarı, Kuzey Amerika, Avrupa, Asya Pasifik (AP) ve Dünyanın Geri Kalanı (Diğer) olarak segmentlere ayrılmıştır. Kuzey Amerika'nın 3B baskı endüstrisinin en büyük payına sahip olması beklenirken, Asya Pasifik pazarının tahmin döneminde en yüksek yıllık birleşik büyüme oranında (CAGR) büyümesi beklenmektedir. Aşağıda Şekil 16'da bölgelere göre Pazar büyümesi verilmiştir. 2018 yılında 9,9 milyar dolar olan pazarın 2024 yılında 34,8 milyar dolara ulaşacağı beklenmektedir. Stratasys (ABD) ve 3D Systems (ABD) 3B baskı teknolojisi patentlerinin sırasıyla kaynaştırılmış biriktirme modelleme (FDM) ve stereolitografi (SLA) teknolojileri için sona ermesi, yeni girenlerin kolayca erişebilmesi nedeniyle gelişmekte olan şirketler için AM teknolojisine ve benzersiz gereksinimlerine göre değişiklikler yapma gibi çeşitli fırsatlar yarattı. 3B baskı pazarı, esas olarak yeni ve geliştirilmiş teknolojilerin yanı sıra taze baskı malzemelerinin tanıtımına yönelik kapsamlı araştırma ve geliştirme faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır (URL 20).



Şekil 16. 2018 – 2024 Yılları Arası Bölgelere Göre 3B Yazıcı Pazarı (Milyar USD)

Bölgelere göre Pazar büyümesinin yanında en önemli olan gelişme metal 3B yazıcıların hem kalıp hem prototip hem de en önemlisi az miktarda üretimi gereken zor parçalardaki üretim becerilerinden dolayı ihtiyacının çok artmasıdır. Günümüzde, 3B baskı uygulamalarındaki eğilim prototiplemeden, otomotiv, medikal, havacılık ve tüketim malları gibi çeşitli sektörler için işlevsel parça üretimine kaymaktadır. Ancak protip üretme birinciliğini bırakmayacaktır. 3B baskı bilgisayar destekli tasarımdan (CAD) prototipler ve modeller üretmeye çok fazla yardımcı olur. Bu, birkaç şirketin geleneksel üretimde prototip geçişleri sırasında israfı azaltmasına ve ayrıca operasyonel maliyetlerini düşürmelerine yardımcı olur. 3D baskı ayrıca, herhangi bir endüstride kullanılan ürünlerin yapısının geometrisi, doğruluğu ve iyi tanımlanmış düzgünlüğü ile ilgili müşterilerin gereksinimlerine dayalı olarak uygun maliyetli prototiplerin hızlı bir şekilde üretilmesini sağlar. Dünyanın yıllarda en büyük firması ünvanını taşıyan General Elektrik firması 1,4 milyar dolarlık şirket satın alımlarla metal 3B yazıcı pazarına girmiştir. General Elektrik firması bu gelişmeleri gördüğü için yatırıma girmiştir (URL 21).

Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS), 2018'den 2024'e En Büyük 3B Baskı Pazar Payına Sahip olan ve olacak 3B yazı durumundadır. 3B yazıcıların dünya çapında Pazar payları ve 2024 yılına kadar olan tahmini Pazar payları aşağıda Şekil 17'da verilmiştir.

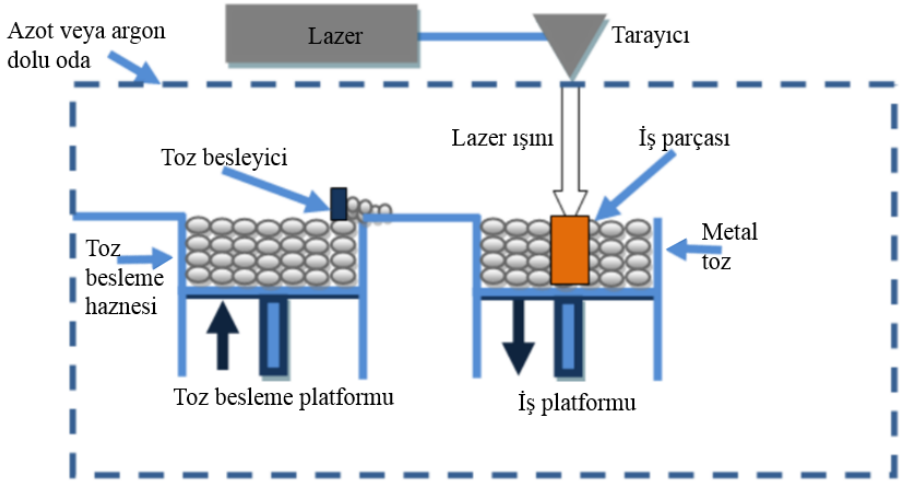


Şekil 17. 2018 ve 2024 (Tahmini) Yılları İçin 3B Yazıcı Teknolojileri Pazar Payları

DMLS, 2017 ve 2018 yılında 3B baskı pazarının en büyük payına sahipti. DMLS teknolojisi, fikstür ve aparatların kalıplanması ve imalatı gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Teknoloji, karmaşık geometrilerin (20 µm'ye kadar küçük boyutlara sahip) yapımını kolaylaştırdığı için yüksek kaliteli metal parçaların oluşturulmasını sağlar ve bu da onu imalat endüstrisi için ideal kılar. DMLS, havacılık ve otomotiv gibi endüstrilerde takım ve makine parçaları için karmaşık yapılar geliştirmek için kullanılır. Ayrıntılı çözünürlük, uygun maliyetli üretim ve hızlı ve kolay kullanım, DMLS teknolojisine dayalı 3B baskı pazarının büyümesinin başlıca etkenleridir (URL 20).

Metal Laser Sintering (DMLS) ve Seçici Lazer Eritme (SLM)

DMLS (Direct Metal Laser Sintering), SLM (Selective Laser Melting), Laser Cusing teknolojileri, toz halindeki metallerin lazerle seçici sinterlenmesi ve eritilmesini içeren aynı teknolojinin ayrılmış isimleridir. Yöntemin uygulanması, bir bilgisayarda yapılan tasarımdan doğrudan tek tip yapılı metal elemanların yapılmasına izin verir. Baskı, seçilen metal tozunun sonraki katmanlarını yüksek doğrulukla sinterleyen lazerin nispeten yüksek gücü nedeniyle yapılır. İşlem, azot veya argon kullanılarak kapalı bir odada gerçekleştirilir. Cihaz otomatik olarak yeni bir toz tabakası bırakır ve gereksinimlere (hız, kalite) bağlı olarak 0,01 - 0,08 mm kalınlığında bir tabaka oluşturabilir (Legutlo, 2018).



Şekil 18. Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS) Ve Seçici Lazer Eritme (SLM) 3B Yazıcıların Şekli

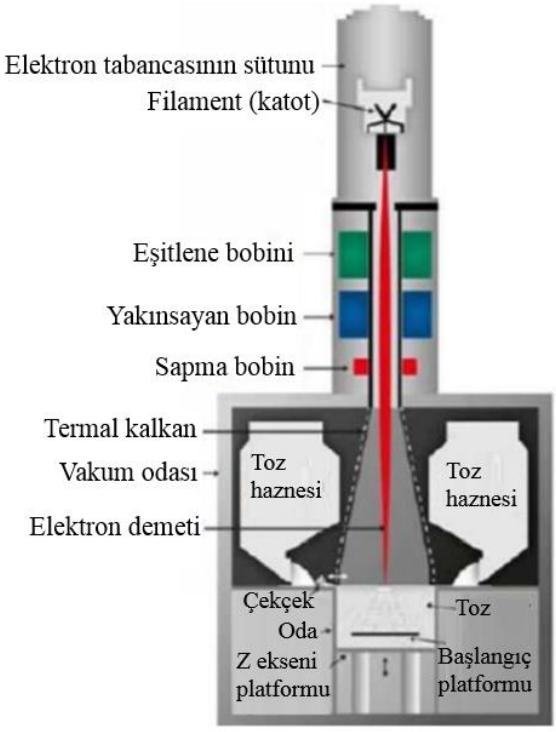
Bu tekniğin ilkesi yukarıda Şekil 18'de gösterilmektedir. DMLS / SLM teknolojisinin önemli bir sınırlaması, dayanıklı destek yapıları oluşturma gerekliliğidir. Bunun nedeni, çalışma odası atmosferi ile sıvı metal arasındaki önemli sıcaklık farklarıdır. Bir parça yapıldıktan sonra, başlangıç plakası kesilmeli ve destekler çıkarılmalıdır. Desteklerin şekli çeşitli olabilir ve dış baskı tasarlanırken belirlenir. O sırada da uygulanacak desteklerin sayısı belirlenir. DMLS / SLM teknolojisi genellikle prototiplerin oluşturulmasında ve tekli üretimde (büyük boyutlu elemanlar) ve kısa seri üretimde - esas olarak üretilen elemanların yüksek kalitede ve düşük fiyata elde edilmesi olasılığı için - küçük elemanlar için uygulanır. Teknolojinin en büyük avantajı, başka hiçbir şekilde yapılamayan yapı ile bir eleman yapma imkanı sağlamasıdır. Bununla birlikte, bu teknolojinin gelişiminin önemli bir engelleyicisinin, en büyük şirketlerin yürüttüğü patent yarışı olduğu belirtilmelidir. DMLS / SLM tekniği ile parça üretiminde hayati öneme sahip bir konu, gerçekleştirilen parçaların kalitesi, yoğunluğu ve saflığı açısından süreç optimizasyonudur (Legutlo, 2018).

Günümüzde en yaygın iki toz yatak füzyon sistemi, genellikle SLS olarak adlandırılan plastik tabanlı ve doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) veya seçici lazer eritme (SLM) olarak bilinen metal tabanlı sistemlerdir. Yakın zamana kadar, bu sistemlerin her ikisi de, kullanımlarını küçük miktarlarda yüksek değerli veya havacılık bileşenleri veya tıbbi cihazlar gibi özel parçalarla sınırlandırarak, engelleyici şekilde pahalı ve karmaşıktı.

Alandaki yenilik son zamanlarda arttı ve plastik tabanlı SLS artık erişilebilir, kompakt sistemlerle yaygın bir şekilde benimsenmesi için stereolitografi (SLA) ve birleştirilmiş biriktirme modelleme (FDM) gibi diğer 3D baskı teknolojilerini takip etmeye hazırlanıyor.

Elektron Işını Erime (EBM)

Elektron ışını eritme tekniğinde, nesnenin oluşturulması doğrudan üç boyutlu bilgisayar ortamında yaratılan tasarım verilerinden, yukarı aşağı hareket edebilen platform üzerine kat kat toz biriktirmesi ile gerçekleştirilir. Elektron Işını Erime teknolojisinin çalışma prensibi Şekil 19'da gösterilmiştir. Sonraki katmanların erimesi, elektron ışınının dağılmasını önlemek için minimum helyum varlığına sahip yüksek vakumlu bir odada odaklanmış bir elektron demeti aracılığıyla gerçekleştirilir. Yüksek yoğunluk ve yapı saflığı nedeniyle bu teknoloji özellikle gözenekli yapılar içeren implantların üretiminde uygulanmaktadır. Böyle bir yapının talaşlı imalat yöntemleri ile yapılması mümkün değildir (Legutlo, 2018).



Şekil 19. Elektron Işını Erime Teknolojisinin Çalışma Prensibi

Bu tekniğin en büyük avantajı, parçaların hızlı bir şekilde oluşturulma olasılığıdır (hatta 60 cm3 / saate kadar). EBM yöntemi, metal parçaların üretiminde

kullanılan diğer katkı teknolojilerine kıyasla 3 ila 5 kat daha hızlıdır. SMSL / SLM teknolojisinden farklı olarak, EBM teknolojisi ile yapılan parçalar genellikle ısıl işlem gerektirmez çünkü işlem çok daha hızlıdır ve ayrıca vakumun yalıtım özelliklerinden dolayı, inşa edilen elemanların içinde erime gerilimlerinin değeri nispeten küçük olduğu için ısı tutulur. Bununla birlikte, önemli bir sınırlama (LENS teknolojisine benzer şekilde) üretilen yüzeylerin düşük kalitesidir. Bu nedenle, son kesme işlemleri (örneğin, tornalama, frezeleme, taşlama) da sıklıkla gereklidir (Legutlo, 2018).

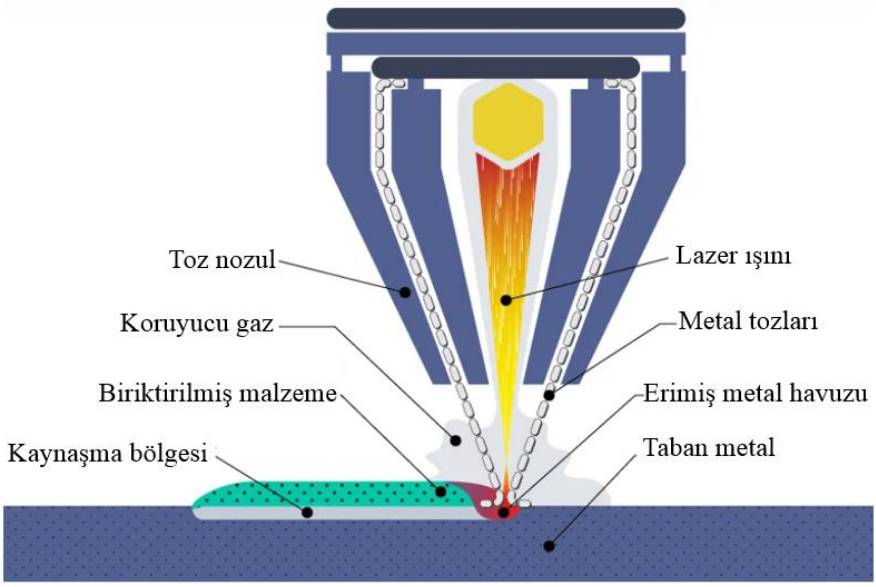
Lazer metal biriktirme (LMD – Laser Metal Deposition)

Lazer metal biriktirme, metaller için üretime dönük bir üretim yöntemidir. Uluslararası olarak, genellikle LMD olarak kısaltılan "lazer metal biriktirme" olarak bilinir. Ayrıca "doğrudan metal biriktirme" (DMD-Direct Metal Deposition) veya "doğrudan enerji biriktirme" (DED – Direct Energy Deposition) isimleri de kullanılıyor. Yaygın olarak kullanılan LMD olandır.

Lazer metal biriktirme yöntemi: Lazer ışını iş parçasını yerel olarak ısıtır ve bir kaynak havuzu oluşturur. İnce metal tozu, argon veya nitrojen gazı ile birlikte işleme optiğindeki bir nozuldan doğrudan kaynak havuzuna püskürtülür. Orada erir ve ana malzeme ile birleşir. Yaklaşık bir katman 0,2 ila 1 milimetre kalınlığındadır. Gerekirse birbiri üzerine çok sayıda katman oluşturulabilir. Argon genellikle koruyucu gaz olarak kullanılır. Çizgileri, alanları ve şekilleri uygulamak için, otomatik olarak kontrol edilen işleme optiği iş parçası üzerinde hareket eder. Akıllı bir sensör sistemi, katman kalınlığının her zaman her yerde eşit olmasını sağlar. Aşağıda Şekil 20'de LMD'nin kafa kesitinde çalışma şeması gösterilmiştir (Graf, Ammer, Gumenyuk, Rethmeier, 2013). Mevcut temel gövdeler veya tüm bileşenler üzerinde yapılar oluşturur. İşlem, havacılık ve uzay endüstrisi, enerji teknolojisi, petrokimya, otomotiv endüstrisi ve tıbbi teknoloji gibi endüstrilerde kullanılmaktadır.

Lazer metal biriktirmenin özellikleri: Diğer eklemeli imalat işlemlerine kıyasla yüksek inşa oranları ile pürüzlü ve çok ince yapılar oluşturur. İşlemde, gereksinimlerinize uyacak özel alaşımlar geliştirmenize olanak tanıyan birkaç toz kabı kullanılmasına olanak sağlar. Farklı malzemeler birleştirilerek sandviç yapılar oluşturulabilir. 3B yapıların mevcut, pürüzlü yüzeylere uygulanmasını sağlar, yani geometride kolayca değişiklik yapılabilir. Lazer metal biriktirme, bir iş sürecinde farklı malzemeler arasında kolaylıkla geçiş yapmayı mümkün kılar. Lazer

metal biriktirme, 3B baskıdan daha fazlasıdır. Bu yenilikçi üretim yönteminin çeşitli uygulama alanları, bileşenlerin kaplanması ve onarımından, boşlukların doldurulması gibi birleştirme işlemlerine, tamamen yaratıcı özgürlüğe sahip komple bileşenlerin üretilmesine kadar uzanmaktadır (URL 22)..

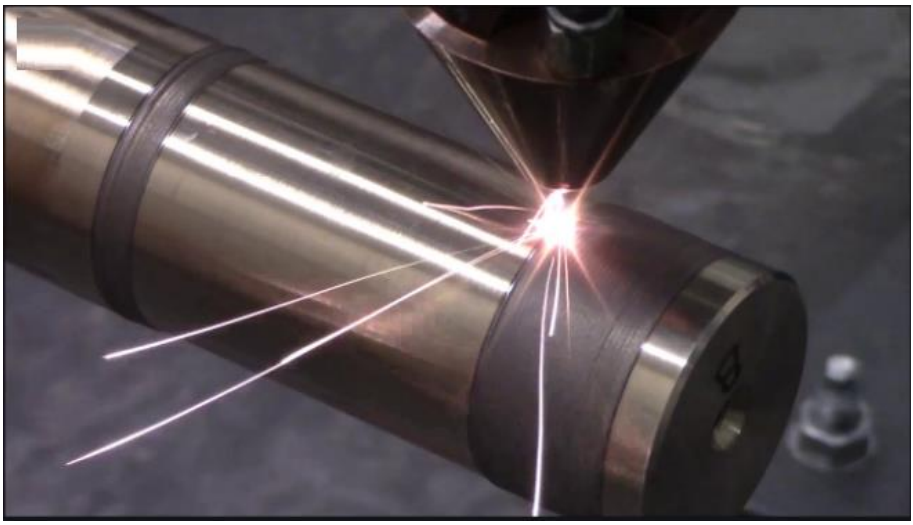


Şekil 20. LMD'nin Kafa Kesitinde Çalışma Şeması

EHLA işlemi, lazer metal biriktirmeyi daha da hızlandırır, bu nedenle "aşırı yüksek hızlı lazer biriktirme kaynağı". Bunun nedeni, toz dolgu malzemesinin kaynak havuzunun üzerindeki lazer ışığıyla zaten temas etmesi ve lazer ışığının onu bileşene giderken erime noktasına yakın bir yerde ısıtmasıdır. Partiküller bu nedenle kaynak havuzunda daha hızlı erir ve enerji çok daha verimli kullanılır. Bu şekilde, EHLA işlemi dakikada 250 santimetrekare üzerinde ilerleme hızlarına ulaşır. "Normal" lazer metal biriktirme ile karşılaştırıldığında, bu, dakikada 40 santimetre kareye kadar yönettiği için önemli bir artıştır. 10 ila 300 mikrometre kalınlığında çok daha ince tabakalar da oluşturulabilir (URL 22).

Yapılar, bileşenleri yerel olarak güçlendirmek veya geometri açısından uyarlamak için lazer metal biriktirme ile kolayca uygulanabilir. Alttaki bileşen daha uygun maliyetli malzemelerden yapılabilir. Bileşenler, korozyon ve aşınmaya karşı koruyucu bir tabaka ile güçlü mekanik veya kimyasal gerilimlere karşı yükseltilebilir veya korunabilir. Aşağıda Şekil 21'de lazer eritme biriktirme yöntemi ile aşınmış parçanın üzerine kaplama yapılması gösterilmiştir (URL 23). Plazma

transfer ark kaynağı veya termal püskürtme gibi geleneksel proseslerle karşılaştırıldığında, iş parçası yalnızca lazer metal biriktirme sırasında düşük termal strese maruz kalır, bu da düşük bir distorsiyon riski anlamına gelir. LMD, aynı zamanda yüksek derecede otomasyon ve tekrarlanabilirlik nedeniyle çok daha uygun maliyetlidir.



Şekil 21. LMD Kullanılarak Parçaya Koruyucu Kaplama Yapılması

Lazer metal biriktirme, bileşenlerin ayrı ayrı imalatında, her şeyden önce jenerik pres kalıplarına kıyasla geniş kapsamlı tasarım özgürlüğü sağlar. Dolgu malzemesi ile lazer metal biriktirme kullanılarak, tamamen yeni yapılar oluşturulabilir veya mevcut bileşenlerin şekli ve yüzeyi değiştirilebilir. Bir 3B yazıcının yapım odasına sığmayan büyük bileşenler de bu şekilde tamamen üretilebilir.

Yüksek üretim maliyetlerine sahip pahalı bileşenler, dolgu malzemesi ile lazer metal biriktirme kullanılarak kolayca onarılabilir, bu da parça veya aletin tekrar hızlı bir şekilde tekrar kullanılacağı anlamına gelir. Bu şekilde, yalnızca uzun tedarik ve teslimat sürelerinden değil, aynı zamanda paradan da tasarruf edersiniz. Bunun nedeni, nikel bazlı alaşımlar gibi pahalı malzemeler söz konusu olduğunda, bir bileşeni tamir etmenin yenisini satın almaktan çok daha uygun maliyetli olmasıdır. Bileşen üzerinde tasarım değişiklikleri de yapılabilir. Metal plakaların hatalı bölgelere tutturulduğu yama, plazma transferli ark kaynağı veya klasik TIG kaynağı gibi alternatif süreçlerle karşılaştırıldığında LMD, düşük termal gerilimler yaratır ve çok hassastır - bu da mükemmel bir tekrarlanabilirlik düzeyini garanti eder (URL 22).

Dolgu malzemesi ile lazer metal biriktirme, lazer kaynağı için uygun olmayan bileşenlerin kaynaklanması için bir birleştirme işlemi olarak da kullanılabilir. LMD sayesinde, nispeten büyük boşluklar kapatılabilir ve bileşenler, herhangi bir zaman alıcı hazırlıklar olmaksızın sıkıca kaynaklanabilir. Lazer metal biriktirme sırasında, genellikle daha az işlem sonrası gerektiren tek tip, sıkı dikişler oluşturulur. Koaksiyel toz besleme ayrıca birleştirme işlemini tel kaynağa kıyasla üç boyutlu ve yönden bağımsız hale getirir. Örneğin elektrik motorları için piller için çelik ve dökme alüminyum gibi farklı malzemeler de birleştirilebilir (URL 22).

3B METAL YAZICILARDA BASKI HATALARININ İNCELENMESİ

BASKI HATALARI

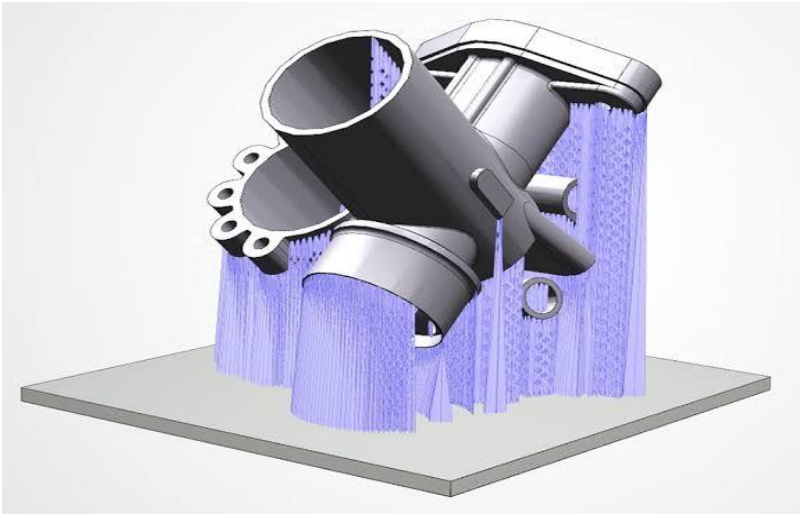
Gerek malzeme kaynaklı gerekse makine kaynaklı hatalar üretim kalitesini etkiler. Bunun önüne geçebilmek için mühendisler üretimde makineye ve malzemeye bağlı olan parametreleri kontrol altında tutarak daha kaliteli bir imalat için çalışır. Katmanlı imalat işlemi sırasında toza ek olarak beş ana parametre vardır:

- Işın gücü
- Işın hareket hızı
- Tabaka kalınlığı / Malzeme besleme hızı
- Yerel geometri
- Fırınlama noktasında parça sıcaklığı

İşlem Sıcaklığı

İki teknoloji arasındaki en büyük fark şüphesiz ön ısıtmalı ve soğuk üretim işlemidir. EBM Teknolojisi 650 ile 1100 derece arasında ön ısıtmalı olarak üretim yaparken, DMLS/SLM/SLS sistemler yaklaşık olarak 200 C ortam sıcaklığında üretim yaparlar. Bunun sonucunda aslında DMLS işlemi bir sinterleme olarak adlandırılırken, EBM yöntemi bir ergitme işlemidir. Bu ufak farklılık aslında sistemlerin birçok noktada birbirinden ayrılmasına sebep olurken teknik anlamda firmaları bambaşka alanlara yönlendirmiştir. Üretim sırasında karşılaşılan en büyük sorunun arka planında ise termal gerilmeler vardı. Üretim esnasında ani sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan ve kontrol edilemeyen bu gerilmeler, parçalarda burulmaya, çarpılmaya, şekil değiştirmeye ve artık streslere neden olur. Bu yüzden parçanın fırınlama sürecine kadar şekil değiştirmemesi için lazer sistemlerde parçayı mekanik olarak mutlaka tablaya bağlanması gerekir. Bunun yapılmasındaki

diğer bir gerekçe ise biriken ısıyı tablaya ileterek yüzeyin aşırı ısınmasını ve çevredeki tozların yapışarak parça yüzeyinde pürüzlülük oluşturmasını engellemektir. Diğer bir görevi de her 3 boyutlu teknolojide olduğu gibi parçaya yerçekimine karşı bir mekanik destek oluşturmasıdır. Fakat lazer sistemlerde işlem sıcaklığı sürekli olarak yüksek sıcaklıklara çıkıp geri düştüğünden parça üzerinde ciddi termal gerilmeler oluşuyor (URL 25). Bu sebeple termal gerilmelerin nerelerde yüksek boyutlara çıkacağını öngörüp buralardaki destekleri güçlendirilmesi gerekir. Şekil 22'de örnek verilmiştir (URL 24). Aksi takdirde günlerce süren üretimin sonuna yaklaşıldığında desteklerin kopması ile tüm üretiminiz hatalı sonuçlanabilir.



Şekil 22. İmalata Yardımcı Destek Parçası Uygulama Çalışması

Artık Stres

Artık stres, metal 3B baskı işlemi sırasında meydana gelen ısıtma ve soğutma, genişleme ve daralmanın bir sonucudur. Artık stres, baskı malzemesinin veya alt tabakanın çekme mukavemetini aştığında, alt tabakanın parçasında çatlama veya bükülme gibi kusurlar meydana gelebilir. Artık stres birikimi nedeniyle bir toz yatağı işlemi sırasında bir titanyum parçası yapı plakasından sökülür. Artık stres, yazdırılan parça ile üzerine yapıştığı alt tabaka arasındaki ara yüzde en yüksek konsantrasyondadır. Stres, yapının merkezinde daha sıkıştırıcıdır ve yapının kenarındaki gerilimdir. Destek yapıları, artık stresin bir kısmını azaltmak için uygulanır. Parça çıkarıldıktan sonra, artık stres giderilir, ancak parça süreçte deforme olabilir (URL 25).

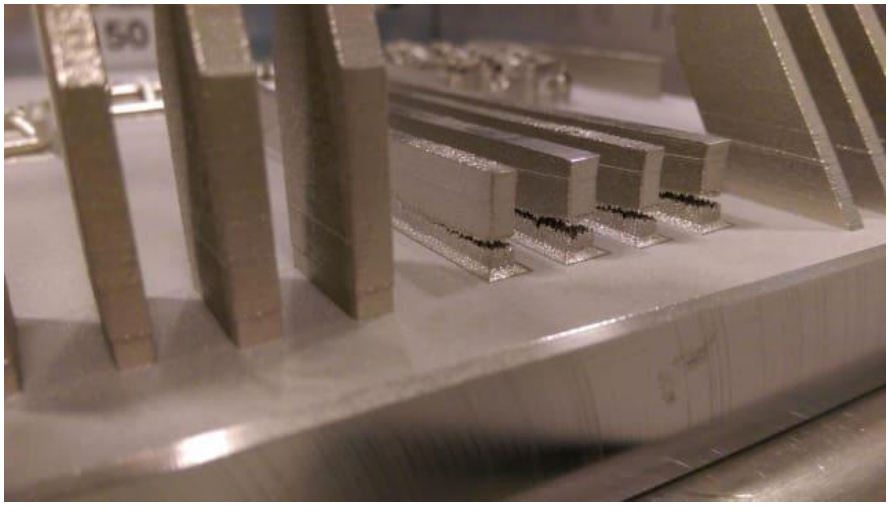


Şekil 23. Artık Stresin Parça Üzerinde Etkisi

Çatlaklar

Bir parça içindeki gözeneklerden yayılmasına ek olarak, erimiş metal katılaştığında veya bir alanın daha fazla ısıtılması sırasında çatlama meydana gelebilir. Enerji kaynağı çok güçlü ise, katılaşma işlemi sırasında stres oluşabilir. Bu metal çubukların toz yatağı işlemi sırasında çatlamasına neden oldu. Delaminasyon da oluşabilir ve katmanlar arasında çatlaklara neden olabilir. Şekil 23 ve 24'te örnek verilmiştir (URL 25). .

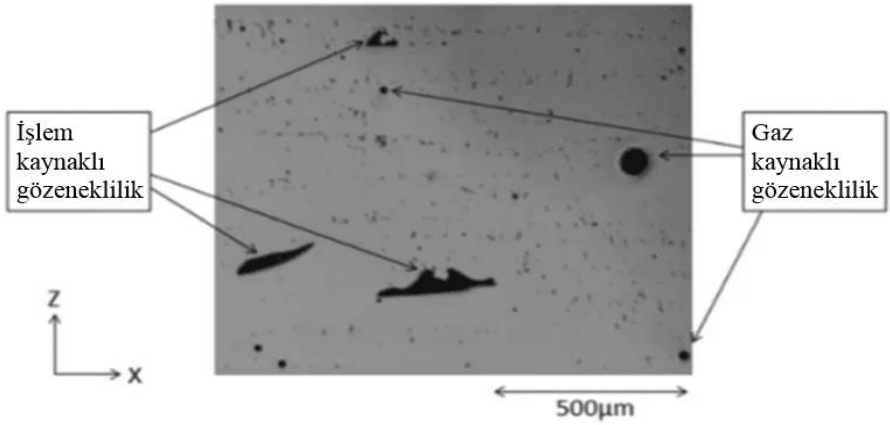
Bu, tozun yeterince erimemesi veya eriyik havuzunun yeniden erimesinin altındaki tabakaların bir sonucu olarak ortaya çıkabilir. Bazı çatlaklar post-processing ile tamir edilebilir, ancak delaminasyon bunlardan biri değildir (Kruth, Leu, Nakagawa, 1998).



Şekil 24. Metal 3B Uygulamasında Çatlakların Parça Üzerinde Etkisi

Gözenekler

Gözeneklilik, bir parçanın gövdesi içinde basıldığı zaman çok küçük boşluklar oluşur. Bu, 3B baskı işleminin kendisinden veya hatta işlemde kullanılan tozdan kaynaklanabilir. Bu mikroskobik delikler parçanın genel yoğunluğunu azaltır ve çatlaklara ve yorgunluğa neden olabilir. Toz atomizasyon işlemi sırasında, toz hammadde içinde gaz cepleri oluşabilir ve bu da son kısma aktarılır. Yeterli güç uygulanmadığında, lazer yoğunluğu çok düşüktür, örneğin metal parçacıkları yeterince kaynaşmaya bilir. Şekil 25'te görüleceği gibi gözenekler, toz parçacıkları bir parçanın tabaka kalınlığından daha büyük olduğunda veya toz çok gevşek bir şekilde paketlendiğinde de oluşabilir. Erimiş metal istenen eriyik bölgeye yeterince akmazsa da oluşabilir (URL 25).

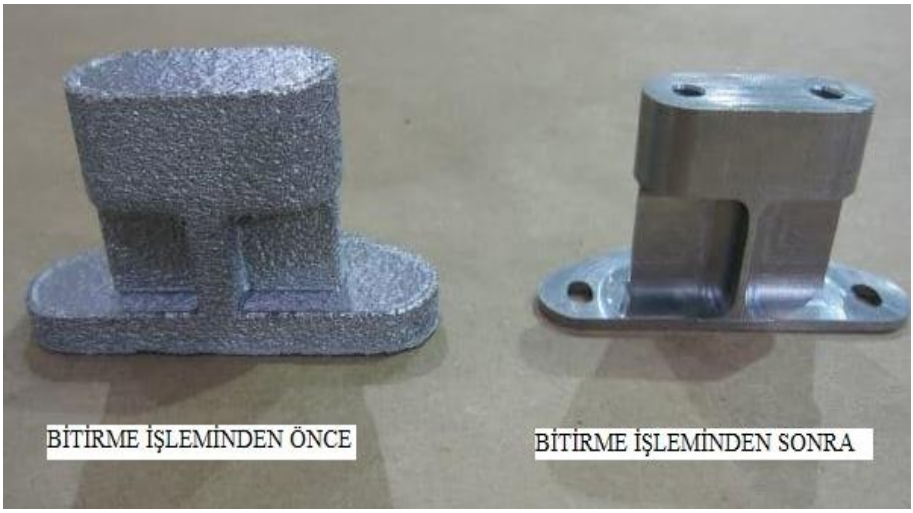


Şekil 25. Metal 3B Uygulamasında Oluşan Gözenekler

Çıkan Parçada Yüzey Kaplama

3B baskılı bir metal parça montajı yapılmadan önce CNC veya kumlama şeklinde önemli bir işleme tabi tutulmuştur. Bunun nedeni, yüzey kaplaması söz konusu olduğunda metal 3B baskı işleminin engebeli olmasıdır. Bununla birlikte, toz yatağı füzyon parçaları üretildiğinde son şekillerine biraz daha yakındır. Yine de, yüzey hala kabadır. Sürecin doğası nedeniyle, parçalar baskıdan sonra bir finish işlemi veya kumlama işlemi yapılabilir. Bununla birlikte, bu, malzemenin maliyetini artırır. Tüm toz yatağı füzyon parçaları post-processing sırasında spesifikasyona göre rafine edileceğinden, bazen biraz daha büyük parçacık boyutlarını

kullanmak daha ekonomik bir anlam ifade eder. Bu aynı zamanda, yüzey kaplamasının, metal 3B baskıda ortaya çıkabilecek diğer konulardan bazılarına göre daha az önemli olduğu anlamına gelir, çünkü parça, son parçanın ne kadar pürüzsüz ve ya pürüzlü olduğuna bakılmaksızın Şekil 26'da gösterilen parçalar gibi bir miktar işlem sonrası işleme tabi tutulacaktır (URL 25).



Şekil 26. Post Processing (Bitirme İşlemi) Uygulanmış Parça

Eklemeli İmalat ve Üretilen Parçalar

GE'nin LEAP motor ailesi için ünlü bağımsız 3B yazıcı yakıt nozulları eskiden bağımsız tedarikçilerden gelen 18 ayrı parçadan yapılmaktaydı. GE doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) kullanarak, 18 parçayı tek bir bileşende birleştirerek yakıt memesinin ağırlığını yüzde 25 azaltabilir ve yeni tasarım beş kat daha güçlü, CO2 emisyonlarında ve yakıt tüketiminde yüzde 15 azalma sağladı.(Şekil 10) Boeing, Airbus ve COMAC gibi şirketler tarafından sipariş edilen 6.000'den fazla LEAP motorunun her biri için gereken 19 nozulu üretmek için GE Aviation, Auburn, Ala'daki mevcut 300.000 metrekarelik tesisine 50 milyon dolar yatırım yaptı. Hindistan'ın Pune şehrinde baskı ve ileri üretim merkezleri; Pittsburgh, Pa, Cincinnati, Ohio ve Talamona, İtalya. Tüm bu hamleler, sadece 3B baskıyı üretim amacıyla kullanmayı amaçlayan çok uluslu bir amaç değil, aynı zamanda 3B baskı alanında lider olmaya dayandığını kanıtladı. (URL 25). Şekil 27. CFM International'in 3B baskılı yakıt memesi (GE'nin izniyle) (URL 26).



Şekil 27. LEAP Jet Motorunun Yakıt Enjektörü

TARTIŞMA

Sistemlerin yatırım maliyetleri birbirine yakın olsa da EBM sistemlerinin yatırım maliyetlerinin lazer sistemlere göre daha yüksek olduğu bilinmektedir. Bu konuda aldatıcı olan konulardan bir tanesi ise cihazın maliyeti ile sistemin maliyeti arasındaki farktır. Yani burada cihazın tek başına kendi maliyetine değil, uygulamanın gerekliliğine göre kurulması gereken sistemin maliyetine bakmak gerekir. Zira bir çok üreticinin cihaz maliyeti oldukça düşükken yan ekipmanlar, servis anlaşmaları, parametreler, yazılımlar, fırın, post proses ekipmanları vs gibi unsurları yan yana koyduğunuzda beklenenin çok üzerinden bir sistem maliyeti karşınıza çıkabilmektedir.

Her iki sistem de Ar-Ge için dünyanın birçok yerinde kullanılmaktadır, lazer sistemlerinin bir kısmı açık kaynak iken bazı üreticiler cihazda standart tozlar dışında toz kullanımını uygun bulmamakta, alaşım içeriği aynı dahi olsa kendi tozu dışındaki kullanımlarda cihazı garanti dışında bırakmaktadır. Yanlış bilinen ve müşterilerin yanlış yönlendirildiği konulardan bir tanesi de malzeme çeşitliliğidir. Lazer kaynaklı sistemlerin daha basit ve kontrol edilebilir olması, birçok marka

tarafından üretilmesi ve büyük firmaların geniş Ar-Ge olanakları sayesinde DMLS sistemlerinde oldukça geniş bir malzeme çeşitliliği vardır. Alüminyum, Bakır, Çelik, Titanyum ve Inconel en çok tercih edilen malzemeler olsa da bunların dışında da birçok malzemeye erişmek mümkündür. Ancak burada dikkat edilmesi gereken çok önemli bir husus vardır. Alıcıların birçoğu tek bir makinada bütün malzemeleri kullanabileceğini düşünür, bu teorik olarak mümkün olsa da teknik olarak birçok riski beraberinde getiren bir konudur. Cihaz ne kadar iyi temizlense de sirkülasyon pompası ve filtresi olan bir cihazda toz kontaminasyonu kaçınılmazdır. Farklı sıcaklıklarda işlenen malzemelerin kontaminasyonunda ise en sık rastlanan problem porozite, yoğunluk farkı ve mekanik özelliklerdeki değişimlerdir. Özellikle belli bir kalite sertifikasyonu altında üretim yapan veya cihazını valide ettiren üreticiler bir cihazda sadece bir malzeme kullanabilmektedir. Medikal uygulamalarda ise bu kesinlikle yasaklanmıştır EBM sisteminde ise standart malzeme adı verilen 5 tane malzeme vardır. Bu 5 malzemenin 3'ü titanyum alaşımı iken, diğer ikisi CoCr ve Inkonel alaşımıdır.

SONUÇ ve ÖNERİLER

İlk yatırım maliyetinin yüksek olması ve sınırlı toz alaşımları kullanarak üretime imkan sağlaması nedeniyle yatırımcılar tarafından çok tercih edilmesede üretim yetenekleri normal imalat metotları kullanarak üretilmesi güç ve maliyetleri tek seferde üretebilmesi nedeniyle yatırımcıların kaygıları giderilmiştir. Dolayısıyla son zamanlarda sistem yeteneklerini kompleks parçaları tek parça olarak sorunsuz bir şekilde basması ve göstermiştir. En bilinen örneği ise GE 'in LEAP jet motoru yakıt enjektörü imalatıdır. Bu parçanın AM metodu ve üretilmeden önce 18 parça olarak üretilmesi ve AM metodu kullanarak tek parça yapılması ve sonucunda parçanın performansında artış gözlenmiştir. Sonuç olarak eklemeli imalat metodu alışılmış imalat metotlarının ötesinde üretim teknolojisine katkı sağlayan bir teknolojidir. Ülkemizde çok da yaygın olarak kullanılmasa da ileride sıklıkla göreceğimiz kesin.

KAYNAKÇA

Cai, C., Tey, W., S., Chen, J., Zhu, W., Liu, X., Liu, T., Zhao, L., Zhou, K. (2021). Comparative study on 3D printing of polyamide 12 by selective laser sintering and multi jet fusion, Journal of Materials Processing Technology, Volume 288, 2021, 116882, ISSN 0924-0136, https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116882.

Campbell, T., Williams, C. B., Ivanova, O., Garrett, B. (2011). Could 3D Printing Change the World? Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing. Atlantic Council. Strategic Foresight Report, October 2011. s.3. https://www.researchgate.net/publication/257942754

Cherdo, L. (2020). Best resin 3D printers in 2020 – SLA, DLP, LCD. Aviwaa. Last update: December 9, 2020. https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-printers/the-best-resin-3d-printer-sla-and-dlp/

Domain Group 3D Printing Workshop Notes. (2013-2017) Introduction to 3D Printing. Europian Social Found. 2013-2017. https://education.gov.mt/en/resources/News/Documents/Youth%20Guarantee/3D%20Printing.pdf

Graf, B., Ammer, S., Gumenyuk, A., Rethmeier, M. (2013). Design of Experiments for Laser Metal Deposition in Maintenance, Repair and Overhaul Applications, Procedia CIRP, Vol. 11, 2013, Pag. 245-248. https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.07.031

Holst, A. (2020). Global 3D printing market size forecast 2013-2021. Statista-Technology & Telecommunications›IT Services. April, 1. 2020. https://www.statista.com/statistics/796237/worldwide-forecast-growth-3d-printing-market/ . E.T. 08.12.2020.

Hull, C., W. (1984). Apparatus for production of three dimensional objects by stereolithography. vol. 4575330, U.S. Patant, Ed, USA: UVP, Inc., San Gabrieal, CA.

Kruth, J., P., Leu, M.C., Nakagawa, T. (1998). Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping, Keynote Papers, CIRP Annals, Vol. 47, Is. 2, p. 525-540. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63240-5

Legutko, S. (2018). Additive techniques of manufacturing functional products from metal materials IOP Conf. Ser., Mater. Sci. Eng. S.393 012003. doi:10.1088/1757-899X/393/1/012003

Nasereddin, J. (2020). An investigation into the feasibility of Fused Deposition Modelling for 3D printing oral pharmaceuticals. Thesis, Doctor of Philosophy. University of East Anglia. Norwich, United Kingdom. DOI: 10.13140/RG.2.2.18012.41603

Ruiz, C., Kadimisetty, K., Yin, K., Mauk, M., G., Zhao, H., Liu, C. (2020). Fabrication of Hard–Soft Microfluidic Devices Using Hybrid 3D Printing.

Journals Micromachines Vol. 11, Is.6, p. 567. https://doi.org/10.3390/mi11060567

Waskar, V., Ugale, G., Taralekar, A. (2018). 3d Building Model Printing. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology. Vol. 6, Is. V, p. 2733-2741. http//doi.org/10.22214/ijraset.2018.5447

Wohlers Report, (2018). Wohlers Report 2018 Shows dramatic rise in metal additive manufacturing and overall industry growth of 21%. Wohlers Associates, Inc. https://wohlersassociates.com/press74.html. E.T. 08.12.2020

Wohlers, T. (2018). Most popular AM application. Wohlers Talk, Views, perspective, and commentary from Terry Wohlers, February 24, 2018. https://wohlersassociates.com/blog/2018/02/most-popular-am-application

Yalçinkaya S. , Aygul E., Şahin Y., (2018).,Titanium Implant for Dental Applications Using 3D Technology, 3rd International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry, Antalya, Türkiye, cilt.1, ss.319-321

İNTERNET KAYNAKÇA

URL 1. 3D Yazıcı (3D Printer) Nasıl Çalışır? - Katmanlı Üretim Yöntemleri. Artı Boyut. https://www.artiboyut.com/index.php/tr/bilgi-bankasi/63-3d-yazici-nasil-calisir-katmanli-uretim-yontemleri. E.T. 08.12.2020.

URL 2. Formlabs, Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing in 2020. https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/#The%20SLA%203D%20Printing%20Workflow E.T. 08.12.2020.

URL 3. Varotsis, A., B. Introduction to SLA 3D printing. 3D HUBS. https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/ E.T. 08.12.2020.

URL 4. Reçineli 3D Yazıcı Teknolojisiyle Üretim, 3D3 Technology. https://3d3teknoloji.com/blog/recineli-3d-yazici-teknolojisiyle-uretim/#:~:text=DLP%20(Digital%20Light%20Processing)%203D%20Yaz%C4%B1c%C4%B1&text=SLA%203D%20yaz%C4%B1c%C4%B1da%20%C4%B1%C5%9F%C4%B1k%20kayna%C4

%9F%C4%B1,her%20katman%20kare%20pikseller-den%20olu%C5%9Facakt%C4%B1r. E.T. 09.12.2020.

URL 5. Lansard M. What is 3D printing? Anniwa. S.G. 27.02.2020. https://www.aniwaa.com/guide/3d-printers/3d-printing-technologies/ E.T. 09.12.2020.

URL 6. Greguric. L. Digital Light Proc. 3D Printing Explained, Wevolver. S.G. 17.10.2019 https://www.wevolver.com/article/digital.light.processing.3d.printing.explained E.T. 09.12.2020.

URL 7. 3D Printers and 3D Printing: Technologies, Processes and Techniques https://www.sculpteo.com/en/3d-printing/3d-printing-technologies/ E.T. 09.12.2020.

URL 8. Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing. https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/#origins E.T. 09.12.2020.

URL 9. SLA 3D Baskı teknolojisi. Fibilo 3D. https://fibilo.com/sla-3d-baski-teknolojisi/ E.T. 09.12.2020

URL 10. Varotsis, A., B. HP MJF vs. SLS: A 3D printing technology comparison. 3DHUBS. https://www.3dhubs.com/knowledge-base/hp-mjf-vs-sls-3d-printing-technology-comparison/#what E.T. 09.12.2020

URL 11. How does the HP Multi Jet Fusion (also known as MJF or HP 3D printing) work: https://forerunner3d.com/hp-multi-jet-fusion-mjf-3d-printing/ E.T. 09.12.2020

URL 12. Fitforlounch. https://fitforlaunch.com/projects/crane-3d-printer/ E.T. 10.12.2020

URL 13. Prusa. https://shop.prusa3d.com/en/17-3d-printers E.T. 10.12.2020

URL 14. Kickstarter. https://www.kickstarter.com/projects/ordsolutions/rova4d-full-color-blender-3d-printer?ref=dfg E.T. 10.12.2020

URL 15. Aka, S. Laminated Additive Manufacturing. https://things-to-do.page.tl/Laminated-Additive-Manufacturing.htm E.T. 10.12.2020

URL 16. Sculpteo, LOM (Laminated Object Manufacturing): 3D Printing with Layers of Paper. https://www.sculpteo.com/en/glossary/lom-definition/#:~:text=Laminated%20Object%20Manufacturing%20(or%20LOM,prototyping%20processes%2C%20not%20for%20production. E.T. 10.12.2020

URL 17. Palermo, E. What is Laminated Object Manufacturing?. Livescience. S.G. 09.10.2013. https://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html E.T. 10.12.2020.

URL 18. An Introduction to Laminated Object Manufacturing. Monroe. S.G. 10.06. 2020 https://monroeengineering.com/blog/an-introduction-to-laminated-object-manufacturing-lom/ E.T. 10.12.2020

URL 19. Laminated Object Manufacturing, LOM. manufacturing guide. https://www.manufacturingguide.com/en/laminated-object-manufacturing-lom E.T. 10.12.2020

URL 20. 3D Printing Market 2018 - Global Forecast to 2024. Marketsandmarkets. S.G. Şubat 2019. https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/3d-printing-market-1276.html E.T. 10.12.2020

URL 21. GE Announces $1.4 Billion Investment: Acquisition of Arcam AB and SLM Solutions. https://3dprint.com/148290/ge-acquires-arcam-slm-solutions/ E.T. 10.12.2020

URL 22. Laser metal deposition (LMD). Trumpf. https://www.trumpf.com/en_SG/solutions/applications/additive-manufacturing/laser-metal-deposition-lmd/ E.T. 10.12.2020

URL 23. Automated Duplex Metal 3D Printing (Laser Metal Deposition - LMD). Laser Additive Solution. https://www.laseradditivesolutions.co.uk/ E.T. 10.12.2020

URL 24. Craftcloud. All3DP. https://all3dp.com/2/3d-printing-supports-guide-all-you-need-to-know/ E.T. 10.12.2020

URL 25. Molitch-Hou, M. (2017). 7 Issues to Look Out for in Metal 3D Printing, 3D Printing, Engneering. S.G. July 10, 2017. https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/15202/7-Issues-to-Look-Out-for-in-Metal-3D-Printing.aspx E.T. 10.12.2020 E.T. 10.12.2020

URL 26. Educationi Engineering. https://www.engineering.com/Education/EducationArticles/ArticleID/13085/GE-Becomes-a-Metal-3D-Printer-Manufacturer-with-New-14B-Acquisitions.aspx E.T. 10.12.2020

BÖLÜM 14
BAZALT TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Fatih ŞAHİN[1], Prof. Dr. Yusuf ŞAHİN[2], Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA[3]
[1] Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara / Türkiye
[2]Nisantasi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İstanbul / Türkiye
[3]Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, İstanbul / Türkiye

Öz: Son yıllarda daha iyi mekanik/fiziksel özelliklere sahip yeni malzemeler elde etme yolunda pek çok araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada; bazalt takviyesinin mekanik özelliklerine etkisini görmek için bazalt kumaş takviyeli epoksi kompozit malzemeler geleneksel yöntem ile üretilmiş ve bazı mekanik özellikler incelenmiştir. Bunlar arasında; basma deneyi, üç noktalı eğilme deneyi, sertlik deneyi ve darbe deneyi ASTM standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Burada üç tür karma malzeme üzerinde çalışılmış, bunlar ağırlıkça %0, %40 ve %60 bazalt kumaş içeren karma malzemelerden oluşmaktadır. Deneysel sonuçlar göstermektedir ki; bazalt takviyeli kompozitlerde bazalt içeriği arttıkça numunelerdeki sertlik ve basma dayanımı artmıştır. Üç noktalı eğilme deneyinde, bazalt kumaş oranı arttıkça numunelerdeki eğilme dayanımı %60 bazalt için 3,32 katına ulaşmıştır. Fakat %60 bazalt içeren numunenin eğilme dayanımı %40 bazalt içeren numunenin eğilme dayanımından %14 daha fazla çıkmıştır. Bunlara ilaveten, darbe dayanımında da iyileşme sağlanmış olup %60 bazalt içeren kompozit numuneler, %40 bazalt içeren kompozit numunelerden %37 daha fazla darbe enerjisi oluşturmuşlardır.

GİRİŞ

Son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler ve bazı gereksinimler mevcut mühendislik malzemelerin geliştirilmesi ihtiyacını doğurmuş ve alaşımların yetersiz kalması kompozit malzemelerin geliştirilmesini hızlandırmıştır. Bir kompozit malzeme, genelde düşük modül/dayanıma sahip reçine ana fazı ile bunun içinde

dağılmış daha az oranda kullanılan tali fazı olan takviye elemanından oluşmaktadır. Takviye elemanı genellikle fiber formunda (karbon fiberler, cam fiberler ve bazalt fiberler) olup matrisin sertliğini ve dayanımını arttırmak için farklı oran, şekil ve dizilimde ilave edilmektedir (Şahin, 2017).

Aynı zamanda düşük sürtünme ve aşınma dirençleri uçaklarda ve diğer dinamik ortamlarda daha uzun süre dayanıma sahip ve daha güvenilir olmaları sebebiyle daha artan oranlarda tercih edilmekte ve sürekli geliştirilmektedir. Bazalt son zamanlarda araştırmalara konu olan en önemli takviye elemanlarından biridir. Bazalt volkanik lavların soğumasıyla oluşan taşlardır ve yerkürenin üçte birinin bazalt olduğu tahmin edilmektedir. Bu yüzden bazalt bol ve oldukça ucuz bir takviye elemanıdır. Bununla birlikte bazalt doğal bir takviye elemanı olduğundan bazalttan yapılan malzemelerde, çevre dostu ve tehlikeli değildir. Çünkü bazaltı oluşturun ana unsurlar SiO_2 ve Al_2O_3'dür. Bazalt taşlarından üretilen elyaflarını ciddi mekanik ve fiziksel özellikleri birçok takviye malzemesinin yerine kullanılmasını sağlamıştır (Preto, 2011; Sahin, 2015).

E-cam elyafları gibi takviye malzemeleri ile kıyaslandığında, hem kolay üretim süreci hem de ucuz olması sebebiyle bazalt elyafları avantajlı konuma gelmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda bazalt takviyeli kompozit malzemelerin E-cam fiber takviyeli kompozit malzemelere oranla daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür (Daek and Chigany, 2009; Manikandan, Jappes, Kumar and Amuthakkannan, 2012).

Bununla birlikte bazalt elyaflar, hammadde kompozisyonu, konveksiyon ve termal radyasyonu önleyen çok miktarda mikro gözenekler sayesinde yanmaz. Bu yüzden termal yalıtımda ve pasif yangın koruma uygulamalarında kullanılabilir (Fiore ve ark., 2015).

Yüksek kimyasal dirence sahiptir. Ayrıca çok düşük sıcaklıkta -200^oC ve yüksek sıcaklıkta 600- 800° C de kullanılabilirler. Bazalt elyaflar uygun özellikleri sayesinde özellikle de yüksek korozyon direnci ile kimya endüstrisinde, aşınma sürtünme elemanı olarak otomotiv endüstrisinde, takviye elemanı olarak inşaat sektöründe, yüksek ısıda çalışan otomobil katalizörü yalıtımında, yangın koruma ve dirençten dolayı CNG tanklarına kullanılmaktadır (Şahin ve Patrick, 2018; Rajkumar and Marimuthu, 2014; Gümülcine ve ark., 2013; Bloom ve ark., 2003).

Mekanik ve fiziksel özelliklerin iyileştirilmesi malzemenin kullanım alanlarının geliştirilmesi, kullanım ömrünün artması ve güvenilirliğinin daha iyi olması

anlamına gelir. Burada yapılan deneysel çalışmalarda, matris malzemesi olarak iyi termal ve mekanik özelliklere sahip epoksi kullanılmıştır. Epoksi reçine endüstride sahip olduğu güçlü mekanik ve yapışma karakteristiği sayesinde sıklıkla kullanılmaktadır (Rajkumar and Marimuthu, 2014; Lopresto ve ark., 2011). Yapılan literatür çalışmalarında, bazalt takviyeli elyaflar ile oluşturulan kompozitlerin mekanik özelliklerine ilişkin yapılan çalışmaların, diğer malzemelere oranla daha az olduğu gözlenmiştir (Todic ve ark., 2011; Chairman and Babu, 2013; Todic, Nedeljkovic, Cikara, and Ristovic, 2011). Bu çalışmada; ağırlıkça %40 ve %60 oranlarında bazalt kumaş içeren epoksi matriksli kompozitler; basma kalıplama yöntemi ile üretilmiştir. Takviye elemanı olan basalt fiberlerin basma, sertlik, eğilme ve darbe davranışları gibi mekanik özellikler üzerine etkisini görmek için ASTM standartlarına uygun mekanik deneyler yapılmıştır ve sonuçlar yorumlanmıştır.

YÖNTEM

Numunenin Hazırlanması

Ana matriks olarak SR 8500 epoksi reçine ve sertleştirici ise SR 8601 seçilmiş olup, Sicoman firmasından tedarik edilmiştir. Bazalt elyaf kumaşlar MC Technics, Belçika firmasından tedarik edilmiştir.

Basalt takviyeli epoksi kompozitin (BFRCs/BFTKs) üretiminde; takviye elemanı olarak basalt kumaş seçilmiş olup, alan yoğunluğu 200 g/m^2 (düz örgü) ve bazalt elyafın çapı 17 µm 'dır. Bazalt kumaşlar bazalt fiberlere oranla daha yüksek yapısal düzen ve sıkılığa sahip olduğundan kompozitlerin hem boylamasına hem de enine mekanik dayanımı arttırdığı görülmüştür.

Basalt ve cam elyafın mekanik ve fiziksel bazı özellikleri Tablo 1 de gösterilmiştir. Üretim işlemi aşağıda verildiği altı basamaktan oluşmaktadır. Bunlar: (a) kalıp hazırlama,(b) fiber/kumaş hazırlama, (c) reçine hazırlama, (d) reçinenin diğer bileşiklerini ayarlama, (e) kalıp içine reçine emdirilmesi/yük uygulanması, (f) hazırlanan bu kompozitlere ısıl-işlem uygulanması. Numuneler bazalt elyafların; örgü yapılı/kumaş kullanılarak epoksi ile kalıplanarak ile üretilmiştir. Burada kullanılan kompozit malzeme klasik açık kalıplama adı verilen üretim yöntemine göre üretilmiştir.

Bir kalıba elle yerleştirilen elyaf kumaşlara bir rulo veya fırça yardımıyla reçinenin emdirilmesi yöntemiyle bu üretim gerçekleştirilmiştir. Bu üretim yöntemde, 1 MPa basınçla 24 saat boyunca oda sıcaklığında kalıp boyunca elde edilen

örgülü kumaştaki 14 sıra ile kalıba uygulanmıştır. Proses sonrası bu tabakalı yapı 60°C sıcaklıkta 24 saat boyunca bekletilir. Bu işlem sonrası malzeme soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra test yapılacak numuneler istenilen ölçüde eğilme/basma/darbe numunesi ölçülerine göre su jeti ile kesilmiştir. Ağırlıkça %0, %40 ve %60 oranlarında bazalt fiber takviyeli 3 ayrı kompozit numuneler deneylerde kullanılmak üzere üretilmiştir.

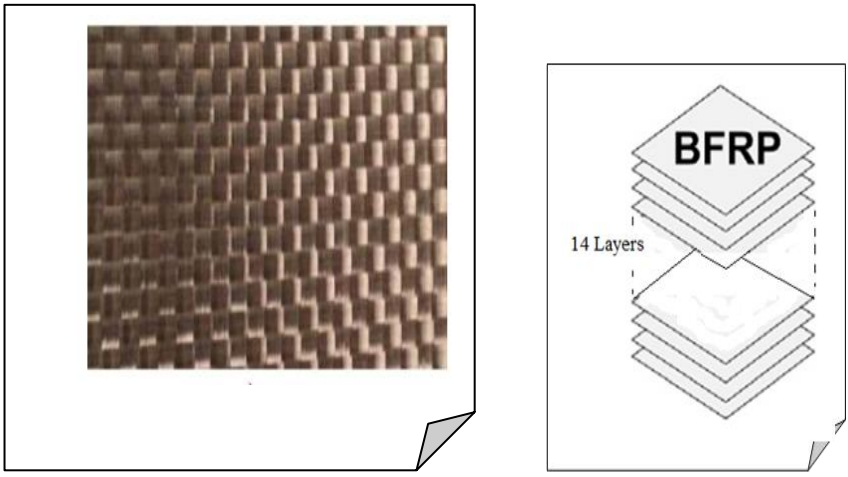
Kompozitin hazırlanması için kalıp boyutu/iş numunesi ölçüsü 150 mm × 150 mm × 4 mm, çelikten kare şeklinde platinden yapılmıştır. Bu kalıbın hazırlandıktan iş parçasını kolayca terketmesi, yapışmayı önlemesi için ve düzgün yüzey elde etmek için kimyasal sıvı madde (releasing agent) uygulanır. Laminate/plate şeklinde kompozit hazırlamak için önce epoksi matriks serilecek tabana sonra elyaf kumaş döşemesi/bindirilmesi ardından matrix/elyaf şeklinde kaç katman oluşturulacaksa o kalınlığı elde edinceye kadar bu işlem devam ettirilir.

Bu çalışmada toplam olarak 14 katmanlı bir tabakalı epoksi bazlı kompozit yapımı gerçekleştirilmiştir. Elbette reçinenin elyafları ıslatması, iyi dağıtılmış olması, arayüzeylerde boşluk bırakılmaması, dişi kalıp altına yine çelik levhaların konumlandırılması, alt ve üst plakalar için yine silikon sıvı sürülmesi gerektiği unutulmamalıdır.

Şekil 1'de epoksi kompozitin üretiminde kullanılan takviye elemanı cinsi ve nasıl hazırlanacağı gösterilmiştir. Burada; (a) da seçilen basalt kumaş/örme elyaf, (b) de ise tabakalı yapının hazırlanması/istiflenmesi verilmiştir**.**

Tablo 1. Basalt ve Cam Elyafın Bazı Özellikleri

Deney malzeme cinsi	**Birim**	**E-Cam**	Basalt
Yoğunluk	g/cm^3	2.56	2.8
Elastik modülü	GPa	76	89
Çekme dayanımı	GPa	1.4-2.6	2.8-4.0
Uzama miktarı	%		
Özgül modül	$GPa.cm^3/gr$	30	31.78



(a) **(b)**

Şekil 1. Epoksi Kompozitin Üretiminde Kullanılan Takviye Elemanı. (A) Seçilen Basalt Kumaş/Örme Elyaf, (B) Tabakalı Yapının Hazırlanması

Mikro Yapı İncelemesi

Üretilmiş olan bu epoksi bazlı iki farklı ağırlık oranı içerikli basalt elyaflar ile takviyelendirilen kompozitin yapısı tarama elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Bu inceleme için, 40% BF içerikli kompozitin yüzeyi standart olarak zımparalama, parlatma ve cilalama işleminden geçmiş ve 6 μm elmas ile parlatılmıştır.

Mekanik Testler

ASTM standardına uygun olarak, farklı mekanik deneyler için sertlik, darbe ve üç noktalı eğilme deneyler bu polimer kompozit malzemeler (BFTK) üzerinde yapılmıştır. En az 5 farklı parça teste tabi tutulmuştur ve ortalama değer alınmıştır. Mekanik deneyler Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği ile Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Mekanik Testler Laboratuvarlarında yapılmıştır.

Sertlik / Basma testi

Farklı takviye elamanı içeren malzemeler üzerinde testler üçer kez tekrarlanmış ortalamaları alınarak değerlendirme yapılmıştır. Sertlik ölçümü de Rockwell B metodu ile gerçekleştirilmiştir. Bu kompozit numunelerinin sertlik testleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği laboratuvarlarında, Bulut Makine markalı cihaz ile gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin basma mukavemetleri, 50kN çekme kapasitesine sahip lnstron 3369 cihazında yapılmıştır. Basma testi için deney işlem sırası ASTM D3410 standardı olarak uygulanmıştır.

Üç nokta eğilme testi

Üretilen karma malzemeleri k Bu eğilme deneyleri Üniversal test cihazı karakterize etmek için eğilme deneyi yapılır. ASTM D790 standardı kullanılmıştır. %0, %40 ve %60 bazalt kumaş takviye elemanı içeren 10 mm x 20 mm boyutlarındaki kompozit malzeme numunelerinin eğilme mukavemetleri 50kN çekme kapasitesine sahip Universal Deney Makinesi olan lnstron 3365 cihazında 10kN yük ölçme kapasitesi olan yük hücresi ile yapılarak belirlenmiştir. Deney numunesi prizmatik olup 64 mm x 12.7 mm x 3.2 mm de hazırlanmıştır. Makinanı başlık hızı 2 m/dak tesbit edilmiştir. Tüm deneylerde ölçme uzunluğu/derinlik oranı sabit olarak 16 alınmıştır. Yük iş numunesi ortasına uygulanmış olup parça kırılıncaya kadar devam etmiştir. Ölçülen verilerin ortalaması alınmıştır.

Eğilme deneyi aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

$$\sigma_f = \frac{3\ PxL}{2\ bxd^2}\ (MPa) \qquad (1)$$

Eq.(1) de σ_f eğilme dayanımını(MPa), P maksimum uygulanan yükü (N), L desteklenen mesafe/uzunluk (mm), b iş numunesi genişliği (mm), ve d iş numunenin kalınlığını (mm) göstermektedir.

Bunun ötesinde, eğilme modülü ise yük yer değiştirme grafiğinin ilk kısmı olan doğrusal kısmın eğiminden tesbit edilebilir aşağıdaki denklem kullanılarak:

$$E_f = \frac{L^3}{4\ bxd^3}\frac{\Delta P}{\Delta x}(GPa) \qquad (2)$$

Darbe testi

İş parçasını kırmak için gerekli olan enerjiyi ortaya çıkarmak amacıyla yapılır. Tokluk bir malzemenin kırılmadan önce sönümlediği enerjinin bir ölçüsüdür. Tokluğun en basit ölçme yöntemi darbe testidir. Cisimlerin darbeye dayanıklılığı malzemenin atom bağları ile yakından ilişkilidir. Seramikler gibi gevrek malzemelerin toklukları, sünek malzemelere oranla daha düşüktür.

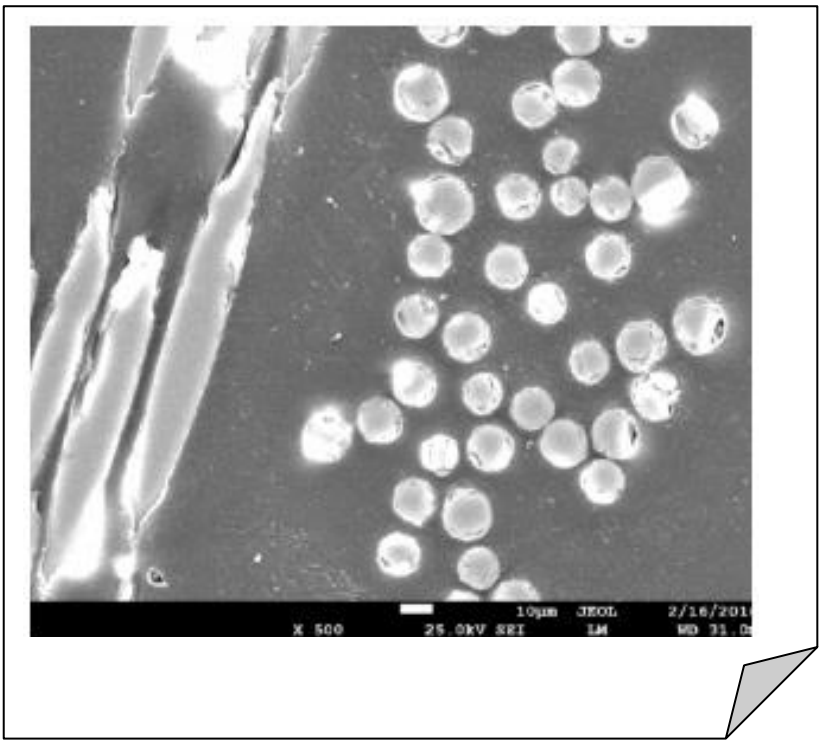
Darbe testi, 150 J darbe uygulama kapasiteli lnstron-Wolpert PW30 test cihazında yapılmıştır. İş parçasına V-çentiği açılmamıştır. ASTM D256 standardına göre testler gerçekleştirilmiştir. 20 mm x 100 mm boyutundaki numuneler yatay olarak orta noktaları darbe çubuğuna gelecek 50 biçimde sabit tablaya yerleştirilir

ve sonrasında test cihazının kapısı kapatılarak cihaz çalıştırılır. Sarkaç yükü uygulanır. Darbe çubuğunun hareketi ile test yapılır ve test sonucunda ekranda görülen enerji değeri (J) not edilir. Her iş numunesinden 5 adet denenir oda sıcaklığında ve ortalaması alınır.

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Kompozitin Yapısı

Burada polimer esaslı kompozitin iç yapıs gösterilmiştir. Burada verilen kompozit yaklaşık %40 basalt içeren epoksi bazlı kompozit olup tarama elektron mikroskobu (TEM) aracılığı ile alınan fotoğrafı Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu mikrofotoğrafta, hem elyafın ekseni doğrultusunda hemde dik doğrultuda uzanmış elyaflar görülmektedir çünkü karma malzeme üretimi esnasında matriks içine yerleştirilen elyaf dokunmuş kumaş formatında olan takviye elemanıdır. Matriks içinde bazı poroziteler görülmektedir sol taraftaki şekilde elyaf – matriks arasında boşluklar daha çok dikkati çekmektedir. Elyaf dağılımının çok uniform olduğu da söylenemez bunun muhtemel sebebi ise daha az içerikli elyaf içermsinden kaynaklanmaktadır. Buna ilaveten, elyafların yüzeylerinde fiber diplerinden kırıldığı da gözlenmektedir, buda elyaf matriks arasında kafi derecede bir bağın oluştuğunu göstermektedir, ya da bu iş numunesi hazırlanması aşamasında meydana gelmiş olabilir. Bunun sonucu olarak mekanik özelliklerinde artış sağlanmıştır (Tablo 2' e lütfen bakınız). Ama elyaf içeriğinin artırılması halinde elyaf dağılımının daha düzgün olduğu ve mekanik özelliklerde daha büyük artışlar sağlandığı rapor edilmiştir (Şahin, 2019).



Şekil 2. İçerisinde %40 Wt.% Basalt Elyaf Katkılı Kompozitin Tarama Elektron Mikroskobu (TEM) Görüntüsü

Yoğunluk ve Sertlik Ölçüm Sonuçları

Üzerinde deney yapılan bu karma malzemelerin (BFTK) yoğunluk ve sertlik değerleri Tablo 2 ve Şekil 3'de gösterilmiştir. Epoksi dahil 40wt.%BF, 60wt.%BF takviyeli kompozitlerin ortalama yoğunlukları sırasıyla 1.123, 1.598 ve 1.908 g/cm^3 olarak ölçülmüştür. Bu değerlerden de görüleceği gibi, takviye fazının artması ile yoğunluklarında referans malzemesine göre arttığı görülmektedir çünkü karşımlar kuralı uymaktadır. %0, %40 ve %60 ağırlık oranında takviye elemanı olarak bazalt kumaş içeren epoksi reçine matris malzemeli kompozit test numuneleri sertlik testleri Rockwell B test metodu ile gerçekleştirilmiştir. Ana matriks, 40wt.% ve 60wt.% BF takviyeli kompozitlerde sertlik değeri sırasıyla; 41 HRB, 48HRB ve 60 HRB olarak elde edilmiştir. %0 bazalt içeren yani epoksi matris malzemesinin sertlik değeri 41 HRB çıkmıştır. Diğer bir deyimle; Ana matrikse göre 40%BF ve 60%BF içerikli epoksi bazlı kompozitler için %17 ve %47 oranında bir artış olduğu görülmektedir. Ağırlıkça %60 içeren numuneler %40 bazalt içeren numunelere oranla ise %25 daha fazla sertliğe sahip çıkmıştır. Ancak aynı

matriks karbon elyaflar ile takviye edildiğinde çok daha fazla artış gözlendiği diğer bir çalışmada açık ve net şekilde görülmüştür (Şahin and Patrick,2018). Artış miktarı %105 ve %122 oranında aynı ağırlık içerikli epoksi de ortaya çıkmıştır. Bunun da sebebinin elyaf özelliğinden ve arayüzey bağının daha iyi olmasından kaynaklandığı rapor edilmiştir. Epoksi ve kompozitl malzemelerden elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 2'de gösterilmiştir. Yapılan literatür çalışmasında bazalt içeriğinin %0'dan %70 oranlarına artmasının numunelerin sertliğini 45,5 HRB'den 68,7 HRB'ye çıkarttığı görülmüştür (Chairman and Babu, 2013; Şahin, 2017).

Üç nokta eğilme testi

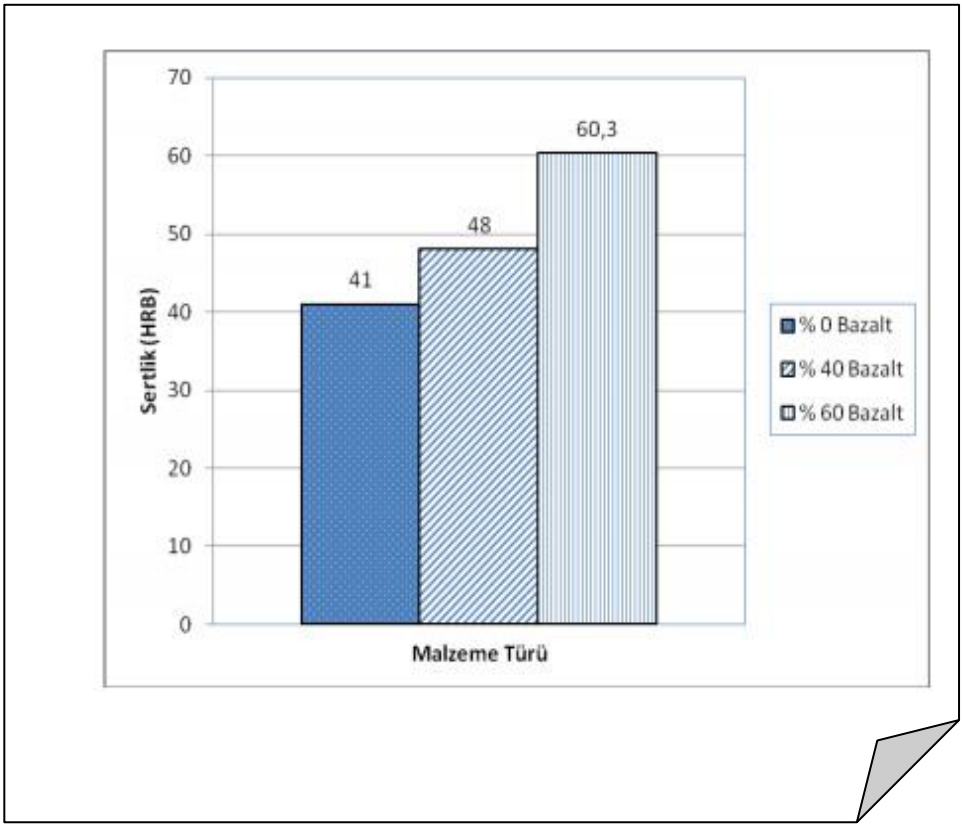
İki tür bazalt kumaş takviye elemanı içeren 10 mm x 20 mm boyutlarındaki kompozit malzeme numunelerinin eğilme mukavemetleri 50kN çekme kapasitesine sahip lnstron 3369 cihazında yapılarak belirlenmiştir. Farklı oranda takviye elamanı içeren test numuneleri üzerinde, üç nokta eğilme testi beşer kez tekrarlanmış, bu değerlerin ortalaması değerlendirmeye alınmıştır. Yapılan test sonrasında elde edilen sonuçlar Şekil 4 ve Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Basalt Takviyeli Kompozitlerin Bazı Mekanik Deneysel Sonuçları

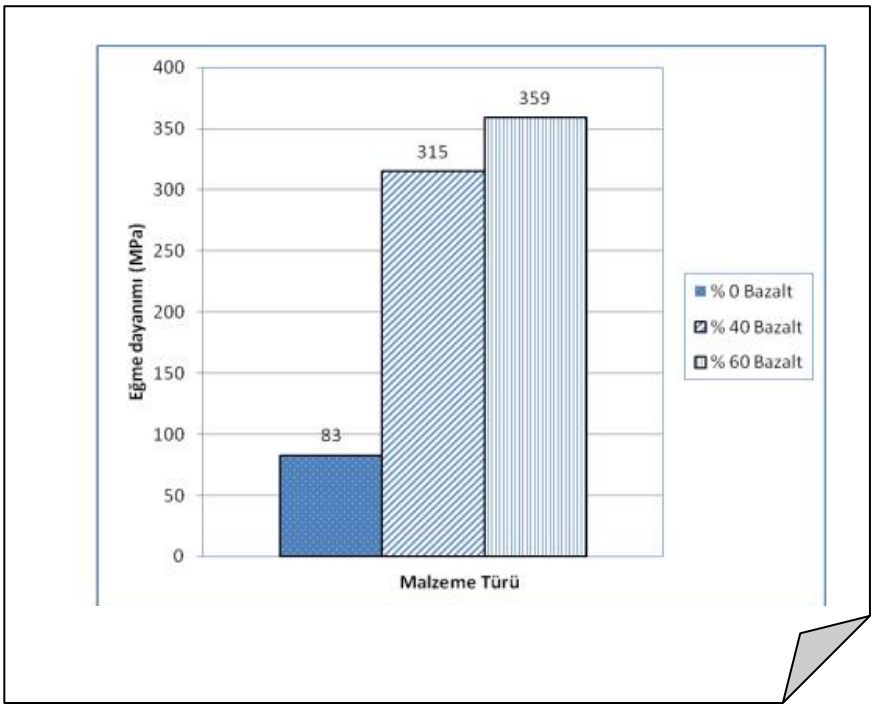
Deney malzeme cinsi	**Kodları**	**Sertlik değeri (HRB)**	**Eğilme dayanımı (MPa)**	**Eğilme modülü (GPa)**	**Darbe enerjisi (J)**
Epoksi matriks	EP	41	83	3.43	2.4
40wt.%BF	BF40	48	315	16.78	15
60wt.%BF	BF60	60.3	359	18.36	16.8

Sonuçlar incelendiğinde; epoksi malzemenin yani %0 bazalt içeriğine sahip test numunesinin eğilme dayanımı 83 MPa çıkmıştır. Epoksi matrise %40 oranında eklenen bazalt kumaşın malzemenin eğilme dayanımını 315 MPa'a çıkardığı görülmektedir. Matrise eklenen %40 oranındaki bazalt malzemenin eğilme dayanımını 2,79 kat arttırdığı görülmüştür. Benzer şekilde matrise eklenen ağırlıkça %60 bazalt takviye elemanı epoksi reçinenin eğilme dayanımını 359 MPa'a çıkarmıştır. Dolayısıyla takviye elemanı malzemenin eğilme dayanımını 3,32 kat artış göstermiştir. Şekil 4'de görüldüğü gibi %60 bazalt içeren test numunesinin

eğilme dayanımı %40 bazalt içeren numunenin eğilme dayanımından %14 daha fazla çıkmıştır.



Şekil 3. Sertliğin Elyaf İçeriği İle Değişimi



Şekil 4. Üç Noktalı Eğilme Testi Sonuçları

Benzer şekilde %50 oranında bazalt içeren polyester matrise sahip kompozitler üzerine yapılan bir çalışmada üç noktalı eğilme testi sonucunda eğilme dayanımının 350,9 MPa olduğunu görülmüştür(Preto, 2011; Şahin and Patrick, 2018). Bu sonuçlar tarafımızdan elde edilen sonuçlarla uyumludur. Yapılan diğer bir çalışmada ise bazalt takviye oranı %5 oranında artınca eğilme dayanımının %16,9 oranında arttığı gözlenmiştir (Şahin,2017; Gümülcine et al.2013).

BASMA TESTİ SONUÇLARI

Farklı bazalt elyaf takviye malzemesi içeriğine sahip iki ayrı kompozit malzeme için test üçer kez tekrarlanmıştır. Sonuçlar test cihazının bağlı olduğu bilgisayarda kurulu programdan alınmıştır. Bulunan test sonuçları Şekil 5'de gösterilmiştir. %0 bazalt içeriğine sahip numunelerin basma testi sonrasında ortalama basma modülü 53,79 GPa 49 olmuştur.

%40 Bazalt içeren numuneler basma testi sonrasında ortalama 72,63 GPa basma modülü sonucu ortaya çıkmıştır. %60 bazalt içeriğine sahip kompozit malzemeler basma testi sonrasında 78,71 GPa basma modülüne sahip olduğu görülmüştür. Beklenildiği gibi bazalt içeriği arttığında kompozitin basma dayanımı artmıştır. %40 bazalt içeren kompozit hiç bazalt içermeyen epoksi malzemeye oranla

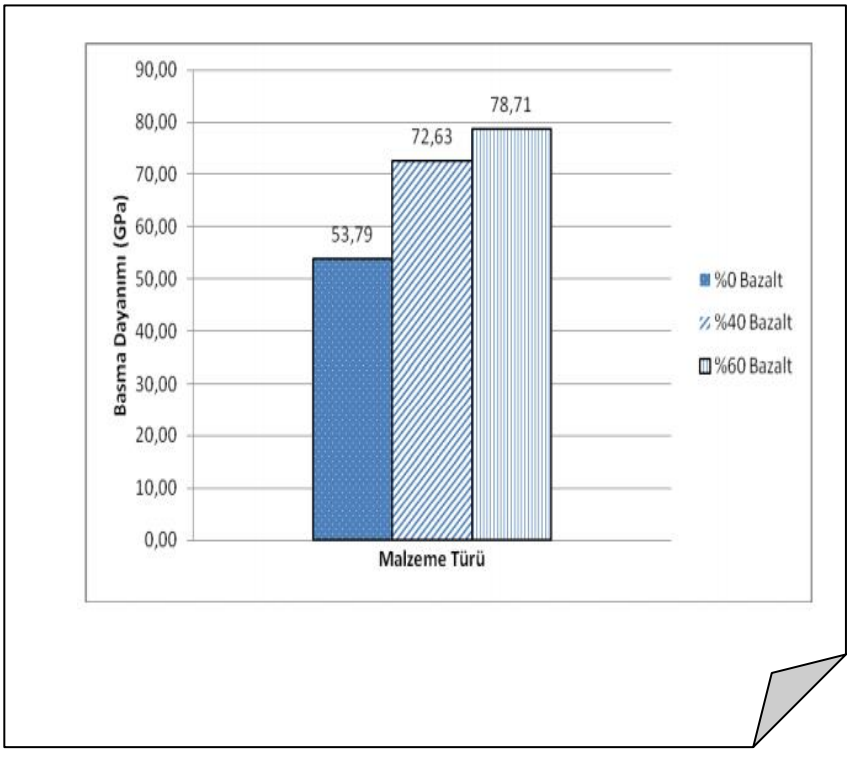
%35 daha fazla basma dayanımına sahip olmuştur. %60 bazalt içeren kompozit malzeme bazalt içermeyen epoksi malzemeye %46 daha fazla basma modülüne sahip olmuştur. %60 bazalt içeren numune %40 bazalt içeren numuneye oranla %8 daha fazla basma modülüne sahip olmuştur.

Sonuç olarak beklenildiği gibi bazalt oranı artınca basma dayanımında ciddi bir artış görülmüştür. Daha önce yapılmış olan bir çalışmaya göre bazalt oranının artmasının basma dayanımını 114 MPa'dan 222 MPa'a arttırdığı görülmüştür. (Lopresto ve ark. 2011, Rajkumar ve ark. 2014).

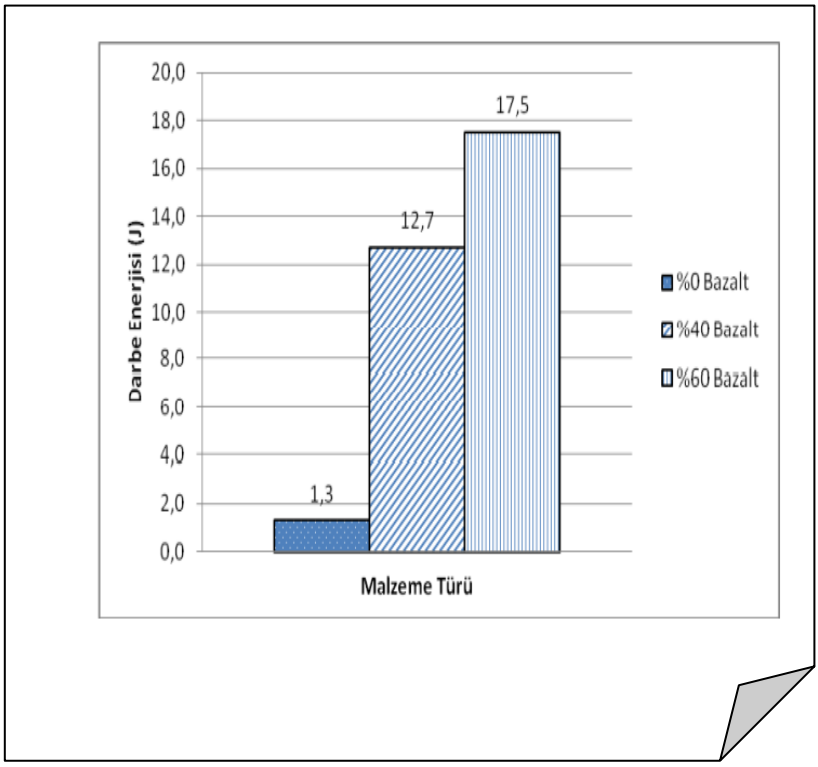
Bunun muhtemel sebebinin uygulanan üretim metodu, uzun elyaf ya da elyaf içeriğinin artmasından kaynaklanmış olduğu düşünülmektedir.

Darbe testi Darbe testi

150 J darbe uygulama kapasiteli lnstron-Wolpert PW30 test cihazında yapılmıştır. Bazalt kumaş takviyeli epoksi kompozit malzemelerin her biri için darbe testi beşer tekrarlı lnstron-Wolpert PW30 test cihazında yapılmıştır ve elde edilen deneysel test sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 5. Basma Deneyi Sonuçları



Şekil 6. Darbe Deneyi Sonuçları

Bazalt içermeyen epoksi malzeme ile yapılan darbe testinde 1,3J değer verirken %40 bazalt içeren malzemeler ortalama 12,7J darbe enerjisine sahip olmuştur. %60 bazalt içeren numuneler ortalama 17,5J darbe enerjisine sahip çıkmıştır. Bazalt içeriği artınca darbe dayanımında ciddi bir artış ortaya çıkmıştır. %40 bazalt içeren numuneler hiç bazalt içermeyen epoksi numunelerin 9,7 katı darbe enerjisine sahiptir. %60 bazalt içeren kompozit numuneler, %40 bazalt içeren kompozit numunelerden %37 daha fazla darbe enerjisine sahip çıkmıştır (Şekil 6). Sonuç olarak epoksi malzemelere ilave edilen bazalt takviye elemanın numunenin darbe dayanımını ciddi ölçüde arttırdığı görülmüştür. Benzer şekilde yapılan literatür çalışmasında bazalt içeriği artan numunelerin darbe dayanımlarının arttığı görülmüştür (Gümülcine et al.2013).

%35, %40 ve %45 oranında bazalt içeriğe sahip kompozit numuneler üzerinde yapılan çalışmalarda bazalt oranı arttıkça darbe dayanımının 0,23 J'dan 0,6

J'a çıktığını göstermiştir. Başka bir ifade ile matris içerisindeki seramik faz arttığından dolayı darbe direncinde de artış gözlenmiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan testler göstermektedir ki epoksi malzemeye seramik takviye fazı arttıkça ana malzemenin tokluk değerinde artış gözlenmektedir (Şahin and Patrick,2018; Chairman ve Babu, 2013).

Bununla birlikte, elyafların ince çaplı olarak üretilmeleri ile, büyük kütlesel yapılara oranla yapısal hata olasılıkları en aza indirilmiştir. Elyafların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mekanik özelliklerini etkileyen diğer önemli bir unsurdur. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir. İki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarsa ise izotop bir yapı oluşturmak mümkündür. Diğer bir mekanizma da çatlak saptırma olarak bilinen çatlağın partiküllere ulaştığında partikülü kıramayıp yön değiştirmesi ve böylece enerjisinin azalması prensibine dayanır.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada; ağırlıkça %0, %40 ve %60 bazalt kumaş takviye içeren basma kalıplama tekniği ile üretilmiş epoksi bazlı kompozit malzemeler üzerinde mekanik testler ASTM standardına uygun olarak yapılmıştır. Bu testler sertlik testi, basma testi, üç noktalı eğilme testi ve darbe testinden oluşmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir.

Bazalt takviyeli kompozitlerde bazalt içeriği arttıkça numunelerdeki sertlik artmıştır. Ağırlıkça %60 içeren numuneler %40 bazalt içeren numunelere oranla ise %25 daha fazla sertliğe sahip olmuştur. Yapılan basma testi neticelerinde bazalt kumaş oranı arttıkça basma dayanımının arttığı görülmüştür. %40 bazalt içeren kompozit hiç bazalt içermeyen epoksi malzemeye oranla %35 daha fazla basma dayanımına sahip olmuştur.

Üç noktalı eğilme testine göre numunelerdeki bazalt kumaş takviyesi arttıkça numunelerdeki eğilme dayanımı artmıştır. Matrise eklenen %60 bazalt takviye elmanı malzemenin eğilme dayanımını 3,32 kat arttırmıştır. Bununla birlikte %60 bazalt içeren test numunesinin eğilme dayanımı %40 bazalt içeren numunenin eğilme dayanımından %14 daha fazla çıkmıştır.

Yapılan darbe testi sonucunda numunelere eklenen bazalt takviyesinin diğer mekanik testlerde olduğu gibi darbe dayanımını ciddi şekilde arttırdığı görülmüştür. %60 bazalt içeren kompozit numuneler, %40 bazalt içeren kompozit numunelerden %37 daha fazla darbe enerjisine sahip çıkmıştır.

Bu konu ile ilgili bundan sonra yapılacak çalışmalar için şunlar önerilebilir:

1. Bazalt takviyeli kompozit malzemelerin diğer özelliklerinden olan yorulma ve korozyon direnci konusunda çalışmalar yapılabilir.

2. Kuru kayma şartları farklı değişkenleri olan sıcaklık ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri konularında çalışılabilir.

KAYNAKÇA

Bloom, P.D., Baikerikar, K.G., Anderegg, J.W. and Sheares, V.V. (2003). Fabrication and wear resistance of Al-Cu-Fe quasicrystal-epoxy composite materials. Materials Science and Engineering A, (360), 46-57.

Chairman, C.A. and Babu, S.P.K. (2013). Mechanical and wear behaivour of glass and basalt fabric reinforced epoxy composites. Journal of Polymer Science, (1130), 120- 130

Daek, T., Chigany, T. (2009). Chemical Composition and mechanical properties of basalt and glass fibres- a comparision. Textile Research Journal, (79), 645-651.

Fiore, V., Di Bella, G. and Valenza, A. (2011). Glass-basalt/epoxy hybrid composites for marine applications. Materials and Design, 32, 2091-2099.

Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G. and Valenza, A. (2015). A review on basalt fibre and its composites. Composites Part B, 74, 74-94.

Fiore, V., Di Bella, G. and Valenza, A. (2011). Glass-basalt/epoxy hybrid composites for marine applications. Materials and Design, 32, 2091-2099.

Gümülcine, T., Bekem, A., Doğu, M.., Gemici, Z. ve Ünal, A. (2013). İzoftalik polyester matrisli sürekli e-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine deneysel bir çalışma. Journal of Engineering and Natural Sciences, (5), 104- 115.

Lopresto, V., Leone, C. and De lorio, I. (2011). Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic. Composites: Part B, (42), 717-723.

Manikandan, V., Jappes, J.T. W., Kumar, S.M.S. and Amuthakkannan, P. (2012). Investigation of the effect of surface modification on the mechanical properties of basalt fibre reinforced polymer composites. Composites:Part B, 43, 812-818.

Preto, R. (2011). Mechanical behavior of basalt fiber reinforced composites. Department of Mechanical Engineering, lnstituto Superior Tecnico, Lisboa, Portugal.

Rajkumar, S. and Marimuthu, K. (2014). Experimental research on the fundamental mechanical properties of basalt fiber reinforcement with epoxy. lnternational Journal of lnnovative Research in Science,Engineering and Technology, 3(11), 17505-17511.

Şahin, F. (2017).Yüksek Lisans Tezi, Bazalt Takviyeli Epoksi Kompozitlerde Abrasiv Aşınma Ve Sürtünme Davranışları, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ekim 2017.

Sahin, Y. (2015), Kompozit Malzemelere Giriş (3.Baskı). Türkiye: Seçkin Yayıncılık, Ankara.

Şahin Y, Patrick DB (2018) Development of Epoxy Composites Containing Basalt and Carbon Fabrics and their Mechanical Behaviours. Int J Metall Met Phys 3:025.

Todic, A., Nedeljkovic, B., Cikara, D. and Ristovic, I. (2011). Particulate basaltpolymer composites characteristics investigation. Materials and Design, (32), 1677- 92 1683.

BÖLÜM 15
HSS, TIN VE TIALN KAPLAMALI MATKAP TAKIMLARI KULLANILARAK AISI D2 ÇELİĞİ ÜZERİNE DELİK DELME İŞLEMLERİ UYGULAMASI

Acar Can KOCABIÇAK [1], Dr. Ögr. Üyesi Senai YALÇINKAYA[2]
[1]Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, İstanbul / Türkiye
[2]Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, İstanbul / Türkiye

Öz: Delik delme operasyonu, otomotiv, uzay ve havacılık, savunma sanayi gibi talaşlı imalatın olduğu her alanda oldukça yaygın kullanılmaktadır. Bu çalışmamızda, matkap takım uçlarının delik delme işlemleri esnasında meydana gelen aşınmalar ve yüzey pürüzlülükleri incelenmiştir. Delik delme işlemine etki eden kesici takım, malzeme, kesme işlemi sırasındaki parametreler irdelenerek takım uçlarındaki aşınmalar incelenmiştir ve sonuçları değerlendirilmiştir. Yüksek aşınma mukavemeti ve tokluğa sahip AISI D2 Çelik malzeme, HSS takım, TIN ve TiAlN kaplama matkap takımlarıyla 11 farklı devir ve ilerleme hızı kullanılarak delik delme operasyonları uygulanmıştır. Delik delme esnasında devir ve ilerleme hızları düzenli olarak arttırılarak matkap ucu aşınmalarına olan etkileri gözlenmiştir. Bu çalışmada Ø8 mm çapında HSS, TIN ve TiAlN kaplama olarak üç ayrı matkap uçları kullanılarak aşınmaları gözlemlenmiştir. Delik delme işlemleri CNC dik işleme tezgâhında uygulanmış olup talaşlı imalat esnasındaki ilerleme hızı, devir ve kesme hızı kayıt altına alınmıştır. Ayrıca takım uçlarının aşınma sonuçları optik mikroskop ile de incelenerek karşılaştırmaları yapılmıştır. Talaşlı imalat işlemleri tamamlandıktan sonra yüzey ölçüm cihazı kullanılarak deliklerin yüzey pürüzlülükleri ile ölçülmüştür. Uygulanan delik delme parametreleri ve kullanılan matkap ucu malzemesinin delik yüzey pürüzlülüklerine etkisi incelenmiştir.

GİRİŞ

Delik delme operasyonu talaşlı üretim tekniklerinden biri olup çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Delik delme işlemi, talaşlı imalat işlemlerinin olduğu hemen hemen her alanda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Matkaplar, delik delme operasyonu için bilinen en klasik yöntemlerden biri olmasına karşın matkap teknolojisi, matkap ucu geometrisi, takımın kaplama türüne ve malzeme teknolojisi alanındaki gelişmelere bağlı olarak her geçen gün değişmektedir ve ilerlemektedir.

Delik delme işlemlerinin uygulandığı iş parçası malzemesinin çeşidine bağlı olarak değişmekle birlikte yüksek hız çeliği YHS / HSS matkaplar talaşlı imalat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstride uzun yıllar HSS matkapları kullanıldıktan sonra üretilen karbür malzeme üzerine TiAlN kaplamalı matkap uçları, çok sık kullanılmışlardır. İşlenen malzemenin cinsine ve sertliğine bağlı olarak HSS ucun yanı sıra karbür TiAlN kaplamalı ve HSS uç üzerine TIN kaplama gibi matkap uçları da kullanılmaktadır.

Bu deneysel çalışmamızın amacı teorik olarak bilinen delik delme işlemi sırasında oluşan takım aşınmalarının matkap ucu malzemesine göre aşınma dayanımlarını inceleyerek kaplamalı ve kaplamasız uçların arasındaki farklılıkları ortaya koymaktır. Ayrıca farklı kaplama ve kesme parametreleri ile yapılan delik delme işlemleri sonrasında deliklerin yüzey kalitelerinin karşılaştırmalı olarak yapılmıştır.

Özellikle seri üretim yapan firmalarda işleme ve takım maliyetleri çok ciddi maliyet oluşturan unsurların başında gelmektedir. Kesici takımların talaşlı imalat esnasında aşınma hesaplarının ve analizlerinin doğru yapılabilmesi amacıyla birçok çalışma yapılmaktadır.

Talaşlı imalat işlemlerinde kullanılan kesici takım cinsi işlenecek iş parçasının malzemesine ve kesme parametrelerine göre belirlenerek uygun kullanıma göre seçilmektedir. Talaşlı imalat sırasında daha iyi kalitede yüzeyler elde etmek için uygun kesme parametreleriyle çalışmak gerekir. Bu kapsamda uygun kesme parametrelerinin belirlenmesi için iş malzemesi ve takım malzemesi oldukça kritik bir öneme sahiptir. İş takım malzemesinin yanı sıra ham malzeme seçiminden sonra ona uygun talaşlı imalat kesme parametrelerinin belirlenmesi oldukça önemlidir (Yalcinkaya and Şahin 2017).

Delik delme işlemleri için matkap takımı analizleri birçok farklı malzeme üzerinde yapılmıştır. (Choudhury and Raju 2000), kesme parametrelerinden kesme hızı ve ilerlemenin kesici kenar üzerindeki aşınmaya olan etkisini incelemişlerdir. Yapılan uygulamalı çalışmada kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine olan etkisi incelenerek ve C_45 orta karbonlu çeliği 3 farklı devirde ve 2 farklı ilerleme miktarında kesme uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

Karbür malzeme ile kaplanmış olan kesici takımlar, yüksek yüzey sertliği, düşük sürtünme faktörü, düşük ısı iletkenliği ve kararlı kimyasal özellikler gibi oldukça yüksek fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir. (Sharma and Sidhu 2014) D2 çeliğinin delik yüzey pürüzlülüğünün ölçümü ve yorumlanması adına matematiksel analizinde yapay sinir ağlarını kullanmışlardır. Kesici çapı, kesme hızı, ilerleme, işleme zamanı yapay sinir ağlarına girdi olarak verilerek yüzey pürüzlülüğü değerlendirilmiştir.

(Aized and Amjad 2013) Analiz çalışması için dinamometre kullanarak D2 standardındaki çeliği üzerinde, farklı matkap geometrisi, helis açısı ve kesme parametreleri kullanılarak deneyler gerçekleştirmiştir ve analizlerde bulunmuştur.

(Sharma and Sidhu 2014), D2 malzemesine delik delme sürecinde, küçük deliklerin kesme performansının araştırılmasında; talaş şekli, moment, delme kuvveti, deliğin yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Kesici kenarın uzunluğunun ve ilerlemenin talaş şekline olan etkisi de dikkate alınmıştır.

Talaşlı imalat sırasında işlenen yüzeydeki aşınma direnci, kesme sırasında meydana gelen sürtünme, korozyon, takım veya iş parçasındaki kaplama, yağlama, dayanma gerilimleri ve işleme sıcaklıkları kesici takımın yorulma koşullarını etkileyebilir. Talaşlı imalat sırasında istenilen yüzey kalitelerini elde edebilmek için, proses sırasında kesme parametreleri olduğu gibi iş malzemesinin özelliklerini de dikkate almak gerekmektedir. Talaşlı imalat ile üretilen nihai ürünün istenilen performans ve kaliteye sahip olması için kesme parametrelerinin yanında özellikle işleme takımlarının malzemesi ve kaplaması oldukça kritik bir öneme sahiptir (Gaitonde et al. 2009; Pereira et al. 2019; Martha, Kishore, and Ramadevudu 2019; Lotfi, Amini, and Al-Awady 2018).

(Siraj, Dharmadhikari, and Gore 2018). Tansel ideal kesme ve parça işleme koşulları kullanarak takım ucunun malzemesi seçilmeli ve uygun kesme parametrelerinde proses araştırma çalışmaları yapmıştır. Bu parametrelerle iş parçası ve

takım malzemesi arasındaki incelemeleri mikro modellerini yaparak bir analiz yapmışlardır.

(Gaitonde et al. 2008), farklı kaplamalara sahip matkap uçları ile paslanmaz çeliklerin delinmesinde takım ömrünün ve çapak oluşumunun iyileştirilmesi üzerinde çalışıp çeşitli Taguchi optimazsyonlarında bulunmuşlardır. Daha uzun ömürlü takım ömrü ve daha düşük aşınma değerleri için en uygun kesme şartlarının bulabilmek adına deneysel çalışmalarda bulunmuşlar ve ilerleme parametrelerini hesaplamışlardır.

(Puneet, Valleti, and Venu Gopal 2017) talaşlı imalat sonucu oluşan aşınma özellikleri ve sekil üzerine yapmış oldukları deneylerde; takım geometrisi, delme parametreleri ve malzemeye ait özelliklerin takım aşınması üzerine olan etkilerini irdelemiş ve oluşan çapakları şekillerine göre aşınma parametrelerini sınıflandırmışlardır.

Talaşlı imalat sürelerinin kısaltılıp verimliliğin arttırılması için kesme ve ilerleme hızlarının gün geçtikçe artmıştır ve üretimde birçok farklı malzemeler kullanılmaktadır. Bu durum hem takım tezgâhlarının gelişimi hem de kesici takımların da gelişimini sağlamıştır. Gelişen teknoloji sayesinde HSS takımların talaşlı imalat ve kesme özellikleri çok ciddi derecede arttırılabilmiştir. Alaşım elementlerinin oldukça düzgün kombinasyonları ve çeşitli ısıl işlemler, HSS(yüksek hız çeliği) malzemesine çok yüksek sertlik ve iyi bir tokluk özelliğinin yanında, oldukça yüksek aşınma direnci özellikleri de kazandırmıştır. Teknolojik gelişmelerin sonucu olarak özel kaplamalı ve toz metalürjisi ile üretilmiş HSS kesici takımlar günümüzde talaşlı imalat işlemlerinde oldukça yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Malarvannan, Moorthy, and Priyan 2014).

Modern kesici takımların geliştirilmesindeki en önemli teknolojik avantajlardan biri de, kesici takımlar üzerine sert ve özel kaplamaların uygulanmasıdır Bu şekilde HSS matkap ucu gibi malzemelerin üzerine TIN gibi aşınma ve kırılma ayanımı çok daha yüksek kaplamalar mümkün hale gelmiştir. Kesici takım üzerine yapılan kaplamalar, kesici takımın aşınma direncini artırmasından ve takım talaş ara yüzeyinde oluşan sürtünmeyi azaltmasından dolayı modern talaşlı imalatta oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Delik delme işlemlerinde kullanılan kaplamasız matkap uçları ve TiAlN kaplamalı HSS matkap uçları ile kıyasladığında, kaplamalı matkapların, kaplama işlemi yapılmamış matkaplara göre oldukça üstün delme performansları gösterdiği ispatlanmıştır.

Deneysel çalışmamızda HSS, TIN ve TiAlN kaplama matkap uçları kullanılarak kesme parametreleri incelenmiştir. Matkap ucu malzemeleri dışında kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği, talaş açısı, işlenen parçanın fiziksel ve kimyasal özellikleri gibi aşınma parametrelerini etkileyen birçok farklı parametre vardır. Bu sebepten ötürü düşük maliyet ve yüksek kalitede ürünlerin elde edilebilmesi için talaşlı imalat sırasında uygun işleme şartlarının belirlenmesi önemli bir faktördür.

YÖNTEM

Delik delme işlemleri Mazak marka 3 eksenli 530C CNC Dikey İşleme Merkezinde yapılmıştır. Mazak marka 3 eksenli 530C CNC Dikey İşleme Merkezinin fotoğrafı Görsel 1'de, teknik özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.



Görsel 15. Deneysel Çalışmanın Yapıldığı 530C CNC Dikey İşleme Merkezi

Tablo 5. Mazak Marka 3 Eksenli 530C CNC Dikey İşleme Merkezi Teknik Özellikleri

Tabla Adedi	**1**
Tablanın Eni	3.500 mm
Tablanın Boyu	820 mm
Maksimum Yükleme Kapasitesi	2.500 kg
Eksen Hareketleri	

X Ekseni	3.000 mm
Y Ekseni	800 mm
Z Ekseni	720 mm
B Ekseni	± 110 derece
Eksen Hareket Hızları	
X Ekseni (maksimum)	50 m/dakika
Y Ekseni (maksimum)	50 m/dakika
Z Ekseni (maksimum)	50 m/dakika
Otomatik Takım Değiştirme Ünitesi	
Magazin Adedi	1
Magazin Takım Kapasitesi	30
Takım Tutucu	CAT40
Maksimum Takım Çapı Yan Cepler Dolu	80 mm
Maksimum Takım Çapı Yan Cepler Boş	130 mm
Maksimum Takım Ağırlığı	8 kg
Maksimum Takım Boyu	350 mm
İş Mili	
Maksimum Devir	18.000 dev/dak
Minimum Devir	35 dev/dak
Uç Standardı	ISO No 40

AISI D2 Çelik Malzemesi

AISI D2 standardındaki malzeme yüksek aşınma mukavemeti ve tokluğa sahip soğuk iş takım çeliğidir. 1.2379 çelik malzeme, yüksek aşınma direncine, yüksek basma dayanımına ve yüksek tokluğa sahip bir malzeme olup sertleştirme ısıl işlemlerine elverişli bir çeliktir. . Deneysel çalışmamızda kullanılan AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin sertliği ısıl işlemli 48 HRC'dir.

Çalışmamızda kullanılan soğuk iş takım çeliği malzemesinin kimyasal kompozisyonu da Tablo 2'te belirtilmiştir. Deneysel çalışmamız kapsamında bu malzemenin kullanılmasındaki en büyük etken endüstride yüksek aşınma dayanımı, yüksek boyutsal kararlılık ve nitrasyon kabiliyeti sayesinde aşınmaya karşı oldukça dayanıklı olmasıdır ve maliyet açısından diğer birçok nikel bazlı aşınmaya dayanıklı özel çeliklere göre daha uygun olmasıdır.

Tablo 6. 1.2379 Soğuk İş Takım Çeliği Malzemenin Kimyasal Kompozisyonu (% Oranı)

KİMYASAL ÖZELLİKLERİ										
C	**Mn**	**Cr**	**Si**	**Co**	**Mo**	**V**	**P**	**Ni**	**Cu**	**S**
1.40 - 1.60	0.60	11.00-13.00	0.60	1.00	0.70-1.20	1.00	0.03	0.30	0.25	0.03

1.2379 malzemesi içerdiği %0.70 Molibden (Mo) alaşımı malzemenin tokluğunu arttırırken, %1 Vanadyum (V) varlığı da mükemmel karbür yapısı ile malzemenin aşınma direncini arttırmaktadır. Ayrıca yüksek Krom (Cr) içeriği malzemenin sertliği ve sahip olduğu ısıl işlem kabiliyetini arttırmaktadır. Sertleşme ısıl işlemi sonrası 63-65 HRC sertliği mertebelerine kadar ulaşabilmektedir. Nitrasyon ısıl işlemi sonrası malzeme 58 – 60 HRC (601 HB – 627 HB) yüzey sertliği civarlarına çıkabilmektedir.

AISI D2 Takım Çeliği Kullanım Alanları

Çelik, demir karbon ve diğer elementlerin bileşiminden meydana gelen bir alaşımdır. Çelik yüksek kopma direncine sahip olması ve diğer çoğu alaşıma kıyasla daha düşük maliyetli olması sebebiyle birçok sektörde kullanılmaktadır. Bu sektörlerinde başında inşaat sektörü gelmekle birlikte, gemi, kalıpçılık, otomotiv, makine, kablo, savunma ve silah sanayi olmak üzere birçok sektörde yaygın kullanım alanlarına sahiptir. Çelik alaşımındaki karbon miktarları çeliğin sınıflandırılmasında etkin rol oynamaktadır. Çeliklerin fiziksel ve mekanik özellikleri, sahip oldukları karbon(C) yüzdesine göre değişmektedir bu sebeple, delik delme ve kesme işlemleri sırasındaki kesici takım ve uygulanan işleme parametreleri de oldukça değişkenlik göstermektedir. Deneysel çalışmamızda kullanmış olduğumuz

AISI D2 soğuk iş takım çeliği yüksek aşınma dayanımı, yüksek boyutsal kararlılık ve nitrasyon kabiliyeti sayesinde kalıpların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

AISI D2 takım çeliği için tipik uygulama alanları aşağıda belirtilmiştir.

- Kesme, bükme ve ezme kalıpları
- Derin çekme ve sıvama kalıpları
- Haddeleme kalıpları
- Döner kesme kalıpları
- Soğuk ekstrüzyon kalıpları
- Röle ve mandrel parçaları

KULLANILAN MATKAP UÇLARI

Deneysel çalışmamız sırasında AISI D2 Çelik iş malzemesi üzerine HSS, TIN ve Karbür üzerine TiAlN kaplamalı matkap uçlarıyla 11 farklı devir ve ilerleme hızında Ø8 mm matkap çapları ile delik delme işlemleri yapılmıştır.

HSS Matkap Ucu Özellikleri

HSS uçlar yüksek hız çeliği olarak tanımlanmakta ve sıcak haddeleme teknolojisi ile üretilmektedir. HSS matkap uçlar yüksek burulma momenti ve elastikiyeti sayesinde düşük alaşımlı çelik, döküm, metal ve metal olmayan malzemelerin talaşlı imalatında ve delmede operasyonlarında kullanılır. HSS uçlar, TIN ve TiAlN kaplamalı uçlara göre aşınma ve mukavemet dayanımları daha düşüktür. Yüksek hız çelikleri, yüksek kesme hızlarında ve kesme parametrelerinde dahi iş parçası üzerinden talaş kaldırılabilme özelliğine sahip, proses sırasında ortaya çıkan yüksek sıcaklıklarda sertliğini büyük oranda koruyabilen malzemelerdir.

TIN Kaplama Matkap Ucu Özellikleri

TIN kaplama literatürde titanyum nitrür kaplama olarak geçmekte olup, TIN kaplama takımlar HSS matkap uçlarına kıyasla aşınmaya karşı daha dayanıklı bir yapıdadır. TIN kaplaması, yüksek kesme hızı ve ilerleme ile yüksek verimli matkap ucudur. Çelik, dökme çelik, alaşımlı ve alaşımsız çelik, gri pik, temper ve yuvarlak döküm ile sinterlenmiş demir, grafit, alüminyum alaşım ve bronz malzemelerin talaşlı imalatı için uygundur. TIN kaplama takımlar, çelik işleme endüstrisinde kullanılan ilk kaplama türüdür ve altın sarısı rengi ile dikkat çeken bir kap-

lama çeşididir. TIN kaplama, İlk olarak buhar biriktirme yöntemi ile 600° C civarına kadar ısıtılarak yüksek hız çeliklerinin(HSS) yüzeylerini kaplamada kullanılmış ve oldukça etkili sonuçlar alınmıştır. Bu çalışmaların akabinde 1980'li yılların başından itibaren birçok işleme ve kesme takımları ile kalıp endüstrisinde TIN kaplama yaygın olarak kullanılmaktadır. Titanyum nitrür kaplama (TIN), PVD tekniği ile oluşturulmuş olan kaplamaların bütün olumlu özelliklerini bünyesinde barındıran kaplama tekniğidir.

Matkap uçları, frezeler, bıçaklar, broşlar, kesme-bükme kalıpları, zımbalar gibi birçok takım ve kalıpta imalatında yaygın olarak kullanılmakta, performans yönünden kaplanan parçaların ömründe ciddi artışlar sağladığı ispatlanmıştır. Kaplanan parçaların özellikle aşınma ve kullanım ömründeki artış, kullanılan kesici takımların cinsine, işlenen malzemenin özelliğine, kullanılan tezgâhın cinsine, operasyon sırasında kullanılan soğutma suyunun özelliğine ve talaşlı imalatın işlem kalitesi göre farklılıklar göstermektedir.

TIN kaplama matkap ucunun üretim sıcaklıkları ve genel teknik özellikleri aşağıdaki Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 7. TIN Kaplama Matkap Ucu Teknik Özellikleri

Renk	Sertlik	Oksidasyon Sıcaklığı	Sürtünme Katsayısı	Kaplama Sıcaklığı	Kaplama Kalınlığı
Sarı	2300-2900 HV	600 °C	0,4	300-480 °C	0.5 µ - 10 µ

TiAlN Karbür Kaplama Matkap Ucu Özellikleri

Özellikle işlemesi zor çok sert metal malzemelerin (>60 HrC) delinmesinde kullanılan karbür matkap uçları birçok farklı çaplarda üretilmektedir. TiAlN kaplamalı matkaplar çok düşük kesme kuvvetlerinde dahi, mükemmel talaş kaldırma ve ısınmaya karşı dirençli bir yapı göstermektedir. Genel olarak TiAlN karbür kaplama matkap matkaplar ultra ince taneli karbürden imal edilmektedir ve özellikle ısıl işlemlerle sertleştirilmiş malzemelerin delinmesinde ve işlenmesinde kullanılmaktadır. TiAlN kaplamalar özellikle delik delme operasyonlarında yüksek

kesme performansları sebebiyle tercih edilen özel kaplamalardır. Yapılan araştırmalar ve analizler neticesinde TiAlN kaplanmış takımlarla yapılan talaş kaldırma işlemlerinde 2-3 kat daha iyi takım ömrü elde edildiği gözlenmiştir. Deneysel çalışmamızda da bu sonuçlara destekler çeşitli uygulamalar yapılarak sonuçları değerlendirilmiştir. TiAlN karbür kaplamalar özellikle yüksek sıcaklıkların etkisinde çalışan kalıp ve takımlar için oldukça ideal bir kaplama çeşididir. Yüksek kesme sıcaklıklarında dahi oldukça iyi ısı iletkenliği ve kimyasal kararlılığı ile talaş kaldırma işlemleri sırasında kesici uçta oluşan ısıyı talaş parçalarına aktarabilmektedir. Bu sayede TiAlN karbür kaplamalar daha yüksek hızlarda ve kesme parametrelerinde çalışmaya olanak vererek daha hızlı üretim, daha az bileme, üretimin verimli olmasını ve takım ömrünün uzun olmasını yardımcı olmaktadır.

Özellikle sürekli talaş kaldırma yapılan imalat işlemlerinde çok iyi performans göstermekte, yüksek ömür artışları ve dayanıklılık sağlamaktadır. TiAlN kaplama çeşidi oksitlenme sıcaklığı en yüksek(800°C) olan kaplama çeşitlerindendir ve oldukça iyi ısıl iletkenlik özelliğine sahiptir. İyi ısıl iletkenliği sayesinde malzemenin ısıdan kaynaklı yorulmasını minimize ederek, yüksek sıcaklıklarda çalışan kalıp ve takımları aşınma etkilerine karşı korur. TiAlN kaplamalar; titan, nikel alaşımları, paslanmaz çelik ve dökme demir, sıçak dövme malzemeler, basınçlı döküm ve ekstrüzyon kökenli malzeme ile yüksek hızda çalışan soğutmasız ve sertleştirilmiş çelik malzemenin işlenmesinde oldukça başarılı sonuçlar vermektedir.

Tablo 8. TiAlN Kaplama Matkap Ucu Teknik Özellikleri

Renk	Sertlik (HV)	Oksidasyon Sıcaklığı	Sürtünme Katsayısı	Kaplama Sıcaklığı	Kaplama Kalınlığı
Mor - Siyah	3400 - 3600	800 ℃ - 900 ℃	0,37	200-500 ℃	2 µ -5 µ

Deneysel çalışmamız kapsamında 240 mm uzunluğun, 90 mm genişliğinde ve 55 mm yüksekliğinde AISI D2 çelik blok malzeme kullanılmıştır. Söz konusu malzemenin yüzey temizliği ve paralelliğinin sağlanması Mazak CNC dik işleme tezgâhında sağlanmış olup, delik öncesi referans delikleri için Ø4 mm çaplarında punta delik uygulaması yapılmıştır. İlk etapta AISI D2 çelik blok malzemenin yüzey temizleme operasyonu yapılmıştır.

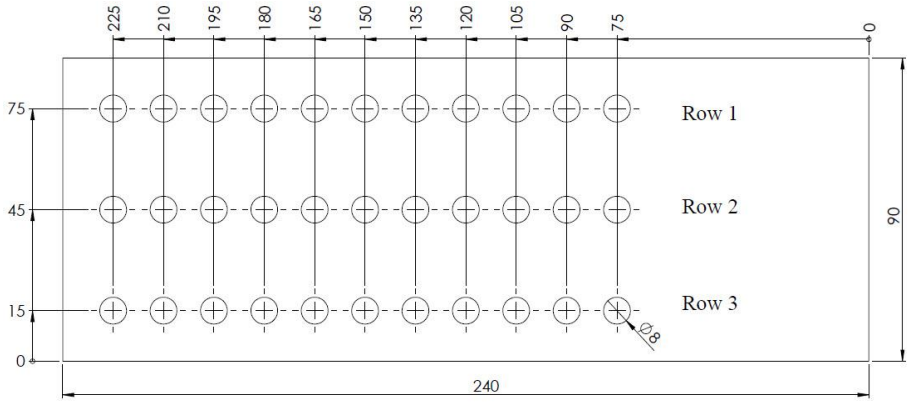
KESME PARAMETRELERİ

Kullanılan kesme parametreleri Tablo 5'te gösterilmiştir.

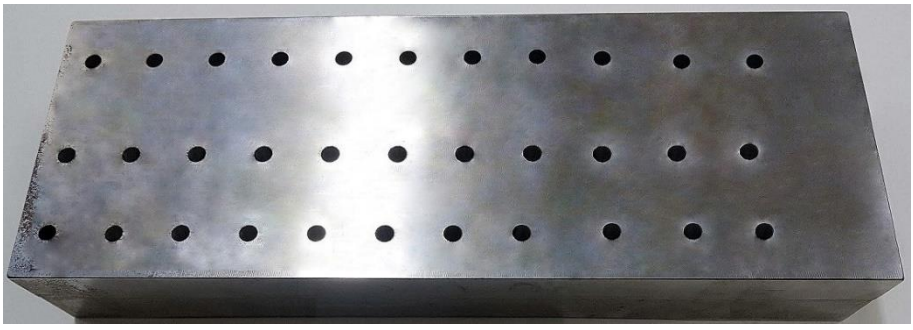
Tablo 9. Kesme Parametreleri

Delik Sıralaması	Delik Derinliği, D (mm)	İlerleme Oranı, F (mm. / rev.)	Kesme Hızı, V (m. / min.)
1	30	50	12,56
2	30	60	13,31
3	30	70	14,07
4	30	80	14,82
5	30	90	15,57
6	30	100	16,33
7	30	110	17,08
8	30	120	17,84
9	30	130	18,59
10	30	140	19,34
11	30	150	20,10

Delme işlemi yapılan iş parçası ve matkap Görsel 2'de gösterilmiştir. İlk etapta yüzey temizliği yapılan malzeme üzerine referans olması açısında Ø4 mm çapında 15mm ofsetle 11 adet punta deliği açılmıştır. Punta deliklerinin delinmesinin akabinde HSS, Tin ve karbür TiAlN kaplama matkap uçları kullanılarak 30 mm derinliğinde delikler delinmiştir.

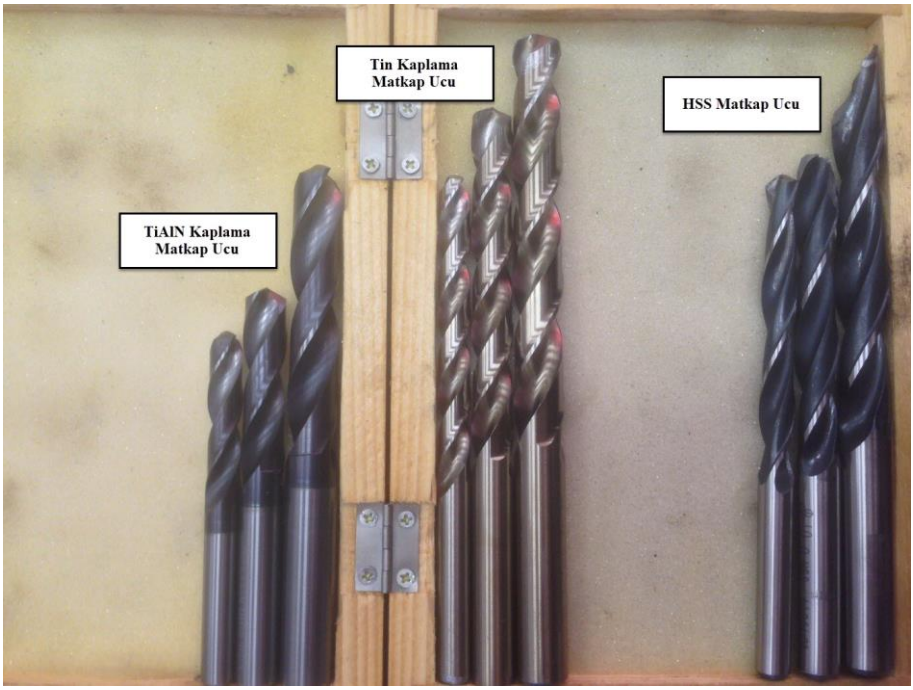


Görsel 16. Deney Düzeneğinin 2D Olarak Çizimi



Görsel 17. Delik Delme Operasyonlari Sonrasindaki D2 Çeliğin Görüntüsü

Deneysel çalışmalar sonucunda matkap uçlarının görüntüsü Görsel 4'te gösterilmiştir.



Görsel 18. Matkap Uçlarının Delik Delme Operasyonları Sonrasındaki Görüntüsü

BULGULAR ve TARTIŞMA

Yüzey pürüzlülüğü ölçümü özellikle bizim deneysel çalışmamızda olduğu gibi birçok işleme sonrası yüzeylerde çok önemli bir proses çıktısıdır. Çalışmamızda Mahr Parthometre yüzey pürüzlülük cihazı kullanılarak incelenmiştir. Her bir deliğin yüzey pürüzlülüğü ölçmek için delik yüzeyine 5 ayrı noktadan temas edilmiştir. Elde edilen tüm değerlerin toplanarak ortalama Ra değeri elde edilmiştir. HSS, TIN kaplama ve TiAlN kaplama yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 6, Tablo 7 ve Tablo 8'de sırasıyla gösterilmiştir.

Tablo 10. Ø8 mm Çap HSS Matkap ile Delik Delme İşlemleri Sonrası Yüzey Pürüzlülükleri

Delik Sıralaması	1. Nokta (µm)	2. Nokta (µm)	3. Nokta (µm)	4. Nokta (µm)	Ortalama Ra (µm)
1	0,708	0,816	0,911	0,920	0,838
2	0,678	0,720	0,773	0,876	0,761
3	0,814	0,718	0,886	0,807	0,806
4	0,761	0,786	0,707	0,828	0,770
5	0,897	0,921	0,871	0,787	0,869
6	0,820	0,891	0,897	0,812	0,855
7	0,871	0,816	0,886	0,817	0,847
8	0,88	0,876	0,812	0,807	0,843
9	0,912	0,827	0,86	0,898	0,874
10	0,760	0,807	0,793	0,802	0,790
11	0,804	0,81	0,833	0,832	0,819
			Average Ra		**0,8251**

Tablo 11. Ø8 mm Çap TIN Kaplama Matkap ile Delik Delme İşlemleri Sonrası Yüzey Pürüzlülükleri

Delik Sıralaması	1. Nokta (µm)	2. Nokta (µm)	3. Nokta (µm)	4. Nokta (µm)	Ortalama Ra (µm)
1	0,597	0,580	0,612	0,575	0,591
2	0,595	0,590	0,617	0,622	0,606
3	0,588	0,576	0,625	0,671	0,615
4	0,600	0,581	0,65	0,694	0,631
5	0,612	0,635	0,677	0,700	0,656
6	0,621	0,678	0,690	0,685	0,668
7	0,625	0,655	0,675	0,657	0,653
8	0,661	0,67	0,684	0,695	0,677
9	0,695	0,703	0,716	0,77	0,721
10	0,700	0,752	0,725	0,728	0,726
11	0,716	0,765	0,771	0,700	0,738
				Ortalama Ra	**0,6621**

Tablo 12. Ø8 mm Çap TiAlN Kaplama Matkap ile Delik Delme İşlemleri Sonrası Yüzey Pürüzlülükleri

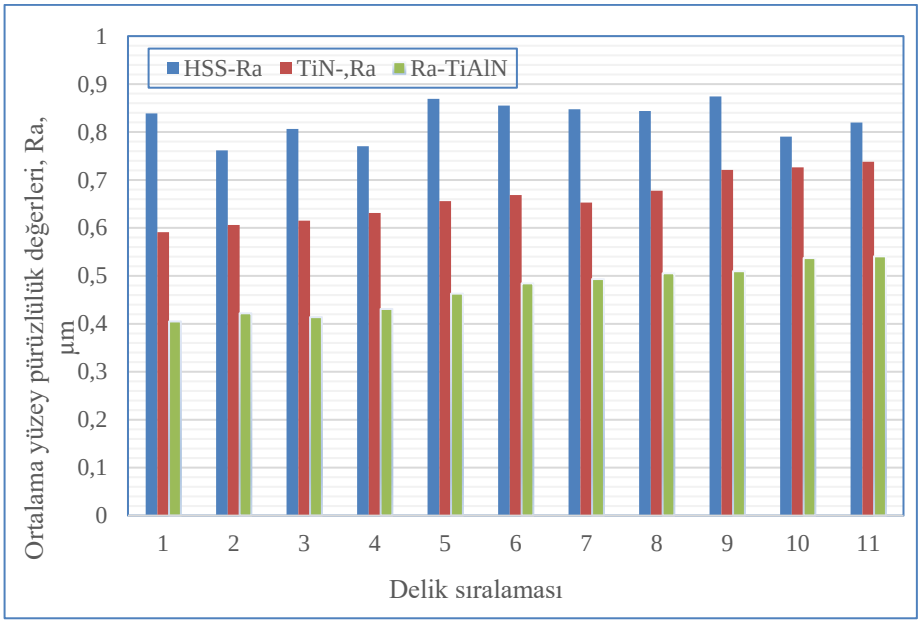
Delik Sıralaması	1. Nokta (µm)	2. Nokta (µm)	3. Nokta (µm)	4. Nokta (µm)	Ortalama Ra (µm)
1	0,402	0,398	0,43	0,39	0,405
2	0,415	0,430	0,443	0,400	0,422
3	0,406	0,390	0,443	0,417	0,414
4	0,419	0,400	0,477	0,428	0,431
5	0,435	0,466	0,481	0,47	0,463
6	0,490	0,483	0,478	0,486	0,484
7	0,467	0,500	0,520	0,486	0,493
8	0,483	0,506	0,527	0,506	0,505
9	0,503	0,512	0,527	0,497	0,509
10	0,512	0,527	0,576	0,533	0,537
11	0,517	0,536	0,563	0,547	0,540
				Ortalama Ra	**0,4732**

Yukarıdaki tablolarda görüleceği üzere en düşük yüzey pürüzlülük değerleri ortalama 0,47322 µm ile TiAlN kaplı matkap uçlarından elde edilmiştir. TIN kaplama matkap uçlarından elde edilen değer ortalama 0,6621 µm olup en kötü yüzeyler 0,8251 µm ortalama ile HSS matkap takımlarından elde edilmiştir. Bu durumun nedeni, TiAlN kaplamanın 3300 HV sertliğine sahip olması ve düşük termal iletkenlik özelliğidir.

Ayrıca, TIN kaplamanın 2200 HV civarındaki sertlik değeri ve yüksek oksidasyon direnci yüzey pürüzlülük değerlerini doğrudan etkilemiştir. Bu sonuçlar, HSS matkap uçlarının yüksek kesme hızları için TIN ve TiAlN kaplamalı takımlara kıyasla daha kısıtlı olduğunu göstermiştir.

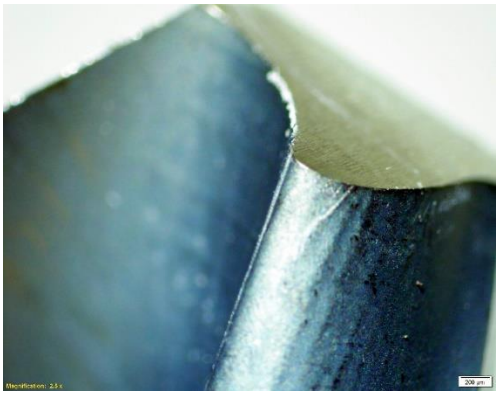
HSS matkabın sertliği yaklaşık 900 HV iken maksimum çalışma sıcaklığı yaklaşık 500 °C'dir ve bu durum söz konusu parametrelerde delik delme işlemlerine karşı yeterli direnç değildir. Bu sebeple deliklerin yüzey kaliteleri kademeli

olarak bozulmaktadır. Şekil 4'te, yüzey pürüzlülüğünün, HSS takım uçları için diğer kaplamalı HSS' takımlara karşı önemli ölçüde daha yüksek olduğu açıkça gösterilmiştir.

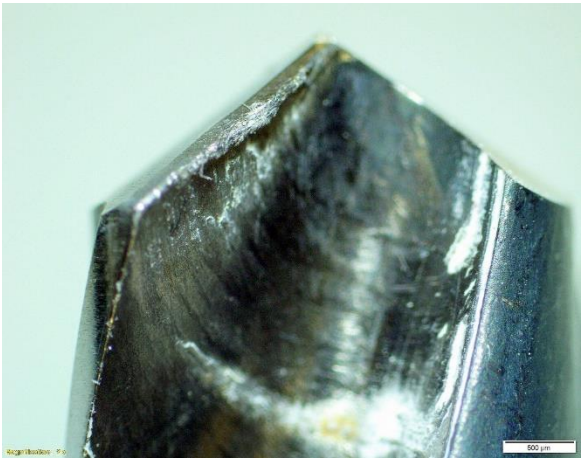


Görsel 19. Ortalama Yüzey Pürüzlülükleri

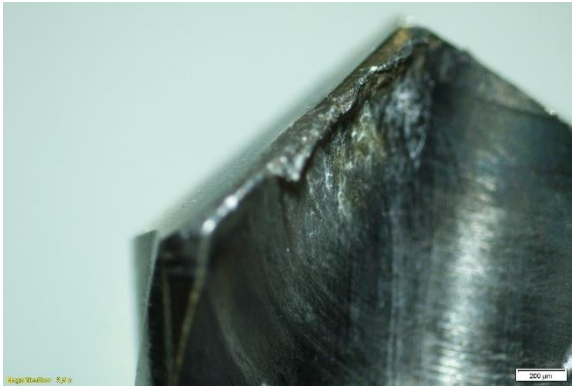
Özet olarak en pürüzsüz yüzeyler TiAlN kaplı matkap uçları ile elde edilmiş olup en kötü yüzeyler ise HSS matkap ucu ile elde edilmiştir. TIN kaplı uçlar ile elde edilen yüzey kalitesi, HSS ve TiAlN kaplı matkap uçlarının ortasındadır. Yüzey ölçüm pürüzlüklerinin yanında optik mikroskop ile aşınan matkap uçları da incelenmiştir.



(a)



(b)



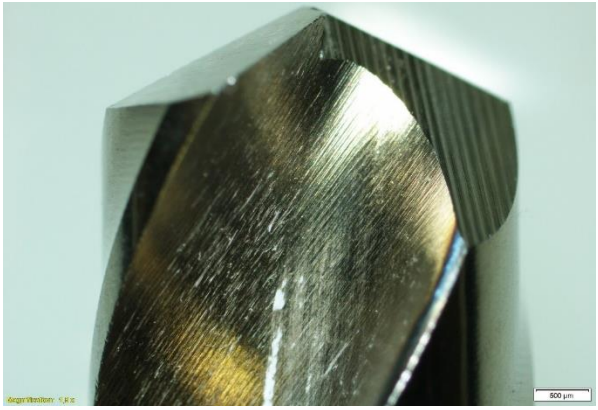
(c)

Görsel 20. Optik Mikroskopla Alınan Ø8mm Çaplı HSS Matkap Uçları (A) Kullanılmamış Matkap Ucu, (B, C) Aşınmış Matkap Uçları

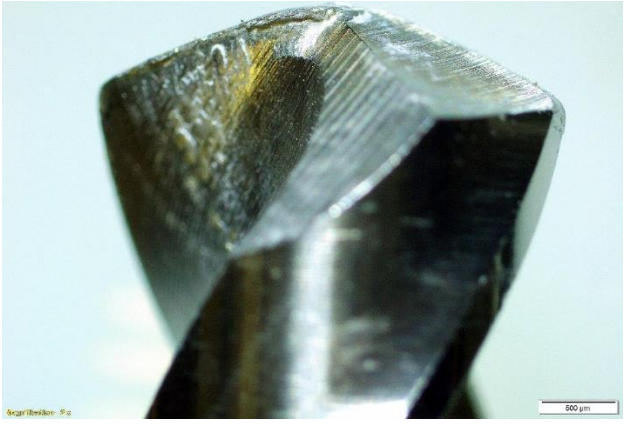
Deneysel çalışmanın başlangıcında kullanılan HSS matkap ucunun mikroskop görüntüsü yukarıda verilmiştir. Ø8 mm HSS matkap ucunun yüzeyi kullanılmadan önce pürüzsüz olduğu ve kesici yüzeylerin aşınmadığı açık bir şekilde görülmektedir.

Mikroskop görüntülerinden görüldüğü üzerine delik delme operasyonlarının tamamlanmasının akabinde Ø8 mm çaptaki HSS matkap ucunda aşınma ve bozulmalar meydana gelmiştir. Mikroskop görüntülerinden de net bir şekilde anlaşıldığı üzere aşınmalar özellikle 118° kesme açısı olan ağızlarda meydana gelmiştir.

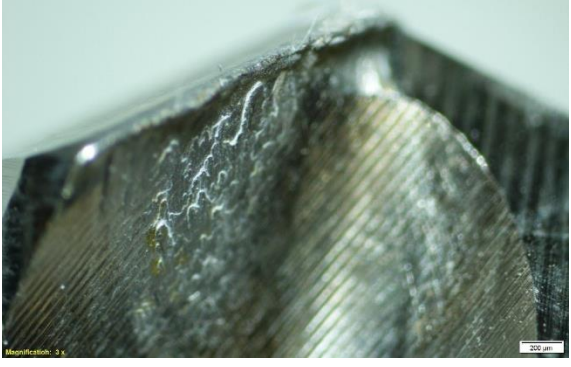
Matkap zırh kısımlarında aşınma oluşmuş ve matkap yüzeyinde bozulmalar meydana geldiği görülmüştür.



(a)



(b)



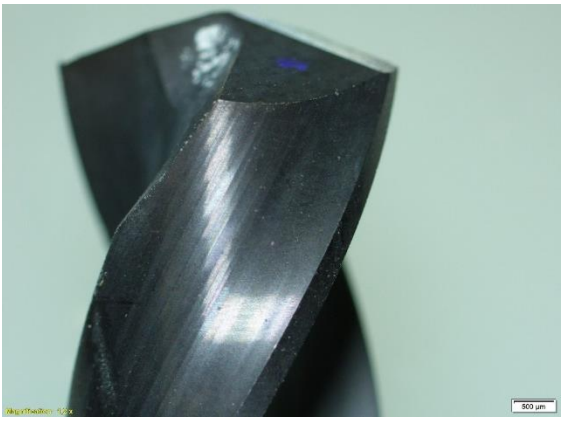
(c)

Görsel 21. Optik Mikroskopla Alınan Ø8mm Çaplı TIN Kaplamalı Matkap Uçları (A) Kullanılmamış Matkap Ucu, (B, C) Aşınmış Matkap Uçları

Deneysel çalışmanın başlangıcında kullanılan TIN Kaplama matkap ucunun mikroskop görüntüsü yukarıda verilmiştir. Yukarıdaki görüntülerden de anlaşılacağı üzere delik delme çalışmalarından önce yüzey üzerinde herhangi bir aşınma veya kırılma söz konusu değildir.

Kaplama yüzeyi delik delme işlemlerine başlamadan önce oldukça temiz bir yapıdadır. TIN kaplama matkap ucu Ø8 mm çaptaki HSS uca oranla daha dayanıklı olması sebebiyle daha az aşınma meydana gelmiştir ancak yine de ciddi oranda oluşan aşınmaların önüne geçilememiştir.

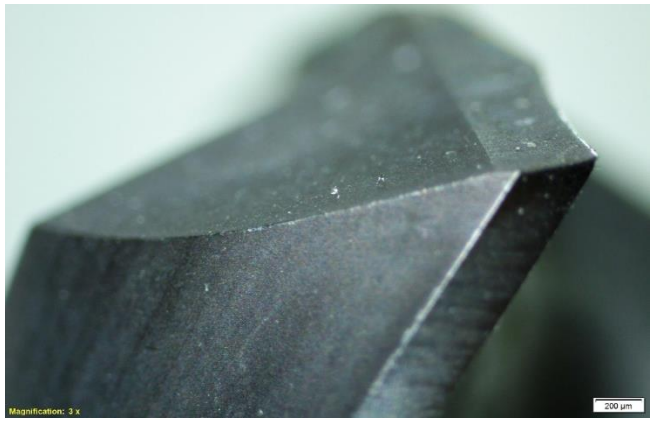
Matkap ucunda kopmalar veya kırılmalar meydana gelmemiştir ancak mikroskop görüntülerinden de anlaşılacağı üzere yüzey aşınmaları tespit edilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Görsel 22. Optik Mikroskopla Alınan Ø8mm Çaplı Tialn Kaplamalı Matkap Uçları (A) Kullanılmamış Matkap Ucu, (B, C) Aşınmış Matkap Uçları

Deneysel çalışmanın başlangıcında kullanılan karbür üzerine TiAlN Kaplama matkap ucunun mikroskop görüntüsü yukarıda verilmiştir. Yüzeyde herhangi bir aşınma meydana gelmemiştir. Talaşlı imalat operasyonlarında TiAlN kaplamalı kesici takımlarda, yüksek aşınma direnci ve termal kararlılık gözlenmiştir. Elde edilen mikroskop görüntülerinde de TiAlN kaplamalı kesici takımlarda aşınma miktarına bağlı olarak, sürtünme kuvvetlerindeki artış oranı, diğer kesicilere göre en az olmaktadır. Yapılan deneylerde talaş kaldırma performansı en yüksek kesici takımın TiAlN kaplamalı kesici takım olduğu görülmüştür. Düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip TiAlN kaplanmış kesici takımlarda üretilen ısının büyük bir kısmı talaş ile dışarı atıldığından talaş oluşumu iyidir. TiAlN kaplanmış takımlarla yapılan talaş kaldırma işlemlerinde 2-3 kat daha iyi takım ömrü elde edilmiştir. Hss ve TIN kaplama kesici takımlara kıyasla önemli oranlarda takım ömrü artışı sağlanmaktadır. Buna bağlı olarak işleme ve işleme hızlarında %10-100 oranlarında artış sağlanmakta, işleme kısalmakta ve yüzey kalitesinde iyileşmeler olmaktadır.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan deneysel çalışmalarda işlenen parça markalanmadan önce tüm kenarlardan yüzeyleri CNC frezede temizlenerek uygun yüzey elde edildi ve geometrik olarak düzlemselliği sağlandı. Delik delme işlemlerine başlanmadan önce iş parçası üzerine markalama yapıldı ve 4 mm derinliğinde puntalama operasyonları yapıldı. Daha sonraki aşamada deneysel çalışma işlemleri tamamlandı. De-

neysel çalışmaların tamamlanmasının akabinde her delik için ayrı ayrı yüzey pürüzlülük ölçümleri yapıldı ve sonuçları Excel dosyasına aktarıldı. Excel tablo ve grafikleri oluşturuldu. Elde edilen değerler doğrultusunda Taguchi programında analizler yapılarak çıkan sonuçlar değerlendirildi. Deneysel çalışma için kullanılan matkap uçları 3D lazer tarama cihazı ile her bir matkap için detaylı şekilde ölçümler ve yüzey pürüzlülük analizleri yapıldı. Son aşamada da matkap uçlarının aşınma parametrelerini optik mikroskop ile inceleyerek sonuçlar kayıt altına alınmıştır.

Deneysel çalışmamız sırasında farklı kaplamlara ait Ø8 mm, mm matkap çapları kullanılarak aşınma parametreleri incelenerek kesme parametleri ile ilişkisi incelenmiştir. Bu kapsamda elde edilen aşınma değerlerinin matkap ucu malzemesi, matkap çapı, ilerleme hızı, devir, ve kesme hızı arasındaki bağıntıları ayrı ayrı irdelenmiştir. Bu kapsamda ilerleme hızı, metkap ucu çapı, matkap ucu malzemesi, kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi olduğu saptanmıştır. Deneysel çalışmamızı bu şekilde değerlendirdiğimizde TiAlN kaplamanın, HSS ve TIN kaplama matkap uçlarına göre daha dayanıklı olduğu ve çok daha düzgün yüzey pürüzlülükleri elde edildiği görülmüştür. Aşınmaya karşı en dayanıksız olan uç ise HSS matkap ucu olduğu ispat edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı destekleyen Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (MÜBAP)birimine teşekkür ederim (Proje No: FEN-C-YLP-131217-0681).

KAYNAKÇA

Aized, Tauseef, and Muhammad Amjad. (2013). “Quality Improvement of Deep-Hole Drilling Process of AISI D2.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 69 (9–12): 2493–2503. https://doi.org/10.1007/s00170-013-5178-4.

Altıntaş, Yusuf. (2012). *Manufacturing Automation*. *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*. Second Edi. Vol. 48. Cambridge University Press. https://doi.org/10.2493/jjspe1933.48.945.

Astakhov, Viktor P. VP. (2006). *Tribology of Metal Cutting, Volume 52 (Tribology and Interface Engineering)*. https://doi.org/10.1097/00000542-200203000-00013.

Choudhury, S. K., and Ganga Raju. (2000). “Investigation into Crater Wear in

Drilling." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40 (6): 887–98. https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00089-9.

Gaitonde, V. N., S. R. Karnik, B. T. Achyutha, and B. Siddeswarappa. (2008). "Taguchi Optimization in Drilling of AISI 316L Stainless Steel to Minimize Burr Size Using Multi-Performance Objective Based on Membership Function." *Journal of Materials Processing Technology* 202 (1–3): 374–79. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.08.013.

Gaitonde, V. N., S. R. Karnik, Luis Figueira, and J. Paulo Davim. (2009). "Machinability Investigations in Hard Turning of AISI D2 Cold Work Tool Steel with Conventional and Wiper Ceramic Inserts." *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 27 (4): 754–63. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.12.007.

Lotfi, Mohammad, Saeid Amini, and Ihsan Yaseen Al-Awady. (2018). "3D Numerical Analysis of Drilling Process: Heat, Wear, and Built-up Edge." *Advances in Manufacturing* 6 (2): 204–14. https://doi.org/10.1007/s40436-018-0223-z.

Malarvannan, Ravi Raja R., T. V. Moorthy, and M. Shunmuga Priyan. (2014). "Performance of PVD Coated on High Speed Steel Cutting Tool in Industrial Applications." *Advanced Materials Research* 984–985: 495–501. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.984-985.495.

Martha, Prabhu Kiran, K. Kishore, and Gokarakonda Ramadevudu. (2019). "Lifetime and Performance Improvement of HSS Drill Bit by Titania (TiO2) Nano-Coatings and Cryogenic Treatment." *International Journal of Engineering and Advanced Technology* 8 (6): 1389–93. https://doi.org/10.35940/ijeat.F8100.088619.

Özbek, Y., Yalçınkaya, S., (2019) "Alüminyum 7075 alaşımının delinmesi işleminde kullanılan farklı matkap uçlarının işlem sonrası incelenmesi" 5th Internatıonal Congress on Engıneerıng, Archıtecture and Desıgn, İstanbul, Türkiye, 21 - 22 aralık, cilt.1, ss.385-394

Pereira, Robson Bruno Dutra, Carlos Henrique Lauro, Lincoln Cardoso Brandão, João Roberto Ferreira, and J. Paulo Davim. (2019). "Tool Wear in Dry Helical Milling for Hole-Making in AISI H13 Hardened Steel." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 101 (9–12): 2425–39. https://doi.org/10.1007/s00170-018-3129-9.

Puneet, P. C., Krishna Valleti, and A. Venu Gopal. (2017). "Influence of Surface Preparation on the Tool Life of Cathodic Arc PVD Coated Twist Drills." *Journal of Manufacturing Processes* 27: 233–40. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.05.011.

Yalçınkaya.S.,(2017)., "Corrosion and Surface Protection in Machinematerials Friction have Different Surface Pairs Experimental Investigation of Factors". Fiabilitate si Durabilitate 2017 - Fiability Durability, cilt.1, ss.3-12.

Sharma, Jagdeep, and Balwinder Singh Sidhu. (2014). "Investigation of Effects of Dry and near Dry Machining on AISI D2 Steel Using Vegetable Oil." *Journal of Cleaner Production* 66: 619–23. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.042.

Siraj, Sayyed, H. M. Dharmadhikari, and Nilesh Gore. (2018). "Modeling of Roughness Value from Tribological Parameters in Hard Turning of AISI 52100 Steel." *Procedia Manufacturing* 20: 344–49. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.050.

Şahin, Y., Yalçınkaya, S., (2017) "Study of the Surface Finish When Turning Hardened Steels"

Materials, Methods, Technologies, Jurnal of international Publications, ss.307-316

Wu, Xuefeng, Yahui Liu, Xianliang Zhou, and Aolei Mou. (2019). "Automatic Identification of Tool Wear Based on Convolutional Neural Network in Face Milling Process." *Sensors (Switzerland)* 19 (18). https://doi.org/10.3390/s19183817.

Yalcinkaya, S., and Y. Şahin. (2017). "Study on Surface Finish of AISI 2080 Steel Based on the Taguchi Method." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 174 (1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/174/1/012063.

BÖLÜM 16
DİŞLİ ÇARKLAR VE UYGULAMALARI

Doç. Dr. Hüseyn MİRZAYEV
Bakü Mühendislik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Bakü / Azerbaycan

Öz: Çalışmada dişli çarkların tanımı, sınıflandırılması ve tasarımı, konstruksiyonu örnekler üzerinde dişli çark tasarım ve yapısının incelikleri verilmişdir. Silindirik ve konik dişli çarkların modern çizimleri işlenmiş ve işlemlerde dizyn ve teknolojinin kombinasyonu yapılmış, rasyonal konstruksiyonun realize edilmesi için temel ve tasarım boyutlarının belirlenmesine gayret edilmiştir. Dişli çark mekanizmalarının, silindirik, konik ve sonsuz vida dişli kutularının klasik ve modern, kinematik şemaları karşılaştırılmış, mühendislik açısından özellikleri incelenerek uygulama durumu ve alanları konusunda fikir yürütülmüştür. İki ve çok kademeli redüktörlerin yapısal şemaları işlenmiş, kademeler için çevrim oranlarının rasyonal değerleri basit yöntemlerle belirlenerek yorumlanmıştır. Silindrik dişli çarklarda diş dibi mükavemetlerinin hesaplanması yöntemleri analiz edilmiş, dişli çarklar arasında olan farklar açıklanmıştır. Dişli çark diş sayısı, modül ve taksimatı gibi parametrelerin diş form faktörüne etkisi degerlendirilmiştir. Asansör kapılarının açılıb-bağlanılması için büyük çevrim oranına sahip kayış kasnak mekanizmasının yerine modern tasarıma sahip üç kademeli metal-polimer dişli çark mekanizması tasarlanmış ve uygulanmıştır.

GİRİŞ

DİŞLİ ÇARK MEKANİZMALARI

Dişlilerin teması vasıtasıyla millerin dönme momentleri ve devir sayısını değiştirerek hareketi ileten veya bir hareket türünü diğerine dönüştüren bir mekanizmadır. Basit bir dişli mekanizma, biri döndüren diğeri döndürülen olmak üzere iki dişliden oluşur. Döndüren dişlisi genellikle geometrik boyutta döndürülen dişlisinden daha küçüktür. Bu tür mekanizmalar dönme hızını azaltır,

torku artırır ve redüktör olarak adlandırılır. Bu tür mekanizmalar üretimde yaygındır. Ancak pratikte bazen durum tam tersidir. Bu durumda, döndüren dişlisi büyük bir dişli haline gelir, bunun sonucunda mekanizma dönme hızını arttırır, torku azaltır ve multiplikatör olarak adlandırılır.

Dişliler aşağıda verelen gibi sınıflandırılabilir:

Çarkın geometrik şekline göre; Silindirik ve konik dişliler

Diş tipine göre; Düz, helisel, ikili helisel, çivi helisel (ok dişli), ve eğrisel dişliler.

Dişlilerin oturduğu millerin eksenlerinin mekansal düzenlemesi nedeniyle, mekanizma paralel, kesişen ve aykırlı miller arasındaki transmisyonlara bölünür.

Paralel miller arasındaki hareket aktarımı, silindirik düz, eğik ve çift dişlilerle, konik dişlilerle kesişen şaftlar arasında ve sonsuz vida, dişli-vida ve hipoid transmisyonlarla kesişen şaftlar arasında gerçekleştirilir.

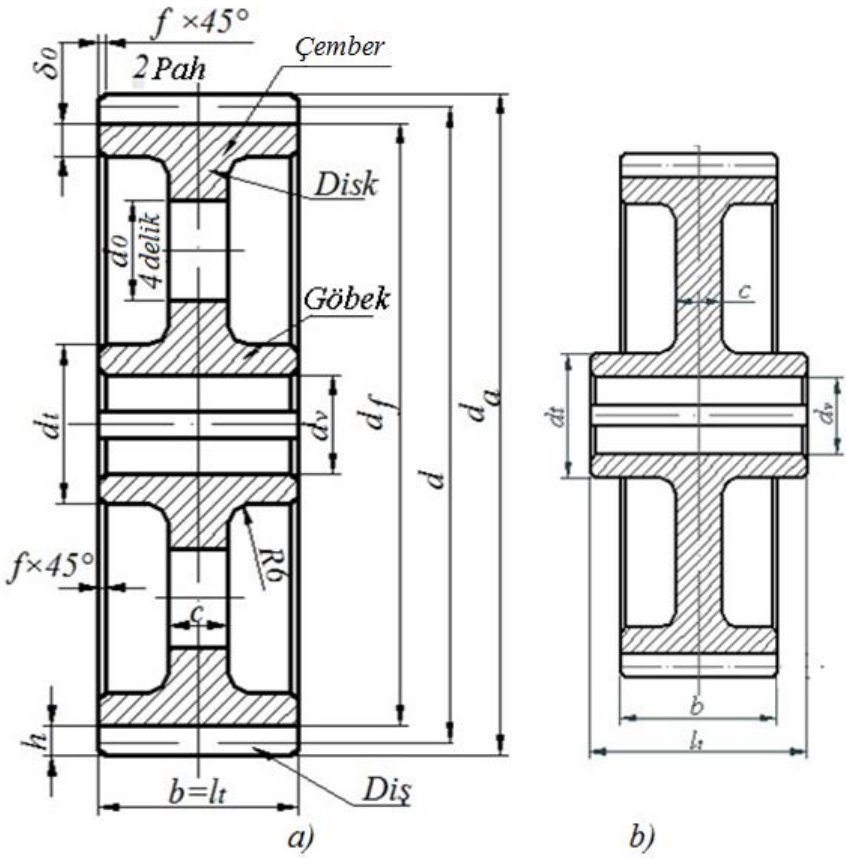
Dönme hareketini ileri harekete dönüştürmek için silindirik bir dişli ve kremayer dişli kullanılır ve bunun tersi de geçerlidir.

Dişli çarklar üzerinde dişler kesilmiş çemberden, şafta monte edilmiş bir göbekten ve göbeği çembere bağlayan bir diskten oluşur (Şekil 1a).

Düz dişliler, düşük ve orta hızlarda, açık mekanizmalarda ve ayrıca örneğin dişli kutularında hızları değiştirmek için dişlileri eksenel olarak hareket ettirmek gerektiğinde yaygın olarak kullanılır. Orta ve yüksek hızlarda sorumlu mekanizmalar için helisel dişliler kullanılır. Helisel dişli çarkların uygulama alanları genişlemektedir. Ama helisel dişlilerin temel dezavantajı eksenel kuvvetin yataklara aktarılmasıdır.

Çift helisel dişliler; yataklara eksenel kuvvet iletmez ve özellikle ağır yükler için kullanılır.

Dış çapı şaftın çapından çok daha büyük olmayan dişliler genellikle şaft ile bütünleştirilir (dişli kutularındayken). Tek kademeli dişli kutularında kullanılan dişliler genellikle her iki taraflı çıkıntılı göbekli olarak yapılır (Şekil 1b).

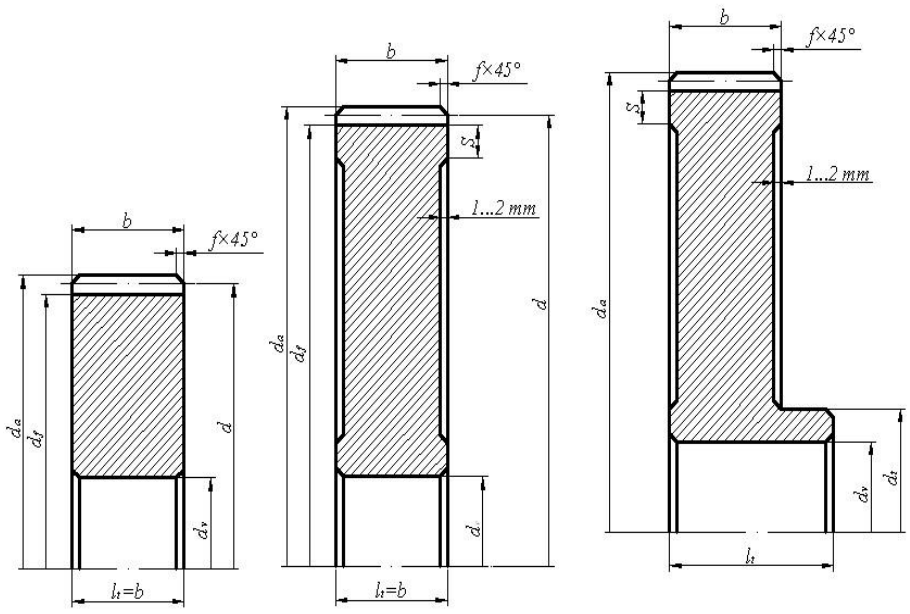


Şekil 1. İki Taraflı Göbekli Silindrik Dişli Çark

DİŞLİ ÇARKLARIN TASARIMI

Silindirik dişli çarklar

Bireysel ve küçük seri üretimde dişli çark çapı 80 mm'den az olduğunda düz olarak (Şekil 2, a), diş çapı 120 mm'den az olduğunda ise imal işlerini azaltmak için disk her iki taraftan talaş alınmakla girintili olarak yapılırlar (Şekil 2, b, c).

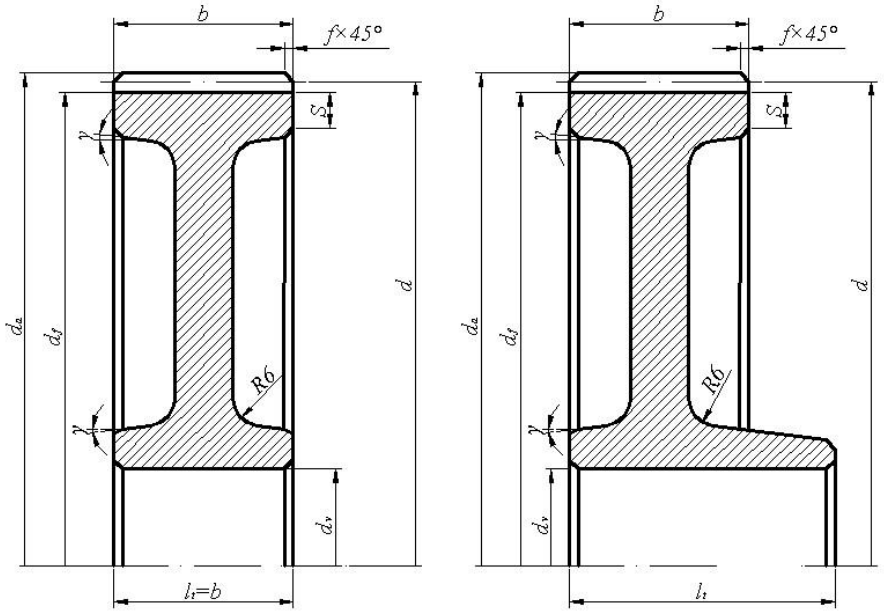


a) *b)* *c)*

Şekil 2. Silindirik Dişli Çarkların Konstrüksiyonları

Dişli çarkın dişlerinin kenarlarında pah kesilir, pahların boyutu $f \approx (0{,}6\ldots0{,}7)m$ olmakta ve dişli çark çapına bağlı olarak değişir. Düz dişli çarklarda pah 45°, helisel dişlilerde yüzey sertliği 350 HB'den küçük olmakta 45°, büyük olmakta 15° olan bir açıyla açılır. Göbeğin keskin kenarlarında da çapına göre standarttan seçilen bir boyutta pah kesilir.

Yıllık dişli üretimi 100'den fazla ise iki taraflı presleme uygulanır. Dişliler bu durumda Şekil 3'te gösterildiği gibi tasarım edilir. İş parçasını ştampdan çıkarmak için presleme açısı $\gamma \geq 7^o$ olmalı ve geçiş yüzeyleri $R \geq 6$ mm yarıçapı ile imal edilmelidir. Bu durumda diskin kalınlığının $c \approx 1{,}4s$ olması tavsye edilir.



a) *b)*

Şekil 3. Silindirik Dişli Çarkların Konstrüksiyonları

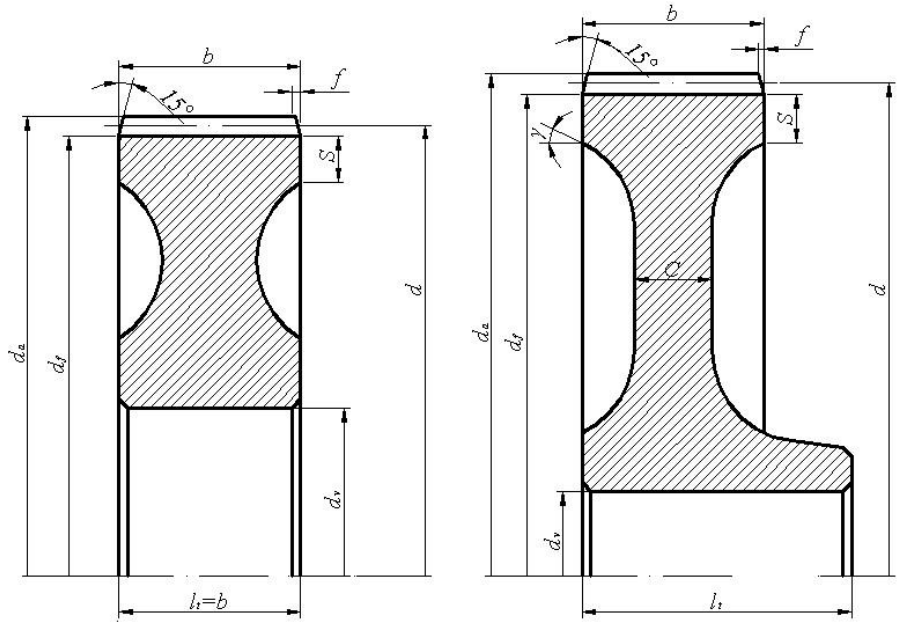
İkili helisel dişli çarklar için göbek uzunluğu, diskin ve çemberin kalınlıkları aşağıdakı ifadelerle hesaplanabilir:

$$l_t = b + a; \qquad c = (0{,}3\ldots0{,}35)(b + a); \qquad s = 4m + 2$$

Eğer dişli çarkın diski şekil 4, a ve b'de gösterildiği gibi hazırlanmışsa, presleme sırasında metalın plastik deformasyonu durumu iyileşir. Bu durumda, girintilerin eğrilik yarıçapı $R \geq 20$ mm, presleme açısı ise $\gamma \geq 12^o$ kabul edilebilir. Dişli çarkın boyutlarına bağlı olarak diskte yarıçapı R olan bir veya iki yay oluşturulabilir. Bu durumda:

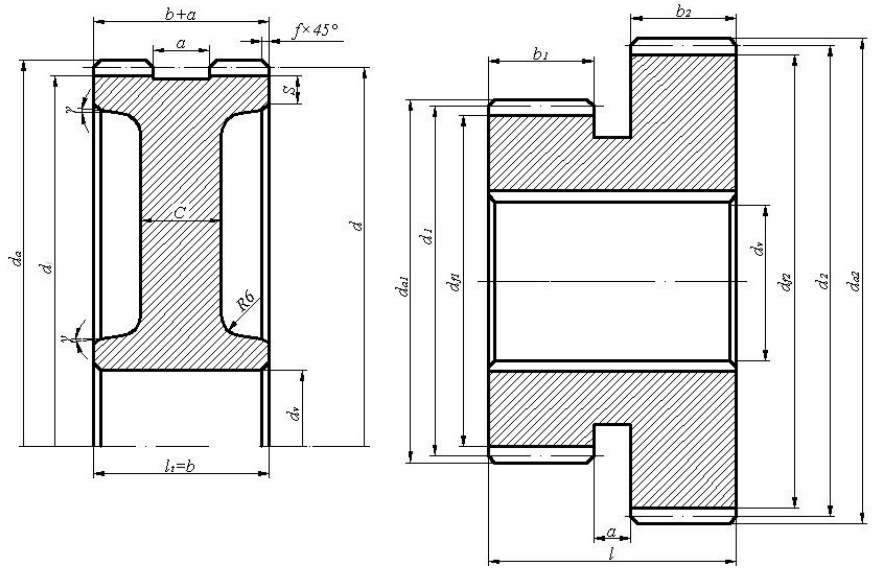
diskin kalınlığı $c \approx 0{,}5b_2$ kabul edilir, (burada b_2 -döndürülen dişli çarkın genişliğidir.)

Dişlilerin kütlesindeki azalma özellikle önemli olduğunda, örneğin uçak yapımında, diskin kalınlığı $c \approx 0{,}25b_2$ varsayılır, minimum yay yarıçapı değeri alınır ve diskde 4…6 delik açılır.



a) *b)*

Şekil 4. Silindirik Dişli Çarkların Konstruksiyaları



a) *b)*

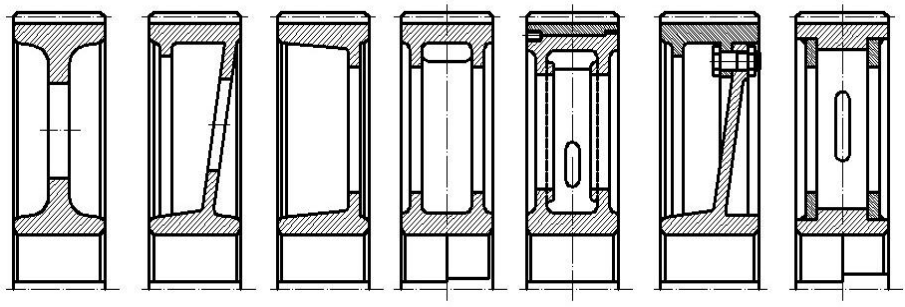
Şekil 5. Silindirik İkili Helisel Dişli Çark ve Dişli Çark Bloku

İkili helisel dişli çarkların genişliği diğer silindirik dişli çarklara göre daha böyüktür (şekil 5, *a*). Bu dişli çarklarda kesici takımın serbestçe, dişlerin ucunu

kesmeden çıkması için sağ ve sol helisel dişlerin arasında nov olur. Bu novun boyutu dişin modülüne bağlıdır, örneğin, 2 mm modül üçün novun genişliği 32 mm olmalıdır. İkili helisel dişli çarklar böyük yük taşıma kapasitesine sahiptir ve kavramada sorunsuz çalışır, ses çıkarmaz.

Şekil 6 da gösterilmiş dişli çark blokları, otomobil, traktör, takım dezgahlarının hız kutularında kullanılır. Bir dişli bloğu, iki, üç veya dört diş kronu olan bir elemandır (şekil 5, b). İki taç arasındaki novun boyutu (*a)* da modüle bağlıdır.

Üretim sayısı fazla olan büyük çaplı dişli çarklrı yapmak için dökme yöntemi tercih edilir. Böyle dişli çarkların yük taşıma kapasitesi dövme dişli çarklardan azdır. Diş dairesi çapı 900 mm'den kaçık olan dişli çarkları bir diskli (şekil 6 *a, b* ve *c*), daha büyük boyuta sahip dişli çarkları iki diskli hazırlanır. (şekil 6, *d*). Ara sıra büyük çaplı dişli çarklar pres geçme yöntemiyle, yüksek kaliteli çelik çemberin sıradan bir çelikten yapılmış göbeğe preslemekle yapılır (şekil 6, *e*), ama bu yapı pahalı olur. Böyük dişlilerde üretim sayısı çok az veya tek olduğunda dişlinin farklı malzemelerden yapılmış çember ve merkez kısımlarını birbirine civata, perçin veya kaynak yontemiyle bağlanması tercih edilir (şekil 6, *f, h*).



a) *b)* *c)* *d)* *e)* *f)* *h)*

Şekil 6. Büyük Çaplı Silindirik Alın Dişli Çarkların Konstruksüyonları

a), b), c) – $d_a < 900$ mm; d), e), f), h) – $d_a \geq 900$ mm

Konik Dişli Çarklar

Diş başı dairesi çapı $d_{ae} \leq 120$mm olduğunda konik dişli çarklar şekil 7, *a* ve *b*`de gösterildiği gibi tasarımı yapılır. Koniklik tepe açısı $\delta \leq 30^o$ oldukta dişli çark şekil 8, *a*`da gösterildiği gimi, $\delta \geq 45^o$ olduktaysa, şekil 8, *b*`de gösterildiği gibi hazırlanmaktadır. Eğer koniklik tepe açıları 30° ile 45° arasında

ise, dişli çark her iki şekilde de yapılabilir. Göbeğin boyutları silindirik alın dişli çarklarda olduğu gibi hesaplanabilir.

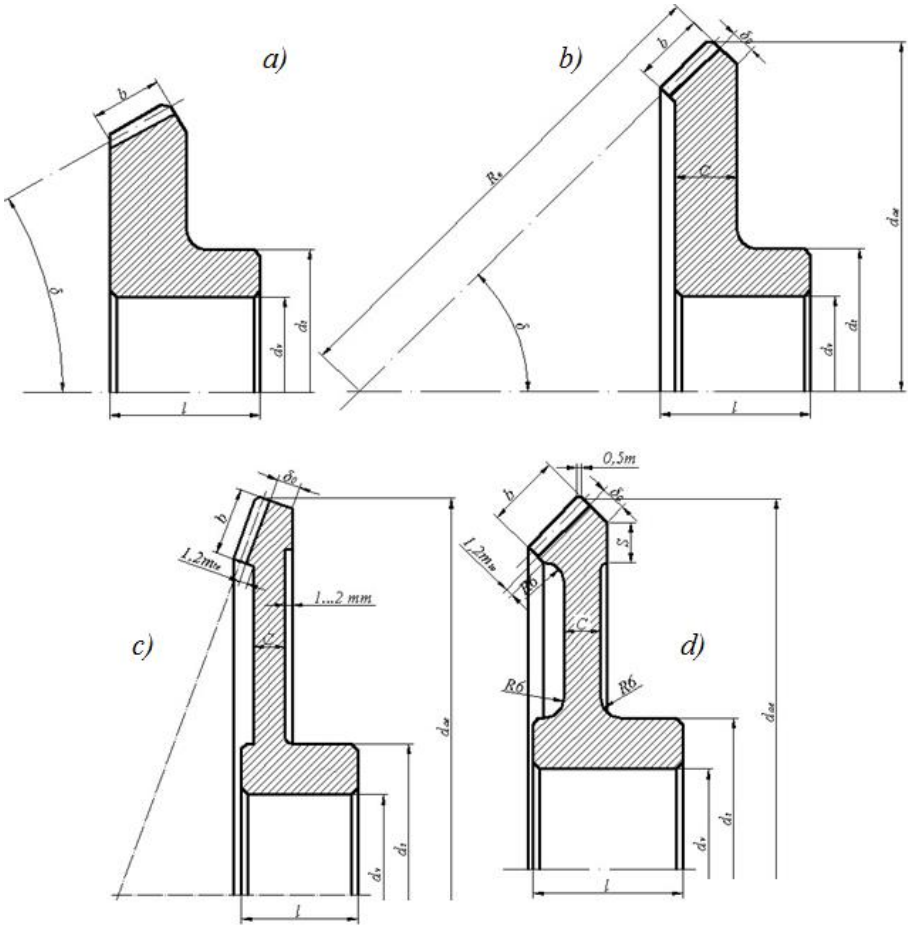
Diş başı dairesi çapı $d_{\mathrm{ae}} > 120\mathrm{mm}$ oldukuğunda konik dişli çarkların şekil 7, *c* ve *d*`de gösterildiği gibi tasarım edilmesi tavsiye edilir. Eğer dişli çark çok az sayda veya kiçik seri olarak üretiliyorsa, şekil 8, *c*, seri üretiliyorsa, şekil 8, *d*-de gösterildiği gibi tasarlanır.

Herhangi bir şekle sahip dişlilerin dişlerinin kenarları, boyutu dış çapa karşılık gelen bir pah ile imal edilir, işleme işi miktarını azaltmak için disk yüzeyinde 1… 2 mm derinliğinde girintiler yapılır. Konik dişli çark, göbeği kesici takımın serbest hareketini engellemeyecek şekilde tasarlanmalıdır.

Çok pahalı çelik malzemeler kullanılmasın deye dış dairesi çapı 180 mm'den böyük olan konik dişli çarkları iki bölümden oluşarak hazırlamak tavsiye edilir. Bu durumda çarkın çember bölümü yüksek mükavemetli, pahalı çelikten, orta kısım ucuz çelikten yapılır. Daha sonra çelikten yapılan çember çarkın boyutuna bağlı olarak dişlinin göbeğine civata bağlantısı veye perçin vasıtasıyla şaftın flanşına sabitlenir. Böyle bir yapı dişlerde yaranan eksenel küvvetin destek flanşı yönünde yönlendirileceği şekilde tasarlanmalıdır. Eğrisel dişli konik çarkların uygulama alanları zaman-zaman daha da genişlenmektedir.

Dişli çarkların imalatı için bir malzeme seçerken diş yüzeyiniin dayanıklılığı, dişlerin eğilme mükavemetini ve aşınmaya karşı direncini sağlamak göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle dişli çarkların üretiminde kullanılan ana melzeme islah çeliklerdir.

Ara sıra dokme demir, polimer kompozit malzameler de kullanılır. Polimer dişli çarklar ses çıkarmadan (sessiz) çalışması için tercih edilmektedir.



Şekil 7. Konik Dişli Çarkların Konstruksüyonları

Dişli Çarkların Temel ee Yapısal Parametrleri

Dişli çark mekanizmalarının çalışmasında temel şart çevrim oranının sabit olmasıdır:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z_2}{z_1} \tag{1}$$

Burada n_1 ve n_2 – uygun olarak giriş ve çıkış millerinin devir sayısı; ω_1 ve ω_2 – bu millerin açısal hızı; d_1 ve d_2 – uygun olarak döndüren (pinion) ve döndürülen dişli çarkların taksimat dairelerinin çapları; z_1 ve z_2 onların diş sayısıdır.

Dönmenin her anında çevrim oranının sabit kalması temel şarttır. Üretim kolaylığı ve ucuzluğu nedeni de göz önüne alınarak makinalarda genel olarak evolvent kavrama açısı $\alpha = 20^o$olan dişliler kullanılmaktadır. Bu tür dişli çarklar için modül temel boyut parametresidir:

$$m = \frac{p}{\pi} = \frac{d}{z}$$

Burada p -taksimat, d -taksimat dairesi çapı, z -diş sayısıdır.

Taksimat iki komşu dişin taksimat dairesi üzerinde ölçülen, iki sağ ve ya sol yüzeyleri arasındakı yay uzunluğudur.

Dişin yüksekliği onun baş ve taban yüksekliklerinin toplamıdır: $h = h_a + h_f$. Standard evolvent dişliler için $h_a = m$ ve $h_f = 1.25m$ olduğundan $h = 2.25m$

Dişli çarkların çapları:

1) Taksimat dairesinin çapı: $d = \frac{m \cdot z}{cos\,\beta}$;

2) Diş başı dairesinin çapı: $d_a = d + 2h_a = d + 2m$;

3) Taban dairəsinin çapı: $d_f = d - 2h_f = d - 2.5m$.

Burada β–dişin helis açısıdıt: düz dişli çarklar için β =0; helisel dişli çarklar için β = 8…22° veya 30°; ikili helisel çarklar için de β =25…45° ola bilir.

Dişli çarkların göbek boyutları şaftın çapına bağlı olarak hesaplanır:

- göbek çapı $d_t = (1.5 \ldots 1.6)d_ş$
- topun uzunluğu $l_t = (0{,}8\ldots1{,}5)d_v$;

Çemberin kalınlığı modüle bağlı olarak hesaplanır: $\delta_o = 2{,}5m + 2\ mm$

Diskin kalınlığı silindrik dişli çarklarda diş genişliğine bağlı olarak $c = (0{,}35..0{,}4)b$;

Konik dişli çarklarda diskin kalınlığı koninin tepesi ile çarkın en dış noktası arasındakı mesafeye (R_e) bağlı olarak hesaplanabilir

$$c = (0{,}1\ldots0{,}17)R_e;$$

Dişli çarkların taban daire çapı ile şaftın çapı arasındakı fark $(d_f - d_ş)$ silindrik dişlilerde modülün 5, konik dişlilerde ise 3 katından az olarasa, dişli çark şaftla birleşik hazırlanır. Diş başı dairesinin çapı 120 mm'den büyük oldukta talaşlı imalat yöntemleriyle üretilen dişli çarklarda göbek ile çember arası ya sağlı sollu talaş alınarak kalınlık inceltilir ya da merkezleri aynı daire üzerinde olan delikler delinir. Bu dairenin çapı aşağıdakı gibi hesaplanır:

$$D_y = 0{,}5(D_o + d_m),$$

burada $D_o = d_f - 2\delta_o$.

Deliklerin çapı $d_y = \frac{D_o - d_t}{4}$, sayısı ise $z = 0.15\sqrt{d}$ ifadeleri ile hesaplanabilir. Genel olarak deliklerin sayısı z =4, 6 ve ya 8 kabul edilir. Bu delikler imalat zamanı dişli çarkı tezgaha bağlamak, onu taşımak için de faydalı olur ve ayrıca ağırlığı da azaltır.

Dişli çarkın diş daire çapı daha büyük olduğunda ise (neredeyse 900 mm-den fazla) çarkın ağırlığını daha fazla azaltmak için onun göbek ile çemberi 4 – 8 kol ile birbirlerine bağlanılır. Kolların sayı da $z = 0.15\sqrt{d}$ empirik düsturu ile hesaplanabilir, $z < 3$ oldukda dişli çark kollar vey a delik olmadan, bütöv diskli olarak yapılır.

REDÜKTÖRLER

Sınıflandırılması

Redüktör, bir gövde içerisinde monte edilmiş dişli çark mekanizmalarından oluşur. Millerin dönme sayılarını ve ya açısal hızlarını azaltmak, torku ise artırmak için kullanılır.

Redüktörler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

Dişli mekanizmanın türüne göre: Silindirik dişli çark redüktörleri, konik dişli çark redüktörleri, sonsuz vida redüktörleri, konik-silindirik dişli çark redüktörleri, dişli çark-sonsuz vida redüktörleri.

Kademe sayısına göre: Tek kademeli redüktörler, iki kademeli redüktörler, üç kademeli redüktörler ve b.

Dişli çarklara göre: Silindirik (düz, helisel ve ikili helisel) dişli çark redüktörleri, konik (düz, helisel, eğrisel ve kaydırılmış) dişli çark redüktörleri.

Redüktörün şaftlarının eksenlerinin konumlarına göre: Yatay dişli redüktörler, dikey dişli redüktörler.

Kinematik şemasına göre: Genişletilmiş, konvansiyonel, paket ve b.

Redüktör genelde motor ile işçi mekanizma arasında yerleştirilir ve motorun teknik karakteristiklerini işçi mekanizmanın isteğine uygun seviyeye getirir. Redüktörle motor arasında kayış kasnak mekanizması da ola bilir.

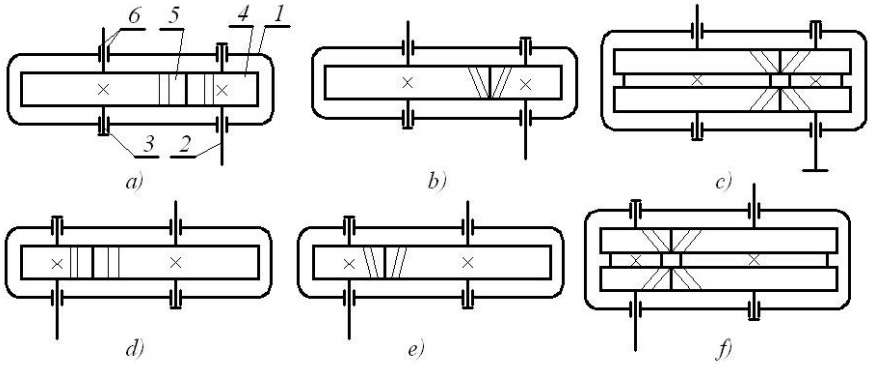
Redüktörler kaldırma ve taşıma makinalarında, metalurji ve kimya sanayisinde ve birçok başka alanlarda kullanılmaktadır.

Çevrim oranı redüktörlerin genel teknik göstericisi, parametredir ve (1) ifadesi ile hesaplanabilir. İki veya daha çok kademeli redüktörlerin toplam çevrim oranı her bir kademinin çevrim oranlarının çarpılması ile hesaplanır:

$$i = i_1 \cdot i_2 \cdot \ldots \cdot i_n$$

Burada i_1, i_2, i_n - uygun olarak birinci, ikinci ve n.'ci kademenin çevrim oranıdır.

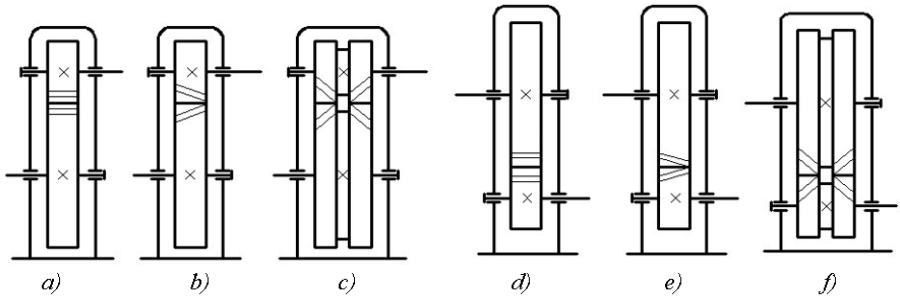
Silindirik Dişli Çark Redüktörleri



Şekil 8. Bir Kademeli Yatay Düzenli Silindirik Dişli Çark Redüktörleri

1 – gövde; 2 – döndüren şaft; 3 – döndürülen şaft; 4 – döndüren dişli çark (pinyon); 5 – döndürülen dişli çark; 6 – yataklar. a), d)- düz dişli; b), e) – helisel dişli; c), f) – ikili helisel dişli;

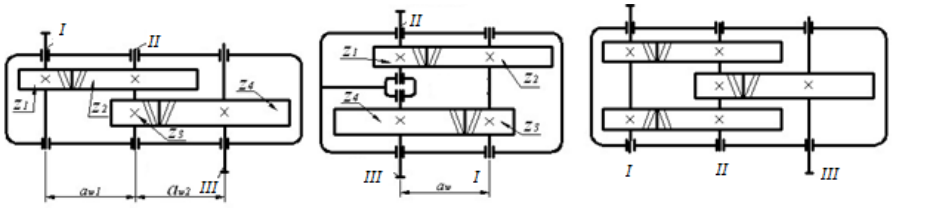
Çevrim oranı küçük olduğunda tek kademeli redüktörler kullanılır. Tek kademeli silindirik dişli çark redüktörlerinin kinematik şemaları Şekil 8-de gösterilmiştir. Bu redüktörlerin çevrim oranı 6-ya, zorunlu hallerde en çok 8-e kadar olabilir. Dikey silindirik dişli çark redüktörlerinin tasarımları da şekil 9`da gösterilmiştir. Redüktörün döndüren dişli çarkı esas olarak yukarıda olur (*a, b, c*), ama döndüren dişli çarkı aşağıda olan redüktörler de bulunur (*d, e, f*).



Şekil 9. Bir Kademeli Dikey Silindirik Dişli Çark Redüktörleri

a), d)- düz dişli; b), e) – helisel dişli; c), f) – köşe dişli;

Çevrim oranı yükseldikçe tahrik mekanizmasının endaze boyutları ve ağırlığı artır. Bu durumda iki kademeli redüktörlerin kullanımı tavsiye edilir (şekil 10). Bu redüktörlerin çevrim oranı 6-dan 45-e, ara sıra 50-ye kadar olur. Klasik şemalara göre tasarım edilmiş redüktörlerde kademe sayısı, şaft sayısından bir birim azdır.



a) *b)* *c)*

Şekil 10. İki Kademeli Yatay Silindirik Dişli Çark Redüktörlerinin Kinematik Şemaları

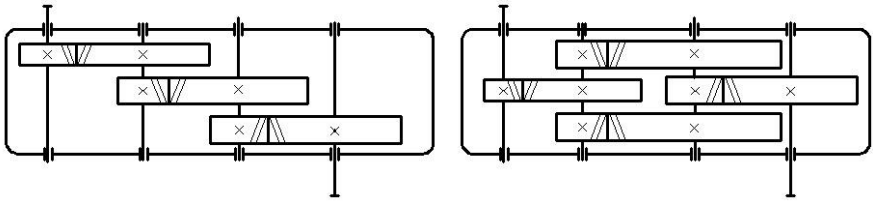
a) – genişletilmiş şemalı; b) – konvansiyonel; c) – yüksek hızlı kademesi ayrılmış

İki kademeli redüktörlerden genel olarak kullanılan genişletilmiş şemalı redüktörlerdir (şekil 10, *a*). Bu redüktörler çok basit olmasına yanı sıra, hem de en boyutu küçüktür, ama dişli çarkların şaft üzerinde asimetrik düzenlenmesi, yükün dişin uzunluğu boyunca konsantrasyonunu artırır. Bu nedenle, bu dişli kutuları için sert şaftlar gerektirir. Konvansiyonel redüktörlerde (şekil 10, *b*) genişlik artırılarak uzunluk azaltılır ve onlarda dişleri yağa daldırmak daha kolaydır.

Yüksek hızlı kademenin ikiye ayrılması şaftların simetrik yüklenmesini sağlar, yavaş hızlı kademenin çalışmasını iyileştirir ve redüktörün ömür uzunluğunu artırır (şekil 11, *c*).

İki kademeli silindirik dişli çark redüktörlerinde yüksek ve yavaş hızlı kademelerin döndürülen dişli çarklarının yağa aynı seviyede batması için her iki kademelerin döndürülen dişli çarklarının çapları eş olmalı arzu edilendir. Buna uygun olarak $i_1 = (0.75\ldots1) \cdot \sqrt[3]{i^2}$ yaklaşımı kullanıla bilir. Redüktörün minimal ağırlığa göre optimum seviyeye getirilmesi ise $3.36 \cdot i_1^6 + i_1^4 - 106 \cdot i_1^2 - 315587 = 0$ denkleminden Newton iterasyonu yöntemi ile faydalanmak, hızlı kademenin optimal çevrim oranını hesaplamak olur (Mirzeyev, Çerkesov, Hüseynov, 2018).

Yüksek hızlı kademede her iki dişli çarkın eş yüklenmesini sağlamak için onları helisel dişli hazırlarlar. Dişli çarklardan birinin dişleri sağ, o biri sol yönlü yapılır, şaftlardan biri de eksenel yönde oynak bilyalı veya makaralı yataklarda monte edilirler. Dişli çarklar simetrik yerleştiğinden düşük hızlı kademenin şaftlarının deformasyonu dişin uzunluğu boyunca yükün bir o kadar da konsantrasyonuna neden olur. Çevrim oranı 25…250 olduğunda üç kademeli redüktörler (şekil 11) kullanılsa da, aynı zamanda onlarla karşılaştırıldığında ağırlığı ve boyutları daha küçük olan episiklik (epicyclic) ve dalgalı (wave) redüktörlerle değiştirilmektedir.



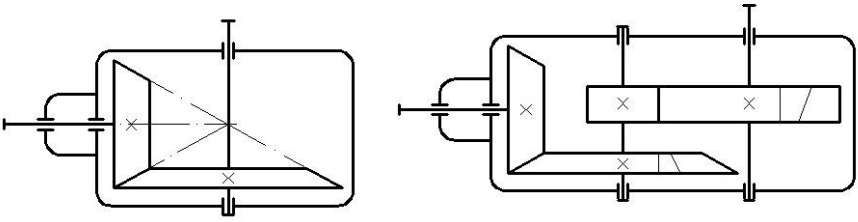
a) *b)*

Şekil 11. Üç Kademeli Silindirik Dişli Çark Redüktörleri

Üç kademeli redüktörler basit (şekil 11, *a*) ve ya orta kademesi ikiye ayrılmış halde daha mükemmel şema üzere (şekil 11, b) tasarım edilebilir. Orta kademenin ikiye ayrılması yüksek hızlı ve düşük hızlı kademelerin daha iyi çalışmasını sağlar.

Konik dişli çark reduktörleri

Giriş ve çıkış şaftlarının eksenlerinin karşılıklı olarak dik yerleştirilmesi talep oldukça küçük çevrim oranlarında konik (şekil 12, *b*), daha büyük çevrim oranlarında konik-silindirik redüktörleri kullanılır (şekil 12, *b*). Kombine edilmiş konik-silindirik redüktörlerde yüksek hızlı kademe konik dişli çark olmalıdır.



a) *b)*

Şekil 12. Konik ve Konik-Silindirik Dişli Çark Redüktörleri

İki ve çok kademeli redüktörlerde tam çevrim oranı kademeler arasında optimum değeri sağlama şartlarına uygun paylaştırılır. Genel kullanımlı redüktörler için esas şart minimum ağırlık ve uygun olarak minimum hacim kabul edilir.

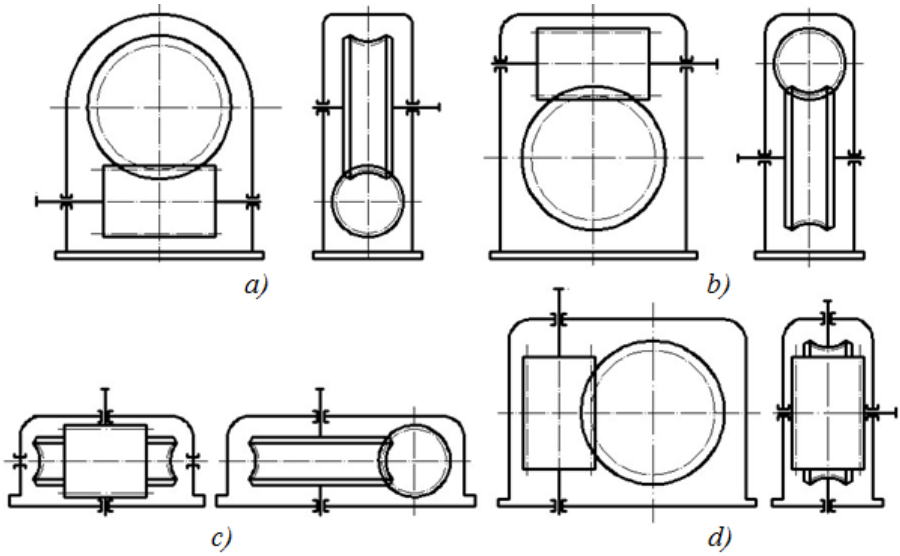
Konik-silindirik redüktörlerde yüksek hızlı kademenin çevrim oranını $i_1 \leq 3.5$ götürmek lazım, $i_1 = (0.22\ldots0.28) \cdot i$ olanda her iki kademenin döndürülen dişli çarklarının çapı tahminen eş alınır ve sonuçta dişli çarkların iyi yağlanmasını sağlar. İki kademeli konik-silindirik dişli çark redüktörlerinin minimal ağırlığa göre optimum çevrim oranlarının aktarımında ise $i_2 = \sqrt[5]{i^2}$ ifadesinin kullanılması tavsiye edilir (Mirzeyev, Çerkesov, Mirze, 2016).

SONSUZ VİDA REDÜKTÖRLERİ

Giriş ve çıkış şaftlarının çapraz olması talep edildiğinde sonsuz vida redüktörleri kullanılır (şekil 13)

Vida ve çarkın yerleştirilmesine göre bu redüktörler aşağıdaki konstrüksiyonlarda yapılır:

- Sonsuz vida sonsuz vida çarkının altında yerleşir. Bu durum sonsuz vidanın çevresel hızı 4…5 m/s-e kadar olduğunda uygulanır, sonsuz vida yağa batırmakla çark da yağlanır (şekil 14, *a*);
- Sonsuz vida çarkın üstünde yerleşir. Bu durum yüksek hızlı mekanizmalarda kullanılır, sonsuz vida çarkını yağa batırmakla yağlanılır (şekil 13, *b*);
- Sonsuz vida ekseni yatay, sonsuz vida çarkının ekseni dik yerleşir (şekil 13, *c*);
- Sonsuz vida ekseni dik olup sonsuz vida çarkının yan tarafında yerleşir (şekil 13, *d*).



Şekil 13. Sonsuz Vida Redüktörlerinin Kinematik Şemaları

Aşınan iki variant dik şaftların yataklarını yağlamak ve yağın akmasının karşısını almak zor olduğu için nadiren kullanılır. Tek kademeli sonsuz vida redüktörlerinin çevrim oranı 8…80 ola bilir.

Sonsuz vida-dişli çark redüktörlerinde yüksek hızlı kademe sonsuz vida mekanizmasından, yavaş gidişli kademe ise dişli çark mekanizmasından ibaret olur. Bu zaman $i_2 = (0.03…0.06) \cdot i$ götürmek için yeterli görülür.

Dişli çark-sonsuz vida redüktörlerinde yüksek hızlı kademe silindirik dişli çarklardan, yavaş gidişli kademe ise sonsuz vida mekanizminden oluşur. Bu zaman $i_1 = 2.0…2.5$ götürmek amaca uygun. Redüktörlerin şaftları esasen rulmanlı yataklarda monte edilir. Çok yüksek hızlı mekanizmalarda ve ara sıra da çok ağır redüktörlerde kaymalı yataklar kullanılır.

Her dayakta, genelde, bir rulmanlı yatak olur. Küçük ve orta yüklerde bilyalı yataklar, orta ve büyük yüklerde ise makaralı yataklar kullanılır.

DİŞLİ ÇARKLARDA DİŞ DİBİ MUKAVEMETİNİN HESAPLANMA YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMA ANALİZİ

Diş dibindeki eğilme gerilmesi dişli çarkın dişini etkileyen kuvvetten oluşur ve dişli çarkların hesaplanmasında onların mukavemetini etkileyen esas faktörlerden biridir. Özellikle, açık dişli çark mekanizmalarının hesaplanmasında eğilmeye göre mukavemet dikkate alınmalıdır. Dişli kutularda, sıvı yağa batırılmakla çalı-

şan dişli çarklar için çarpma mukavemeti daha etkili olsa da, onların da tasarımında eğilme gerilmesine göre mukavemetin kontrol hesabı yerine yetirilmektedir. Dişli çarkların dişlerinde yaranan eğilme gerilmesi çevresel kuvvetten yararlanan eğilme momentine göre hesaplanır ve hesaplamada eğilmede emniyet gerilmesine göre ötürülebilecek maksimum çevresel kuvvetin değeri Lewis yöntem ile hesaplanır. Bu hesaplama yönteminin esas önemi ve yorumu aşağıda verilmiştir.

Birinci hesaplama yöntemi. Hesaplama şeması şekil 14a-da verilmiştir. Şekilde W_n- normal kuvvet, W_t ve W_R ise uygun olarak onun radyal ve tanjant teşkil edenlerdir. Şemadan de göründüğü gibi W_t kuvvetinden diş eğilmeye, W_R kuvvetinden ise basılmaya zorlanır, ama hesaplamada basılma gerilmesinin etkisi dikkate alınır. W_n kuvveti kavrama doğrusu boyunca, dişin setine normal yönde etkilenir. Onu etki noktası dişin simetri ekseni ile kavrama doğrusunun temas noktasına taşır. Bu durumda dişin hesabi yüksekliyi (h) eksenel yükseklikten bir az kısa alınır. Dişin profili ise yığılarak B ve C noktalarında diş dibi yaylara dokunan parabolik forma getirilir, bu tür formda dişliye, bütün kesitlerinde aynı gerginlik oluşur. Beraber mukavemetli konsol kiriş gibi bakılır.

Eğilme gerilmesi eğilme momentine ve atalet momentine göre hesaplanır: $\sigma_w = \frac{My}{I}$,

Burada M – çevresel kuvvetten meydana gelen eğilme momenti - $M = W_t h$, I – dikdörtgen en kesitin merkezi eksenlere göre atalet momenti - $I = bt^3/12$, y- dikdörtgenin tarafının koordinatıdır, dişin kalınlığının yarısına eşittir - $y = t/2$. Burada t- dişin dip kısmının kalınlığı, b- dişin genişliğidir. Bunları dikkate almakla aşağıdaki ifade yazılabilir:

$$\sigma_w = \frac{6W_t h}{bt^2} \qquad (2)$$

Burada dişin en kesik boyutundan asılı olması aradan kaldırılarak, hesaplamaya birimsiz parametreler $x = \frac{t}{p}$, $k = \frac{t}{p}$ kullanılmakla (2) ifadesini $\sigma_w = \frac{6kW_t}{x^2 b}$ gibi yazmak mümkündür. Burada dişin forma faktörü veya Lewis form faktörü ile adlandırılan, dişin en kesik formundan asılı olan birimsiz $y = \frac{x^2}{6k}$ parametresini ve dişin adımının modül ile değiştirilmesi= πm dikkate alınmakta, eğilme gerilmesi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\boldsymbol{\sigma_w = \frac{W_t}{bpy} = \frac{W_t}{b \cdot \pi m \cdot y}} \qquad (3)$$

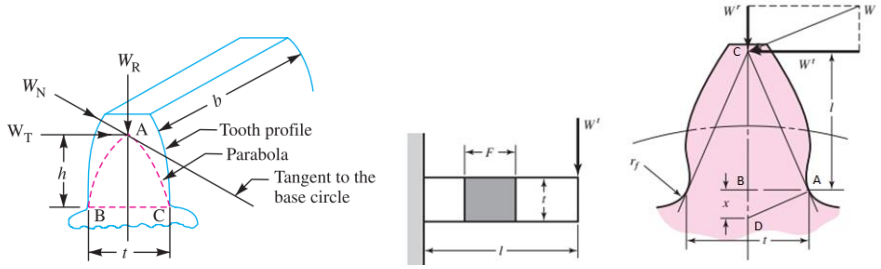
Dişin form faktörü teorik olarak ilişme modülü, dişin dip hissesinin kalınlığı ve tahmini yüksekliğinden; pratik olarak ise evolvent dişli çarkın diş sayısından asılı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir (Khurmi, Gupta, 2005):

$$y = \frac{t^2}{6h\pi m};\ \ y = 0{,}154 - \frac{0{,}912}{z} \qquad (4)$$

Yükün dinamik etkisini dikkate almak için eğilmeye hesaplamada götürülen emniyet gerilmesi hız faktörünü (C_v -yükün dinamiklik faktörünü) dikkate almakla Barth ifadesi ile hesaplanır: $\sigma_w = \sigma_a \cdot C_v$, burada σ_a- malzemeye bağlı emniyet gerilmesidir. Genellikle kullanılan dişli çarklar için, çevresel hız 12,5 m/s-ye kadar çıkarsa, $C_v = \frac{3}{3+v}$ düsturu ile hesaplanması tavsiye olunur.

Bundan başka dinamik yükün hesaplanması için ve hem de dişin aşınmadan taşıyabileceği maksimum yükün hesaplanması için de ifadeler teklif olunur. Böylece, bu yöntemde dişin eğilme mukavemeti üç kriter üzerinden hesaplanır: a) Statik yüke göre; b) Dinamik yüke göre; c) Aşınmaya devamlılığa göre.

İkinci hesaplama yöntemi. Hesaplama şeması şekil 14 a-da verilmiştir.



a) **b)**

Şekil 14. Dişin Eğilmeye Hesaplama Şeması: A) (Khurmi, Gupta, 2005); B) (Budnyas, Nisbett, 2015)

Şekilde W- dişin başında kavrama doğrusu boyunca yönelen normal kuvvet, W^t ve W^R ise uygun olarak onun tanjant ve normal toplananlarıdır.

Eğilme gerilmesi burada da eğilme momenti ve atalet momentine göre hesaplanır:

$$\sigma = \frac{M}{I/c} = \frac{6W^t l}{Ft^2}, \qquad (5)$$

Burada M – çevresel kuvvetten yaranan eğilme momenti, I – dikdörtgen en kesitin merkezi eksene göre atalet momenti, F- dişin uzunluğu, c- dikdörtgenin tarafının koordinatıdır, dişin kalınlığının yarısına eşittir.

Şekil 14 b-de ABC ve ABD üçgenlerinin benzerlik şartından $\frac{t/2}{x} = \frac{l}{t/2}$ yazarak, $x = \frac{t^2}{4l}$ ifadesini (5)-de yazarak, taksimat ve modül arasında $p = \pi m$ ilişkisini dikkata alarsak:

$$\sigma = \frac{W^t}{Fpy} = \frac{W^t}{F \cdot \pi m \cdot y} \qquad (6)$$

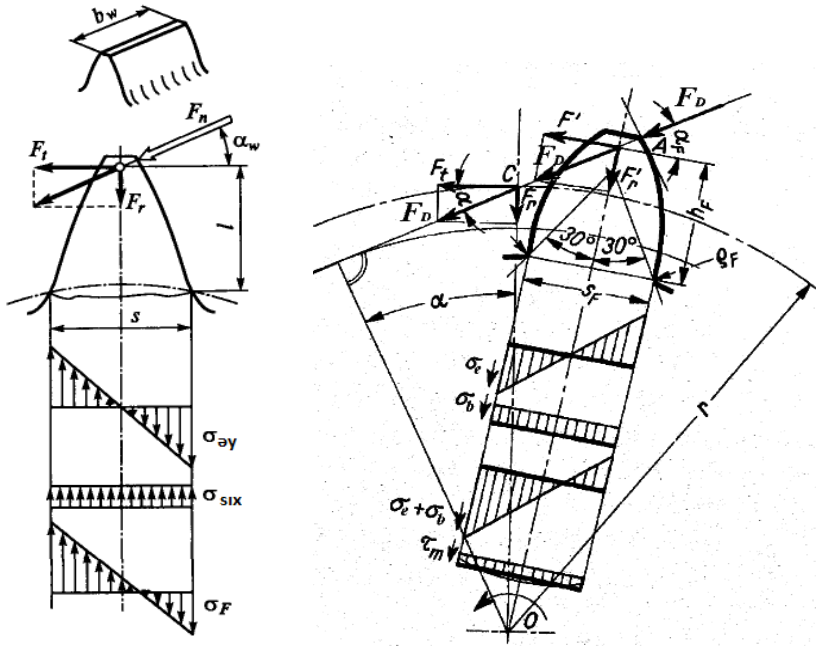
Burada y – dişin forma faktörüdür:

$$y = \frac{2x}{3p} = \frac{t^2}{6 \cdot \pi m \cdot l} \qquad (7)$$

(3) ve (6) ifadelerinin karşılaştırılmasından görünür ki onlar birbirine çok uygundur. Analoji hesaplama yöntemi (Schimid, Hamrock, Jacobson, 2014) ve (Mott, 2004) -de de verilmiştir.

Dinamik yükleme halında yükün dinamiklik faktörü Carl G. Barth düsturu (Budnyas, Nisbett, 2015, s.719) $K_v = \frac{3{,}05+v}{3{,}05}$ ile dikkate alınır.

Üçüncü hesaplama yöntemi*:* Hesaplama şeması şekil 15 a-da verilmiştir. Burada da normal kuvvet dişin zirvesine etki edilmiş ve dişin simetri eksenine kadar kaydırılmıştır. Aslında bu durumda çevresel kuvvetin etki ettiği çevrenin yarıçapı taksimat dairesinin yarım çapından bir az büyük olur ve F_t=2T/d düsturu ile hesaplanan sonuçtan farklıdır, ama bunu dikkate almayarak çevresel ve radyal kuvvetlerin genel ifadelerle hesaplanmış değerleri götürülür.



a) **b)**

Şekil 15. Dişin Eğilmeye Hesaplama Şeması: A) (İvanov, Finogenov, 2008); B) (Babalık, Çavdar, 2012)

Eğilmeye hesaplamada yükün dişin zirvesine etki edilmesi onun en tehlikeli yüklenme durumuna uygundur. Hele ki, yükün yalnız bir tane dişli çark tarafından götürülmesi ve dişe konsol kiriş gibi bakılması halinde diş tabanında oluşan maksimum eğilme momenti en büyük değerini yük dişin başını etkiledikçe alır. Hesabi eğilme gerilmesi eğilme ve basılmadan yaranan gerginliklerin farkından oluşur:

$$\sigma_F = \sigma_e - \sigma_b = \frac{F_t l}{W} - \frac{F_r}{A},$$

Burada W- dişin dikdörtgen formada olan en kesitinin eğilmede direnç momenti, A-diş tabanının uzununa en kesik alanıdır:

$$W = \frac{b_w s^2}{6},\ A = b_w s.$$

Doğrusal boyutlar (l ve s) hesaplama için uygun olmadığından, farklı modüllü dişlerin hendesi benzerliğini dikkate alıp onları modüle bölmekle birimsiz parametrelerle dönüştürülür: $\grave{l} = l/m$, $\acute{s} = s/m$. Bu durumda eğilme gerilmesinin aşağıdaki ifadesi alınır:

$$\sigma_F = \frac{F_t K_F}{b_w m} Y_{FS} \qquad (8)$$

Burada K_F-hesabi yük faktörü, Y_{FS}- dişin forma faktörüdür:

$$Y_{FS} = \left[\frac{6\grave{l}}{(\acute{s})^2} - \frac{\tan\alpha}{\acute{s}}\right] K_T \qquad (9)$$

K_T ise gerilmenin teorik konvansiyonel faktörüdür.

(Resetov, 1989)-da dişin forma faktörünün yukarıdaki ifadelerinden bir kadar farklı, gerilmenin teorik konvansiyonel faktörü (α_σ) dikkate alınarak aşağıdaki ifade verilmiştir:

$$Y_{FS} = \frac{\alpha_\sigma}{\cos\alpha_t}\left[\frac{6mh_p\cos\gamma}{s_t^2} - \frac{m\sin\gamma}{s_t}\right] \quad (9^*)$$

(9) ve (8*) ifadelerinin karşılaştırılmasından görünür ki $h_p = \grave{l}$, $s_t = \acute{s}$, $K_T = \frac{m\alpha_\sigma}{\cos\alpha_t}$. γ açısı kavrama açısından bir kadar küçük açıdır.

Pratik hesaplamalar için ise (Resetov, 1989)-da $Y_{FS} = 3{,}47 + \frac{13{,}2}{z_v} - \frac{27{,}9x}{z_v} + 0{,}092x^2$ ifadesi de verilmiştir. Burada x – yer değiştirme faktörü, z_v- ekvivalent diş sayısıdır.

(Kerimov, Hesenov, Qocayev, 2002)-de ise yukarıdaki yöntem ile hesaplanmasına dikkate alınmayarak dişin forma faktörünün bir kadar farklı ifadesi verilmiştir:

$$Y_{FS} = \frac{6\mu}{\nu^2 \cos\alpha_w}, \text{ burada } \mu = \frac{l}{m}, \ \nu = \frac{S}{m} \text{ brimsiz faktörlerdir.} \qquad (9^{**})$$

Dördüncü hesaplama yöntemi. Hesaplama şeması şekil 15b-de gösterilmiştir. Bu yöntem (İvanov, Finogenov, 2008), (Kerimov, Hesenov, Qocayev, 2002) işlerinde gösterilen yöntemlere yakındır. Yani diş tabanında eğilme gerilmesine çevresel kuvvetten yaranan eğilme momentinin, diş tabanının dikdörtgen formalı en kesitinin mukavemet momentine etkisi gibi verilmiştir (Babalık, Çavdar, 2012):

$$\sigma_e = \frac{F_t}{bm} Y_F \qquad (10)$$

Burada da Y_F – dişin forma faktörüdür:

$$Y_F = \frac{6(h/m)}{(S_F/m)^2} \frac{\cos\alpha_F}{\cos\alpha}. \qquad (11)$$

Gösterilmiştir ki, en büyük eğilme gerilmesi dişin simetriye ekseni ile 30º açı altında kesişen doğrunun diş tabanı yayı ile temas noktasında temas eder. Hesaplama şemasında (şekil 15.b) diş tabanında oluşan eğilme, basılma, onların toplamı, önceki hesaplama yöntemlerinde dikkate alınmayan sürtünmeden oluşan tanjant gerilmesi nedeniyle verilmiştir. Alman standartlarında (DİN 3990) sadece eğilme gerilmesine göre diş tabanında oluşan gerginlik hesaplanır, basılma ve tanjant gerilmesinin etkisi Y_{sa} faktörü ile dikkate alınır. Hesaplama yöntemi *Niemanın* adı ile bağlanılır (Babalık, Çavdar, 2012).

Hesaplama yöntemlerinin karşılaştırılması: Bakılan hesaplama yöntemlerinin karşılaştırılmasında görünen fark, parametrelerin yazılmasında, dişlinin form faktörünün ifadesinde ve hesaplama şemalarındadır. Esas fark ise basılma gerilmesinin etkisinin dikkate alınmasındadır. Böylece birinci ve ikinci yöntemde etkisinin küçük olması nedeniyle basılma gerilmesi, hesaplama şemasında radyal kuvvetin gösterilmesine rağmen dikkate alınmamıştır. (3) ve (6) ifadelerinde taksimatı yerine modül dikkate alındığında dişin forma faktörü da $Y = \pi y$ kimi yazılmıştır:

$$\sigma = \frac{W^t}{F \cdot m \cdot Y}. \qquad (12)$$

Dişin form faktörünün (Lewis form factor) (4) ve (7) şeklinde teorik ifadelerinin araştırılması gösterdi ki, bu ifadelerde t - diş tabanının kalınlığı, *h* ve ya *l* ise

dişin eğilmeye hesaplanmasında teorik yüksekliğidir. Onların her ikisi ilişme modülüne bağlıdır. Kavrama açısı 20º olan evolvent dişli çarklar için

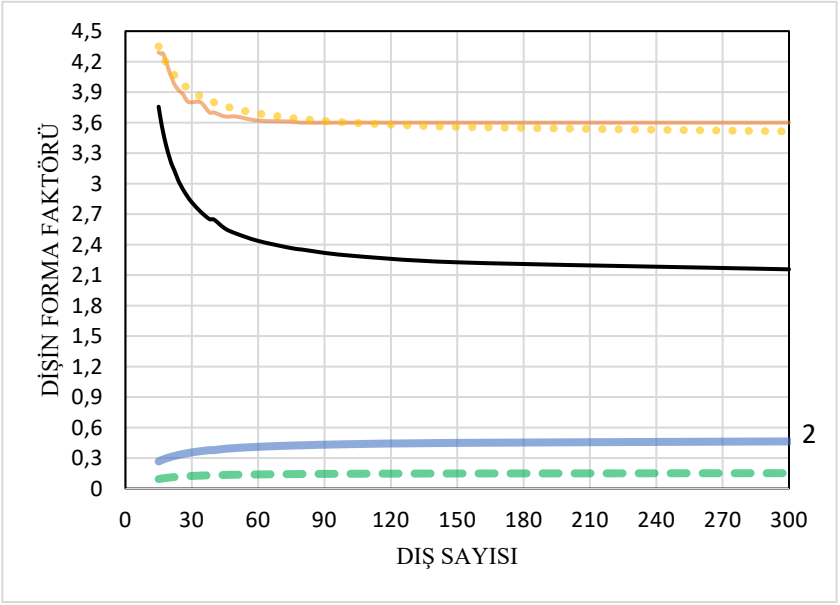
$$h = 2{,}25m \approx 2m;\ t \approx \frac{p}{2} = \frac{\pi m}{2}$$

Burada h_a ve h_f uygun olarak dişin baş ve tapan yüksekliğidir. Dişin kalınlığı taksimat dairesi üzerinde taksimatın yarısına eşittir, dişin tabanında ise artandır. Dişin diş yüksekliği ise diş dibi yüksekliğinden küçüktür, çünkü dişin tepesinden tesir eden kuvveti dişin simetrik eksenine kaydırdıkça dişin teorik yüksekliği bir o kadar küçülür. Bu yöntemleri dikkate alarak sonuncu ifadeleri (4)-ün birinci ifadesinde yazıp, onu çözdükçe modül de dişin forma faktörünün ifadesinde ortaya çıkar ve dişin form faktörü sabit değer alır:

$$y = \frac{\pi}{48} = 0{,}06545; Y = \frac{\pi^2}{48} = 0{,}20562.$$

Ama dişin form faktörü yalnız modülden değil aynı şekilde kavrama açısından, diş sayısından ve profil kaydırma faktöründen da asılıdır.

Şekil 17-de dişin form emsallarinin farklı kaynaklardan elde edilmiş değerlerinin diş sayısından gerçeklik grafiği verilmiştir. Grafik profil kaydırma faktörünün sıfır değeri (x=0) için izlenilmiştir. Dişin forma faktörü diş sayısı 17-50 arasında keskin azalır. 50-den daha sonra 75-e kadar demek olur ki sabit kalır. Şekil 17-den görünür ki, diş sayısı 50-ye yükseldikçe, dişin forma faktörü (Khurmi, Gupta, 2005) ve (İvanov, Finogenov, 2008)-e göre arttığı halde, (Budnyas, Nisbett, 2015) ve (Resetov, 1989)-a esasen azalır. (Budnyas, Nisbett, 2015)-de verilmiş cetvelin analizi gösterir ki $Y = \pi y$ gibi ifade olunan dişin forma faktörü dişlerin sayı 12-den sonsuza (Rack) kadar arttıkça 0,33512-den 0,54406-ya kadar artır. Kavrama açısı 25º olan dişli çarklarda ise dişin forma faktörü 20 º olanlardan 1,2 defa büyüktür.



Şekil 16. Dişin Form Faktörünün Diş Sayısından: 1-(Childs, 2004); 2 - (Budnyas, Nisbett, 2015), (Schimid, Hamrock, Jacobson, 2014); 3 - (İvanov, Finogenov, 2008) Y=1/Y_{FS} -E Göre Karşılaştırma Grafiği; 4 - (İvanov, Finogenov, 2008); 5 –(Resetov, 1989)

Tablo 1. Dişin Forma Faktörünün Hesabi İfadeleri

No	***Kaynak***	***İfade***
1.	(Khurmi, Gupta, 2005)	$y = \frac{t^2}{6 \cdot \pi m \cdot h}, \quad y = 0{,}154 - \frac{0{,}912}{z}.$
2.	(Budnyas, Nisbett, 2015)	$y = \frac{2x}{3p} = \frac{t^2}{6 \cdot \pi m \cdot l}; \quad x = \frac{t^2}{4l}$
3.	(İvanov, Finogenov, 2008)	$Y_{FS} = \left[\frac{6\grave{l}}{(\acute{s})^2} - \frac{\tan\alpha}{\acute{s}}\right] K_T; \quad \grave{l} = l/m, \acute{s} = s/m.$
4.	(Resetov, 1989)	$Y_{FS} = \frac{\alpha_\sigma}{\cos\alpha_t}\left[\frac{6mh_p\cos\gamma}{s_t^2} - \frac{m\sin\gamma}{s_t}\right], \quad Y_{FS} = 3{,}47 + \frac{13{,}2}{z_v} - \frac{27{,}9x}{z_v} + 0{,}092x^2.$
5.	(Kerimov. Hesenov, Qocayev, 2002)	$Y_{FS} = \frac{6\mu}{\nu^2\cos\alpha_w} = \frac{6lm}{s^2\cos\alpha_w}; \quad \mu = \frac{l}{m}, \ \nu = \frac{s}{m}$
6.	(Babalık, Çavdar, 2012)	$Y_F = \frac{6(h/m)}{(S_F/m)^2}\frac{\cos\alpha_F}{\cos\alpha} = \frac{6hm}{(S_F)^2}\frac{\cos\alpha_F}{\cos\alpha}.$

(3), (6), (9) ve (12) ifadelerinin mukayesesi esasında dişin forma Emsallarının muhtelif ifadeleri arasında aşağıdaki şekilde gösterilmiştir:

$$Y_{FS} = \frac{1}{Y} = \frac{1}{\pi y}. \quad (13)$$

Silindirik dişli çark mekanizmalarında diş dibi mukavemetin çağdaş hesaplama yöntemlerinin analizi gösterir ki, onlar temel olarak iki yöntemin esasında standart hale getirilmiştir.

1. Wilfred Lewis yöntemi;

2. Gustav Neimanın yöntemi.

Netice.

1) Silindirik dişli çarklarda diş dibi mukavemetinin hesaplanma yöntemlerinde eğilme gerilmesinin belirlenmesi için kullanılan matematiksel ifadeler birbirine çok benzer olsalar da, dişin forma faktörünün tanımında farklı yanaşmalar var.

2) Hesap eğilme gerilmesinin hesaplanmasında bası gerilmesinin etkisinin dikkate alınmaması dişin forma faktörünün daha küçük değer almasına neden olmuştur.

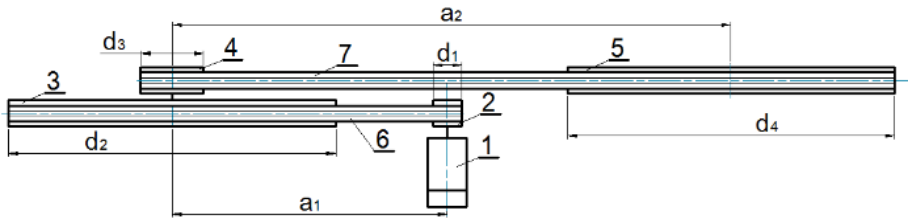
3) Dişin forma faktörünün farklı kaynaklarda diş sayısına bağlı değerleri verilse de, onun matematiksel ifadesinde diş sayısı bulunur. Ama empirik ifadelerde var.

4) Çevresel kuvvetin kolu dişin yüksekliğine, diş tabanının kalınlığı ise onun taksimat dairesi üzere kalınlığına eşit olursa, dişin forma faktörü modüldün asılı olur, aksi halde sabit değer alır.

ASANSÖR KAPILARININ HEREKETİ İÇİN YENİ DİŞLİ ÇARK MEKANİZMASI

Asansör kapılarının açılıp-bağlanılması için farklı mekanizmalar mevcuttur. Onların yapımında genelde kayış kasnak ve sonsuz vida mekanizmaları daha çok kullanılır (Abdullayev, Mirzeyev, 2010). Ama büyük çevrim oranı talep edildiği için kayış kasnak mekanizmaları, verimi küçük olduğu için de sonsuz vida mekanizmaları uygun görülmez (Mirzeyev, 2012).

Bir asansör kapı mekanizmasında iki kademeli, büyük çevrim oranına sahip Poly-V kayış mekanizmasının kinematik şeması şekil 17-de gösterilmektedir. Bu mekanizmanın eksiklikleri göz önüne alınarak, onun teknik parametrelerine uygun dişli çark mekanizması tasarlanmıştır.



Şekil 17. Bir Asansör Kapısının Tahrik Mekanizmasının Kinematik Şeması: 1 – Elektrik Motoru; 2, 3, 4, 5 – Kasnaklar; 6, 7 – Poly-V Kayışlar

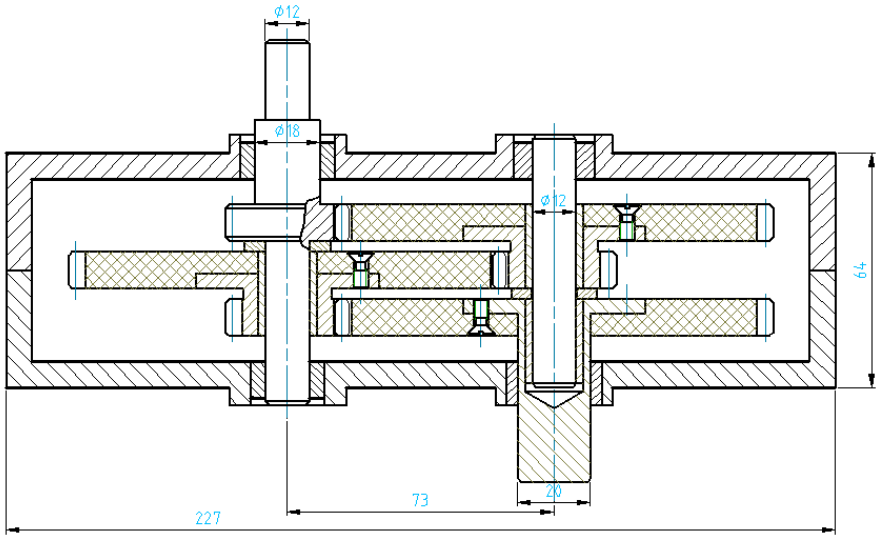
Mevcut mekanizmanın çevrim oranının *i=59,19* olduğunu için onu üç kademeli dişli çark mekanizmasına değiştirmek olur. Üç kademenin her birinde aynı çevrim oranı olursa, onda bir kademenin çevrim oranı aşağıdaki gibi hesaplana biler:

$$i_1 = \sqrt[3]{i} = \sqrt[3]{59{,}19} = 3{,}897.$$

Bu çevrim oranını sağlamak için redüktörün döndüren dişli çarkın (pinyon) diş sayısı 15, döndüren dişli çarkın diş sayısı ise 58 götürülmüştür. Sonuçta net çevrim oranı

$$i = i_i^3 = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^3 = \left(\frac{58}{15}\right)^3 = 3{,}867 \text{ olur.}$$

Bu çevrim oranına göre tasarlanmış ve hazırlanmış üç pilleli silindirik paket redüktörün çizgisi şekil 18-de gösterilmektedir. Klasik redüktörlerden farklı olarak bu paket redüktörde üç kademi dört değil, yalnız iki şaftın üzerinde monte edilmiştir. Bu Redüktör kompakt boyuta, yüksek unifikasiya derecesine ve basit konstrüksiyona sahiptir. Sonuçta kayış kasnak mekanizması ile karşılaştırıldığında dişli çark mekanizması uygulanan asansör kapısında tahrik mekanizmasının boyutu 1.8 defa azaltılmıştır.



Şekil 18. Üç Kademeli Silindirik Paket Dişli Çark Redüktörü

Redüktörün şaftları kaymalı yataklarda oturtulmuştur. Döndüren dişli çark şaftla birleşik hazırlanmıştır. Döndürülen dişli çark ise çıkış şaftına kama ile yerleştirilmiştir. Redüktörde her bir şaftın üzerinde kaymalı yataklar ile monte edilen iki adet ayni boyutlu, iki farklı dişli çark blokları vardır. Bu dişli bloklar şaftlara bağlanmadığından, onları dönme momenti ile yüklenirler. Redüktörün gövdesi alüminyumdan, dökme yöntemi ile yapılmıştır.

Asansör mekanizmalarında ses seviyesi daha düşük talep edildiğinden redüktörde yaranan sesi azaltmak amacıyla büyük dişli çarklar polimer malzemeden imal edilmiş ve çelik göbeğe bağlanılmıştır. Döndüren dişli çarklar ise çelikten hazırlanmış, sonuçta metallopolimer dişli çark mekanizması elde edilmiştir.

Polimer kompozit dişli çarklar genelde mekanizmanın ağırlığını azaltmak, büyük hızlarda sessiz ve akıcı çalışmanı sağlamak için kullanılır. Uygulanan bu metallopolimer dişli çark mekanizması ile asansörün kapısında sesin seviyesi 68 dB-e çattırılmıştır.

KAYNAKÇA

Abdullayev, A, Mirzəyev, H. (2010). Lift qapılarının hərəkət mexanizminin yeni konstruktiv həlli. *Mexanika-maşınqayırma jurnalı*ş. 2 (2). 104 – 107.

Babalık, F., Çavdar, K. (2012). *Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri*. V. Dora: Bursa.

Budynas, R., Nisbett, J. (2015). *Shigley's Mechanical Engineering Design.* X. McCraw-Hill: New York

Childs, P. (2004) *Mechanical Design*. II. Elsevier Ltd.

Kərimov, Z., Həsənov, E., Qocayev, T. (2002) *Maşın Hissələri*. I. Maarif: Bakı.

Khurmi, R., Gupta J. (2005). *Textbook of Machine Design.* I. Eurasia Publishing House: New Delhi

Mirzəyev, H. (2012). *Liftlər*. I. Azərnəşr: Bakı.

Mirzəyev, H. (2017) Dişli çarxların dişlərinin əyilməyə görə möhkəmliyə hesablanma üsullarının müqayisəli təhlili. *Journal of BEU. Mechanical and Industrial Engineering.* 1(1).13-20.

Mirzəyev, H. Çərkəsov, Ş. Mirzə, Ə. (2016). Konusvarı-silindrik paket dişli çarx reduktorunun optimallaşdırılması. *Journal of QU. Mechanical and Industrial Engineering. 1(4),* 42-48.

Mirzəyev, H., Çərkəsov, Ş., Hüseynov, O. (2018) İkipilləli silindrik dişli çarx reduktorunun minimal kütlə meyarına görə optimallaşdırılması. *Journal of BEU. Mechanical and Industrial Engineering. 1(2)*. 41-46.

Mott, R. (2004). *Machine Elements in Mechanical Design.* IV. Pearson: New Jersy

Schmid, S., Hamrock, B., Jacobson, B. (2014). *Fundamentals of Machine Elements.* III. CRC Press: London

Иванов, М., Финогенов В. (2008). *Детали Машин.* XII. Высшая школа: Москва.

Решетов, Д. (1989). *Детали машин*. IV. Машиностроение: Москва.

BÖLÜM 17
DÜZ DİŞLİ ÇARKLARDA KAPLAMANIN YÜZEY AŞINMASI VE YORULMAYA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Abdull Ghafoor SHAIB[1], Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA[2]
[1]Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, İstanbul / TÜRKİYE
[2]Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, İstanbul / TÜRKİYE

Öz: Birbiri ile temaslı ve rölatif hareketi sahip iki makine parçası güç ve hareket iletim sırasında, sistemde enerji kaybına, sistemin ısınmasına, düşük performansla yüksek toleranslı işlemleri yerine getirmesine neden olan aşınma, sanayi devriminden bu yana üzerinde durması gereken bir konu olmuştur. Mekanik sistemlerden aşınma olayını ortadan kaldırmak ne kadar ulaşmak istenilen beklenti olsa da bilim adamları ve ilgili alanda çalışan mühendisler ancak aşınma olayını minimize etmenin yolları denemişler ve denemekteler. Dinamik ve yüzey temaslı makine parçalardan düz dişli çarkların diş yüzeyinden aşınmayı azaltan en meşhur yöntemlerden yağlama işlemi geçse de yüksek gerilme altında çalışan düz dişlinin diş yüzeyleri kaplama yöntemleri ile geliştirmektedir. Bu metotlardan birisi yüksek gerilme altında çalışan yüzeyleri çalışma şartlarına uygun kaplama uygulaması geçmektedir. Katı yağlayıcı malzemeler (MoS_2, WC/C, WS_2 ve sayrı) ile birbirine bağıl hareketi sahip ve güç ileten düz dişli gibi makine parçaların yüzeyleri kaplamakla, sistem üzerinde bıraktığı performans, çevreye ve insana uygunluk, enerji tasarrufu, zaman kazancı ve üretim hızında yükselme gibi olumlu etkileri görünmektedir. Çalışmada MoS_2, WC/C, WS_2 yüzey kaplı düz dişli çarkların yüzey aşınmasına yorulma davranışlarının etkileri konu ile ilgili yapılan deneyler ve uygulama çalışmaları incelendi. İncelenen çalışmalar dişli çark mekanizmala-

rının çalışma şartları altında maruz kaldıkları problemleri tespit edildi. Tespit edilen problemler için çözüm önerileri sunuldu. Bu çözüm önerilerinin karşılaştırmaları yapıldı.

GİRİŞ ve KURAMSAL ÇERÇEVE

Hareket ve güç ileten iki dişli çark mekanizması, pinyon tarafından dişli çarka kuvvet iletim sırasında dişlilerin diş yüzeylerinde yüksek basınç oluşur (Erkaya ve Ulus, 2015). Buna Hertz gerilimi adı verilir. Hertz gerilim altından dişlinin diş yüzeyinde hasarlar meydana gelir. Bu hasarlar kendini diş yüzeylerinde aşınma, çizilme ve kırılma şeklinde ortaya çıkartır. Bu istenmeyen hasarları minimuma indirmek için deneysel çalışmalar ve hasar analiz yöntemleri yüzey kaplama işlemi uygulanır (Meyoshi, 2001). Deneysel çalışmada ve endüstrinin farklı alanında kullanılan metalik malzemelerin korozyona ve aşınmaya karşı mukavemetini yükseltmek ve kullanım alanlarındaki verimini arttırmak amacı ile çeşitli kaplama yöntemleri uygulanır. Demirden imal edilen ürünlerin mukavemetini korozyona karşı yükseltmek için en çok Ni, Cu, Al, Zn, Plastik, Boya, Sn (kalay), Cr, Ag ve Au gibi malzemeler ile yüzeyleri kaplanarak aşınma dayanımı arttırılır (Xu, Gao, Hum, Sun, Jiang, Zhou, Lia, Weng, 2014). Yüksek basınç altında çalışan dişli çarkların aşınmaya karşı mukavemetini yükseltmek amacı ile yapılan kaplamalar dişli çark malzemesinin üzerlerine uygulanır (Martins, Moura, Seabra, 2006). Makinelerde kullanılan paslanmaz çelik dişli çarkların kaplamasında en çok MoS_2, WS_2, CrN ve kesici takımların kaplamasında CrN, CrAlN, ZnN, TiAlN gibi kaplama malzemelerin karışımı ile yüzey kaplama proseslerinde kullanılır (Liu, Zhu, Zhang, Wang, Song, 2016). Literatürde yüzey kaplamaların metotları, kullanış yerleri ve kaplamanın verdiği sonuçları ile ilgili çalışmalar detaylı bir şekilde incelendi. İncelenen çalışmalar dişli çark mekanizmalarının çalışma şartları altında maruz kaldıkları problemleri tespit edildi. Tespit edilen problemler için çözüm önerileri sunuldu. Bu çözüm önerilerinin karşılaştırmaları yapıldı. Literatüre göre teknik bir sorun olan aşınma ekonomiyi de yakından ilgilendirmektedir (Kavaliauskiene, Bendikiene, Ciuplys, 2019). Yılmaz (2017), Yaptığı çalışmada aşınmanın ekonomiye verilen etkilerini açıklamaktadır. Aşınma sebeplerinden açığa çıkan malzeme kayıpları, ülkelerin yıllık bürüt mili hasılatının %6-7 sinin oluşturduğu saptanmıştır. Dolayısı ile dişli çarkların aşınma ile ilgili ve diğer makine parçalarının aşınmaları ile ilgili çalışmalar ekonomi açıdan da önemlidir. Birkaç dişli çark yüzey iyileşme metotlardan taşlama, sıcak dalma ve kaplama gibi yüzey iyileştirme işleminden geçerek sağlanır (Can, 2016). Böylece dişlinin diş

yüzeyini hasar görmeye karşı mukavemetini artırır. Aşınma konusu teorik bir temele dayandırmaya ait ilk çalışmaları Holm ve Archart gerçekleştirmiştir (Napiorkowski, Lemecha, Konat, 2019). Bu araştırmacılar yaygın olarak kullanılan (K) aşınma faktörünün de tarifini yapmışlardır. Dişlilerin kaplamaları üzerinde yapılan çalışmanın hedefi kaplama yöntemleri ile titreşim, aşınma, gürültü, zaman kaybı, enerji kaybı ve diğer çevresel olumsuz etkileri azaltmak ve kaplama yöntemlerini birbirleri ile karşılaştırmalarını yapmaktır.

Dişli Mekanizmaların Tarihçesi ve Kullanım Amaçları

Dişli çarkların, hareketi veya gücü dönen bir milden diğerine iletmek amacında kullanılan önemli makine elemanı olarak tanımlayabiliriz. Dişli çark mekanizmaları endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadır. Mekanik saat mekanizmasında kullanılan küçük boyutlu dişli çark mekanizması ile gemi sektöründe devasa boyutta kullanılan dişli çarklar kadar geniş kullanım alanı mevcuttur. Dişli çarklar, tarihi açıdan eski ve önemli bir makine elemanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Dişli çarklar binlerce yıllık tarihe sahiptir (Şekil-1). Dişli çarklar, binlerce yıl önce Mezopotamyalılar tarafından sulama tesislerinde kullanıldığı ve Romalıların ise biraz daha geliştirerek su değirmenlerinde kullanıldığı söylenmektedir[5]. Günümüzde dişli çarklar hareket ve güç aktarımı, trok ve suret değişimi ihtiyaç duyulan teknolojinin geniş alanında kullanılmaktadır.



Şekil 1. İlk Bulunan Dişli Çarklar

[5] https://www.kaizen40.com/disli-cark-nedir-ve-cesitleri-nel-erdir/#:~:text=Di%C5%9Fli%20%C3%A7arklar%2C%20binlerce%20y%C4%B1l%20%C3%B6nce,hareket%20aktar%C4%B1m%C4%B1%20gereken%20yerlerde%20kullan%C4%B1lmaktad%C4%B1r

En eski dişli çark dört yüz yıl MÖ Cinde geliştirilmiştir (Derek, Solla, 2014) ki Çin'in Henan ilindeki Luoyang müzesinde bulunmaktadır. Dişliler resmi olarak 400 MÖ Aristoteles'te momentum yönü değiştiren bir mekanik mekanizmanın parçası olarak geçmiştir[6]. En eski dişli mekanizması astronomi konumları hesaplanan Antikitera mekanizması (Şekil-2) Avrupa'da bulunmuştur ki 150-100 MÖ yıllara dayanır[7].



Şekil 2. Antikitera Düzeneği, Astronomik Konumları Hesaplamak İçin Tasarlanan Eski Mekanik Bir Hesap Makinesidir

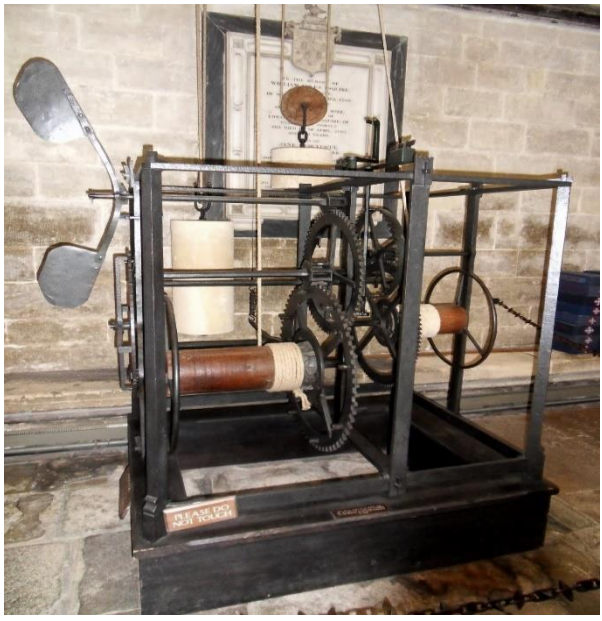
Dişli çarklar milattan yüz yıl önce eski mısır Heron of Alexandria çalışmalarında matematiksel ifadeleri ile görülmektedir (Norton, Robert, 2004). Dişli çarklar (287-212) MÖ eski Yunan matematikçi Arşimet tarafından büyük ölçüde geliştirilmiştir (Lewis, 1993). Teknoloji ile birlikte dişli çark tasarımı, şekli, kullanım alanları ve üretimi de geliştirmiştir. Günümüzde kullanılan geleneksel düz dişi çarklara çok benzeyen dişli çarklar Salisbury Katedrali Saatin'de 1386 yılında geliştirildi (Şekil-3). Bu en eski ve çalışan mekanik mekanizmadır. Çin'de ilk kez dişli çark içeren mekanik saat 725 yılında yapıldı. 1800 yılında şekil kesme takımları ve dişli çark üretim makineleri ilk kez geliştirildi[8] 1897'da Herman Pfauter in geliştirdiği makineden bu yana geleneksel düz dişli ve helisel dişli çarklar üretilmeye başladı[2]. 18. ve 19. yüzyılda buharlaştırıcılar, rulmanlar, piston silindir mekanizmaları ve dişli çarklar mekanizmaları icat edilmiş ve o devrin sana-

[6] https://www.federalgear.com/blog/a-short-history-of-gears-and-where-gear-manufacturing-is-today

[7] http://www.antikythera-mechanism.gr/faq/general-questions/why-is-it-so-important

[8] https://en.wikipedia.org/wiki/Gear#:~:text=Gears%20appear%20in%20works%20connected,(287%E2%80%93212%20BC)

yisinde kullanılmıştır. Yüzyıllardır dişli çark profilleri üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Kırılma ve aşınmaya dayanıklı diş profili tasarlanmıştır ancak makine mühendisleri diş profil tasarımında gerekli düzeyde teorik bilgileri sahip değillerdi. Asırlar boyu diş profiller üzerinde süren uzun çalışmaları sonucu bu problemin çözümü diş profillerinde episikloit, evolvent ve daire açınımı profillerinin kullanılmasıyla çözüldü. Dişlerin profili üzerinde hala çalışma devam etmesinin yanı sıra profillerde mevcut olan geometrik özelliklerin üzerinde de çalışmalar mevcuttur. Günümüzde NC ve CNC makineleri ile düşük toleransta, yüksek hassasiyette, gelişmiş teorik yazılım vasıtası ile seri ve tek çeşit siparişi şeklinde dişli çarklar üretilmektedir.

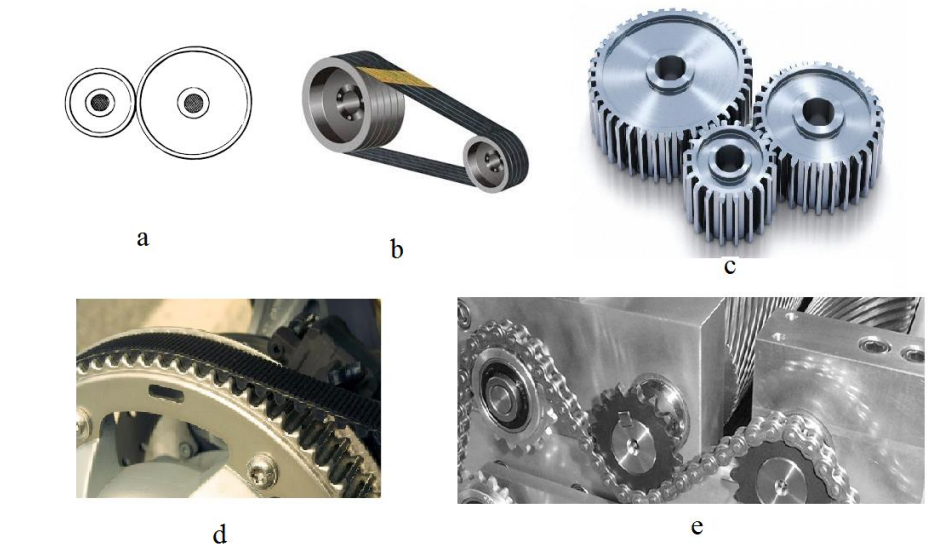


Şekil 3. Dünyanın En Eski ve Çalışan Salisbury Katedrali Saati

Dudley, (1954), kitabında dişli çarkların çeşitleri ve biçimlerinden bahsederken dişli çarkların kullanım alanı ile ilgili olarak şunları anlatıyor. Dişli çarklar sadece sanayide kullanılan makine elemanları olarak kalmıyor. Oyuncak teknolojilerinde de geniş kullanım alanına sahiptir. Çocukların teknolojik oyuncaklarında kullanılan dişli çark mekanizmaları sadece hareket iletim amacında kullanılır ve bu alanda dişli çarkların ömrü ve aşınma olayı hesaplanmaz. Günümüzde ise birçok güç ve hareket iletimi gereken yerlerde kullanılmaktadır. Günümüzde bilinen en iyi örnek ise otomobillerin vites kutusunda kullanılmasıdır.

Dişli Mekanizmaların Teknolojide ve Hayatımızda Önemi

Dişli çark mekanizmaları olmadan normal hayatımızın sürmeyeceği açıktır. Dişli çarklar olmadan elektrik üretilemez, enerji transferi gerçekleşemez, transport hizmetleri durur ve en önemlisi hiçbir ürün üretilemez hale gelecektir. Hareket ve güç iletme isteklerine ulaşmak için dişli çark mekanizmalarına benzer dişli-kasnak ve kayış-kasnak mekanizmaları da kullanılır. Kayış-kasnak ile hareket ve güç iletim mekanizmalarında çevrim oranının değişkenliği çok önemli değildir. Teknolojik mekanizmalarda çevrim oranının önemli olduğu, yağlama işlemi gerektirmemesi, sessiz çalışması, verimli olması ve dişli çark mekanizmasına göre düşük güç ile çalışması, kayma oluşmada hareket iletimin önemli olduğu yerlerde dişli-kasnak mekanizması kullanılır. Çevrim oranı, yüksek tork ve verimin çok hassas olduğu teknolojik tasarımlarında dişli çark mekanizmaları kullanılmaktadır. Tevrüz, (2015), Şekil 2'de gösterildiği gibi Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri adlı kitabında dört çeşit hareket ve kuvvet iletiminden söz etmektedir ve bunları iki kategori altında getiriyor; şekil bağı ve kuvvet bağı(sürtünme). Zincir mekanizması, dişli çarklar mekanizması ve dişli kasnaklar mekanizması şekil bağı olarak ve kayış kasnak mekanizması ve sürtünmeli çarklar mekanizması kuvvet bağı olarak bu kitapta açıklanmıştır (Şekil-4).



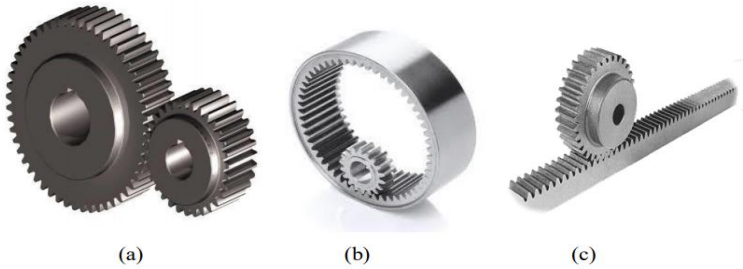
Şekil 4. A: Sürtünmeli Çarklar Mekanizması, B: Kayış Kasnak Mekanizması, C: Dişli Çarklar Mekanizması, D: Dişli Kasnak Mekanizması, E: Zincir Mekanizması (Tevrüz, 2015).

Dişli Mekanizmaların Kullanım Alanları

Hareket nakli, şekil bağı ve kuvvet bağı (sürtünme) ile gerçekleşmektedir. En önemli güç ve hareket iletme mekanizmaları; dişli çark, kayış-kasnak, zincir ve sürtünmeli çark mekanizmalarıdır. Bu çalışmada hareket ve güç ileten mekanizmalardan dişli çark mekanizmaları göz önünde alacağız. Dişli çark mekanizması güç ve hareket iletimde diğer güç ve hareket iletim mekanizmalara göre makinelerde somun, civata, rondela gibi makine elemanları olarak kullanılmaktadır. Dudley, (1954) kendi kitabında dişli çark mekanizmalarının kullanım alanları hakkında şöyle bahsediyor: Dişli çark mekanizması geniş kullanım alana sahiptir. Örnek olarak çocukların oyuncaklarında plastikten yapılmış dişli çark mekanizmaları evde bulunan buzdolabı, çamaşır makineleri, elektrik süpürgeleri, yemek karıştırıcıları ve pervaneler gibi ev teçhizatlarında da dişli çark mekanizmaları kullanılmaktadır. Sanayide kullanılan makinelerde de hareket ve güç, yüksek hassasiyetli iletim amacıyla makine elemanı olarak montaj edilmiştir, şekil değiştirmeden ve bağıl kaymayı izin vermeden hareketi iletebilme özelliğine sahip olduğundan kontrol ölçüm cihazları da kullanılmaktadır. Her otomobil vites kutusunda dişli çarklar kullanılmıştır. Ulaşım alanında kullanılan otobüs, metro, tren, tramvay, yük taşımacılıkta ve diğer tüm araçlarda da dişli çark mekanizmaları kullanılmıştır. Gemicilik ve havacılık sektöründe dişli çark mekanizmaların kullanımı vazgeçilmezdir. Sonuç olarak hayatımızın her alanında dişli çark mekanizması kullanılmaktadır.

Düz Dişli Çarklar

Düz dişli çarklar en basit dişli tipidir. Düz dişli çarklar diskin veya silindirin radyal doğrultusunda çıkıntılar oluşturarak üretilir (şekil 5.) Düz dişli çarkların dişlerinin kenarları düz olup dönme eksenine paraleldir. Düz dişli çarklar hareket ve güç iletim, dönen milin devir sayısını küçültüp büyütmek ve momenti değiştirmek amacında makine elementi olarak makinelerde kullanılmaktadır. Düz dişli çarklar dönme hareketi bir milden diğer mile üzerindeki dişlerin birbirini kavrayarak dönmesi ile iletilir (Tevrüz, 2015).



Şekil 5. Düz Dişli Türleri (A) Dış Alın Düz Dişli (B) İç Düz Dişli (C) Kremayer ve Pinyon Düz Dişlileri

Düz dişli çarkların temel kavramları ve boyutlandırılması

Adım: Taksimat dairesi üzerinde bir diş kalınlığı ile bir diş arası boşluğu kapsayan uzunluğa diş adımı denir. Adım t veya p ile makine elemanlar kitaplarında gösterilir.

Modül: Dişlinin bölüm dairesi çapının diş sayısına bölünmesi ile ortaya çıkan değerdir. Modül metrik sisteminde m ile gösterilir. $m = \frac{d_0}{z}$ İle ifade edilir. Burada d_0 dişlinin bölüm dairesi çapı ve z dişlinin diş sayısıdır. Modülün başka bir ifade ile $z \times t = \pi \times d_0$, dişlinin diş sayısı çarpı adım taksimat dairesinin çevresine eşittir. $m = \frac{d_0}{z} = \frac{d_0}{\frac{\pi \times d_0}{t}} = \frac{t}{\pi}$ de ifade edilir.

Taksimat dairesi: Taksimat dairesi dişli çark büyüklüğünü belirleyen ve üzerinde dişlerin taksimatı yapılan dairedir (Şekil 6).

Diş başı dairesi çarpı: Dişlerin üst kısmından geçen dairenin çapıdır d_b ile gösterilir. Düz dişli çarklarda taksimat dairenin çapı ile modülün iki katının toplamından elde edilir ($d_b=d_0+2m$).

Taban (gövde) dairesi çapı: Dişlerin alt kısmından geçen dairenin çapıdır d_g ile gösterilir.

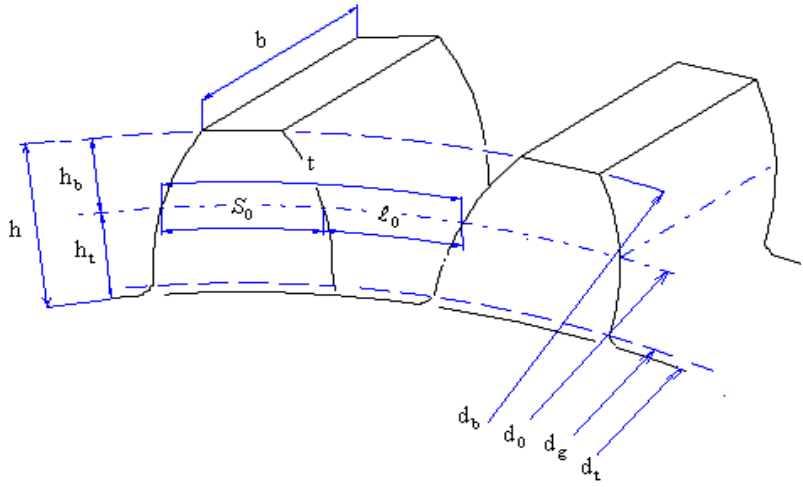
Diş Baş Yüksekliği: Dişlinin taksimat dairesi ile dişlinin diş üstü arasında uzaklıktır h_b ile gösterilir. Düz dişlilerde bu yükseklik genellikle modüle eşittir ($h_b=m$).

Diş Taban Yüksekliği: Dişlinin taksimat dairesi ile diş dibi arasında uzaklıktır ht ile gösterilir. Düz dişlilerde bu yükseklik 1,166m kadardır. (ht=1,166xm). Diş taban yüksekliği dişlinin cinsine ve çalışma şartlarına göre değişmektedir.

Diş Başı Yüksekliği: Düz dişli çarklarda diş başı yüksekliği dişlinin üst dairesi ile dişlinin temel dairesi arasında uzaklıktır h ile gösterilir. Diş başı yüksekliği düz dişli çarklarda 2m dır (h=2xm).

Diş Yan Boşluğu: Eş çalışan dişler birbiri üzerinde operasyon sırasında yuvarlanarak dönerken döndürülen ve döndüren diş profilleri arasında kalan boşluktur S_y ile gösterilir.

Diş Boşluğu: Eş çalışan dişli çiftinde birbiri üzerinde yuvarlanarak döneme hareketi yaparken birinin diş üstü diğerinin diş dibi arasında kalan boşluğa diş boşluğu denir. Diş boşluğu S ile gösterilir (Şekil 7).

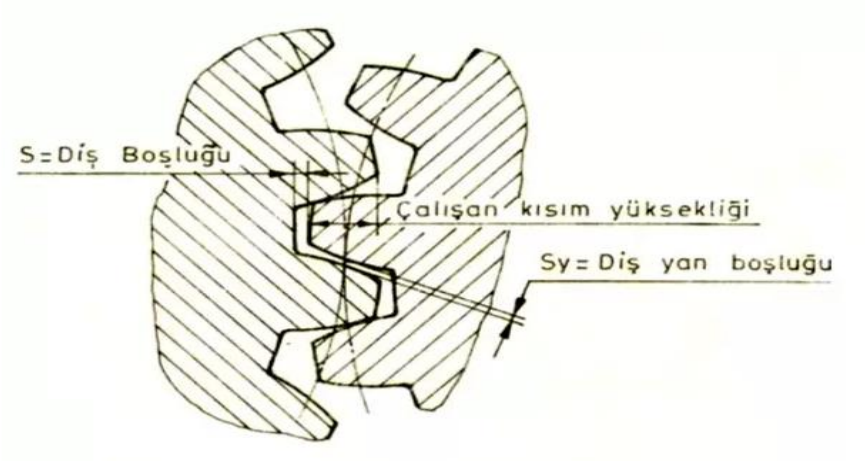


Şekil 6. Diş ve Dişli Boyutları

Tablo 1. Dişli Terminolojisi

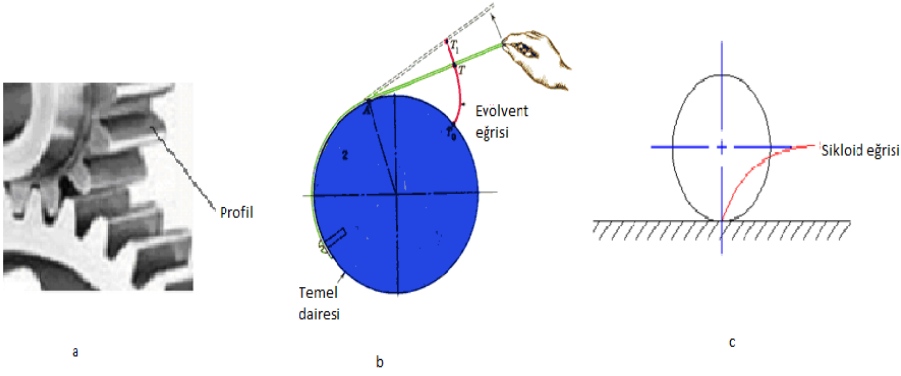
Dişli çark treminolojisi			
Diş Başı Yüksekliği	h_b	Diş Boşluğu	l_0
Diş Taban Yüksekliği	h_t	Diş Genişliği	$b=w_m m$, $b=w_d d_0$
Diş Yüksekliği	$h=h_b+h_t$	Taksimat Dairesi Çapı	$d_0=mz$
Taksimat (Adım)	t=	Diş Başı Dairesi Çapı	$d_b=d_0+2h_b$
	Пm	Taban Dairesi Çapı	$d_t=d_0-2h_t$
Diş Kalınlığı	S_0	Temel (gövde) Dairesi Çapı	d_g

DİŞLERİN PROFİL EĞRİLERİ



Şekil 7. Dişlinin Çalışan Yüksekliği ve Dişler Arasında Boşluklar[5]

Dişlerin yan yüzey eğrisine profil denir. Dişli kullanım alanında en çok evolvent diş profili ve sikloid profili eğri kullanılır (Şekil 8). Evolvent eğrisi bir doğrunun bir noktası sabit bir daire üzerinde kaymadan yuvarlanarak oluşturduğu eğridir[9].

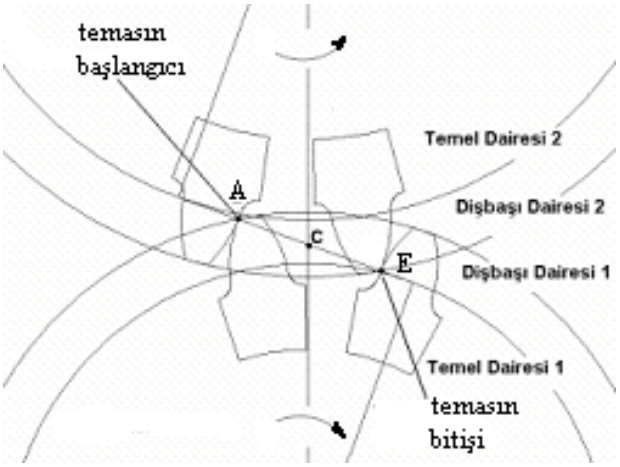


Şekil 8. (A) Düz Dişli Çarkın Profili (B) Düz Dişli Çarkın Evolvent Eğrisi (C) Düz Dişli Çarkın Sikloid Eğrisi[5]

Sikloid eğrisi ise bir daire üzerindeki bir noktası bir doğru üzerinde kaymadan yuvarlanması halinde çizdiği eğriye sikloid eğrisi denir. Bu çalışmada ele alınacak dişlinin diş profilleri evolvent profili sahiptir.

[9] https://teknikbilgisitesi.blogspot.com/2015/01/duz-disli-carklar.html

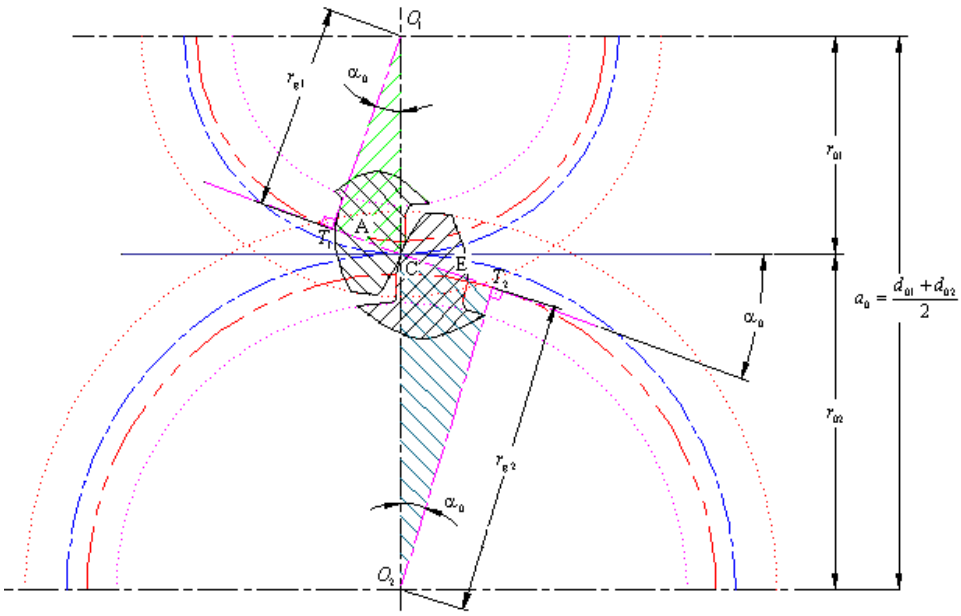
Kavrama olayı: Dişli çarklarda diş profilin kavraması, hareket iletim sırasında döndüren dişlinin diş tabanın döndürülen dişlinin dişin baş noktası ile temasa geçmesi ile kavrama olayı başlar döndüren dişlinin dişin en baş noktası ile döndürülen dişlinin diş taban noktasından ayrılması ile biter (Şekil 9). Eş çalışan düz dişli çarkların profillerin çalışma sırasında temas noktaları kavrama eğrisini verir. Bu kavrama eğrisi evolvent profili sahip dişli çarklarda bir doğrudur ve buna kavrama doğrusu adı verilir. Bu doğru dişlilerin temel dairelerine teğet ve diş profillerin temas noktalarına diktir.



Şekil 9. Eş Çalışan Evolvent Profilli Dişlilerin Kavrama Eğrisi

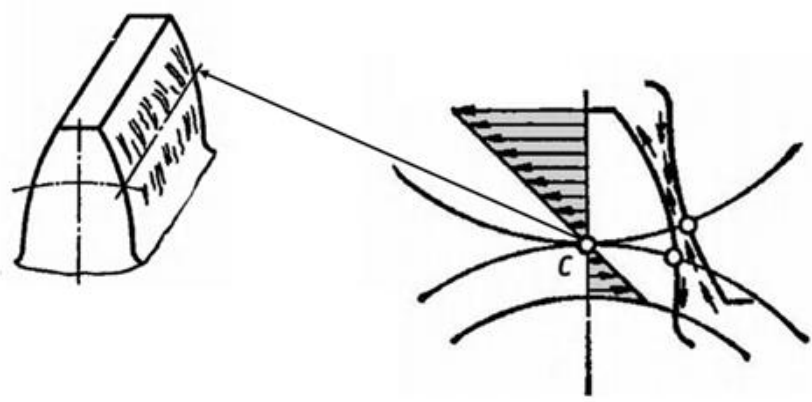
Kavrama açısı

Kavrama açısı, yuvarlama dairelerinin ortak teğeti ile kavrama doğrusu arasında oluşan açıdır. Düz dişli çarklarda kavrama açısı $\alpha_0$ile gösterilir (şekil 10).



Şekil 10. Kavrama Doğrusu ve Kavrama Açısı

Diş profilleri hareket iletim sırasında birbiri üzerinde kayma hareketi ve dönme hareketi gerçekleştirir. Profillerin birbiri üzerinde kayması sonucu dişlerde adezyon aşınması meydana gelir. Ancak diş profilleri C noktasında sadece dönme hareketi mevcut ve kayma hareketi yok iken adezyon aşınması oluşmaz. Kayma hızı kavramanın başlangıcındaki ve sonundaki noktalarda büyük olduğunda adezyon aşınmanın değeri de bu noktalarda büyüktür (Şekil 11).

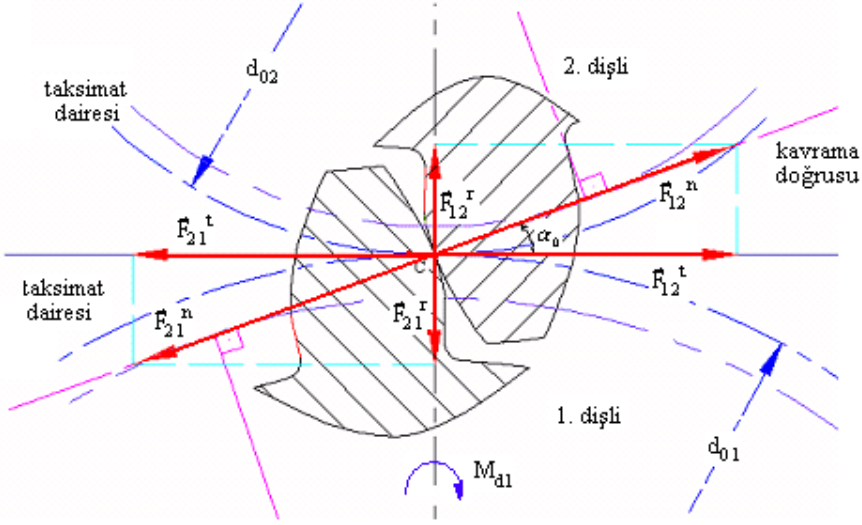


Şekil 11. Düz Dişlerde Aşınmanın Durumu C Noktasında Aşınma ve Kayma Yoktur (Temiz, 2005)

DİŞLİ ÇARKIN MUKAVEMET HESABI

Diş kuvveti

Düz dişli çarklar moment iletmeleri sırasında döndüren dişli tarafından döndürülen dişliye kavrama doğrusu boyunca normal kuvvet f_n etkir. Eş çalışan dişlileri operasyon altında normal kuvvetin dışında dişli çark mekanizmasında oluşan titreşimden kaynaklanan dinamik kuvvetleri, dişli çarkın ve mekanizmanın imalatında tasarımdaki ve üretimdeki kalitesizlikten ortaya çıkan ek kuvvetleri altında zorlanır. Dişli çarkın mukavemet hesabını yapılırken yukarıda bahsedilen kuvvetler göz önünde alınması gerekir. Bu ek kuvvetlerin kesin bir değer olarak hesaplaması zor olduğundan deneylerde elde edilen katsayılar ile bu kuvvetlerin etkileri düz dişli çark mukavemet hesabına dahil edilir. Dişlilerin operasyon sürecinde döndüren dişliden döndürülen dişliye moment iletirken kuvvet eş çalışan dişlerin kavrama doğrusu boyunca etkir. Bu kuvvet diş kuvveti veya normal kuvveti olarak bilinmektedir (Şekil 12).



Şekil 12. Dişlere Etkiyen Kuvvetler

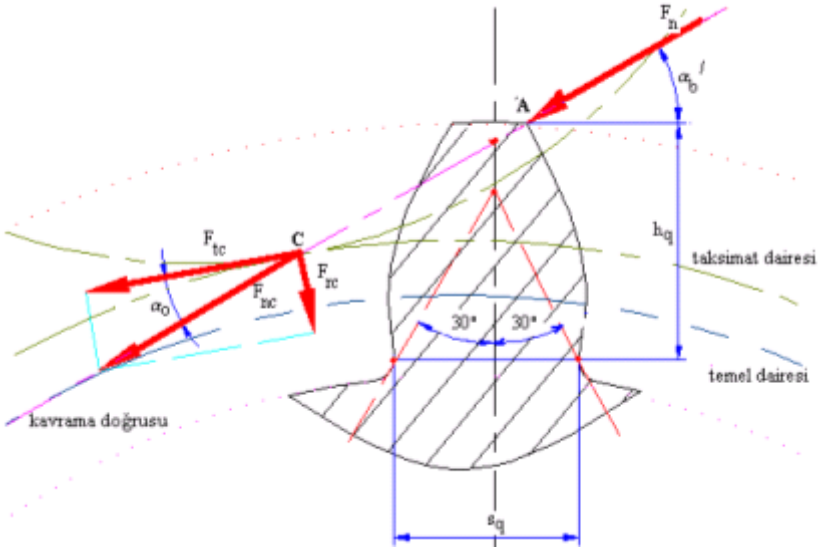
Birlikte çalışan çift dişlerin C yuvarlanma noktası taksimat dairesi üzerinde bulunduğu takdirde diş kuvvetinin teğetsel bileşeni, $F_t=Fn\cdot\cos(\alpha_0)$ ve radyal bileşeni, $F_r=F_n\cdot\mathrm{Sin}(\alpha_0)$ olur. Teğetsel kuvvet ile iletilen moment ise $M_{db}=\frac{F_t\cdot d_0}{2}$ olarak ifade edilir.

Diş dibi gerilmeleri

Fetvacı, Irmak, (2007)'in çalışmalarına göre eş çalışan dişlilerde eğilmeden en büyük gerilme diş tabanında meydana gelir, çekme oluştuğu diş tabanındaki kırılmalar o bölgedeki bir çatlak ile başlar, zamanla bu çatlak büyür ve tasarımdaki eğilme gerilmeyi taşıyamayacak haline gelir ve birdenbire kopma meydana gelir. İşte burada deney altında ala alınacak düz dişli çarklar tasarımdaki diş dibi emniyet gerilmesinin altında çalıştırılmasına dikkate alınacaktır (Fetvacı, Irmak, 2007).

DIN standardına göre diş dibi gerilme hesabı

DIN standardına göre kavrama kuvvetin etki noktası eş çalışan dişlilerin kavramanın başlangıcı A noktasıdır (Şekil 13). Bu yönteme göre diş dibi kırılma kesiti kalınlığı Sq, diş simetri ekseni ile 30^0 lik açı yapan iki doğru çizilmesi ile belirlenir. Eğilme gerilmesine sebep olan normal kuvvetin diş tabanından mesafe hq ise kavrama doğrusunun diş simetri ekseni kesti nokta ile diş tabanı kırılma kesiti arasındaki uzaklıktır.

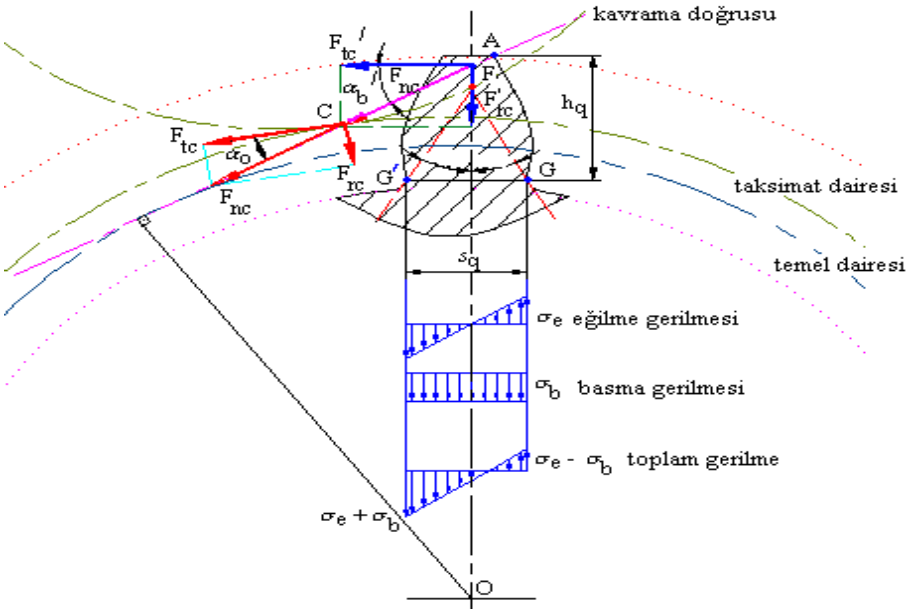


Şekil 13. DIN Yöntemi ile Diş Dibi Gerilme

Dişlinin diş dibi gerilmesi hesaplamasında diş dibinde oluşan kesme gerilmesi çok küçük olduğundan çoğu hesaplarda yalnız eğilme gerilmesi ve basma gerilmesi göz önüne alınır (Şekil 14).

Eğilme gerilmesi $\sigma_e = \frac{F'_{tc} \cdot h_q}{\frac{1}{6} b \cdot s^2_q}$

Basma gerilmesi $\sigma_b = \frac{F'_{rc}}{b \cdot s_q}$



Şekil 14. Diş Tabanında Oluşan Gerilme

Dişli çark üretim metotları

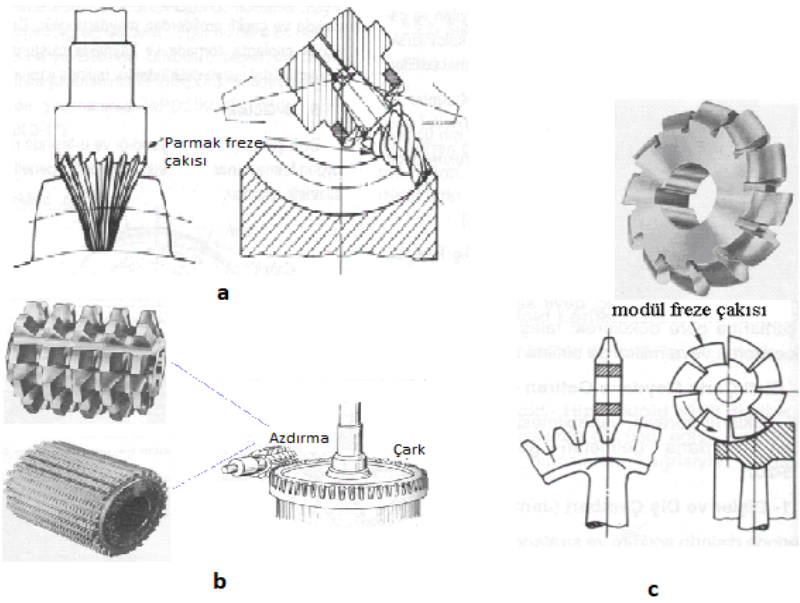
Dişli çarklar; kullanım amacına, kullanılan malzeme, geometrik, ölçü ve farklı şekillere bağlı farklı üretim metotları geliştirilmiştir. Genel olarak dişliler telaşsız imalat yöntemi (presleme, sinterleme, döküm, haddeleme ve ovalama) ya da talaşlı imalat yöntemi (freze, Maag, Fellow, Zımbala, Broşlama) ile iki farklı şekilde üretim yapılmaktadır. Ancak kaliteli düz dişli üretimi en iyi talaş kaldırma işleme yöntemiyle NC makinelerinde üretilir (Alsaran, 2018).

Döküm yöntemi ile diş imalatı, Döküm dişliler dökme demir, dökme çelik, seramik veya polimer malzemeleri preslenerek imal edilir. Döküm dişliler 2m/s hızı aşmayan dişli çark mekanizmalarında kullanılır. Döküm düz dişler, döküm işleminden sonra herhangi ekstra işleme gerek kalmadan direk makinelerde kullanılabilir. Döküm yolu ile imal edilen dişli çarklar dişlerin dış kısmında döküm kabuğu ile kaplanır ve böylece dişlerin, aşınmaya karşı mukavemetli olur (Şekil 15).



Şekil 15. Döküm Dişli Savaş Topu Mekanizması (Koray, 2018)

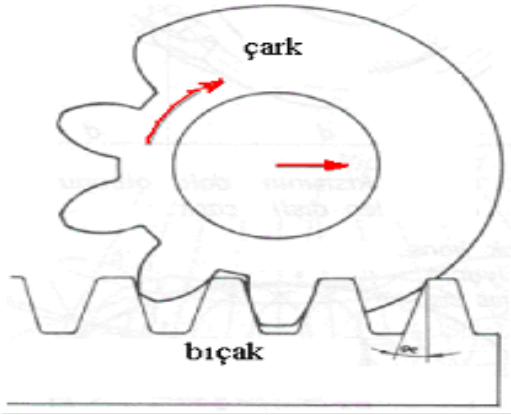
Form frezesi ile diş açma, bu yöntemi ile imal edilecek dişli çarkın diş profili kesici takım profilinin aynısıdır. Dişler silindir yüzeyinde freze tezgahında divizör kontrol taksimatı ile kesilir. Form frezesi ile kesilen dişliler direk kullanılmaz çünkü dişlinin diş yüzeylerinde pürüzlülüklerin yoğunluğu ve yüzey safsızlığı mevcuttur. Dişlileri diş ıslahından sonra kullanıma hazır olur. Form yöntemi ile açılan dişlilerde diş açmada kullanılan kesici takımlar genelde disk veya parmak freze şeklinde kesici bıçak kullanılır. Her modüle özel kesici disk veya parmak bulunur (Şekil 16).



Şekil 16. Form Yöntemi ile Düz Dişli Çark Açma (A) Parmak Freze Çakısı (B) Sonsuz Vida Freze Çakısı (C) Modül Freze Çakısı

Maag metodu ile imal edilen düz dişliler

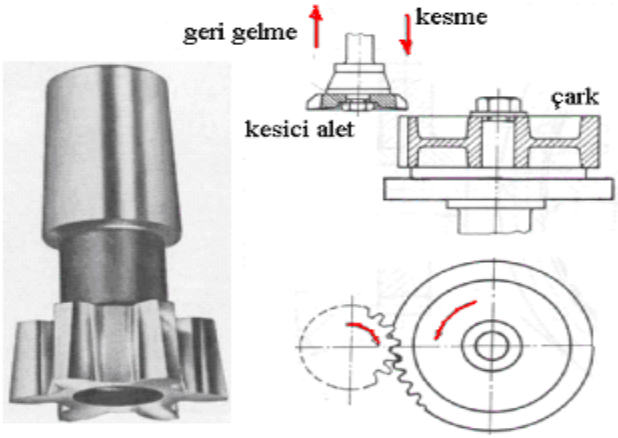
Bu yöntemde kesici takımı kremayer şeklinde bıçak kullanılır (Şekil 17). İmalat sırasında her talaş kaldırma sırasında kesici takımı kendi eksenine paralel ve açılan dişli çark ekseni etrafında dönme hareketi yaparak diş açım işlemi gerçekleşmektedir. Bu döneme ve ilerleme hareketi zaman içinde ne kadar yavaş ise o kadar açılan dişliler temiz ve kaliteli imal edilir. Form diş açma yöntemi gibi her bir modül değeri ve farklı diş sayıları için ayrı ayrı kesici bıçağı mevcuttur.



Şekil 17. Maag Metodu ile Düz Dişli Çarklarda Diş Açma

Fellow metodu

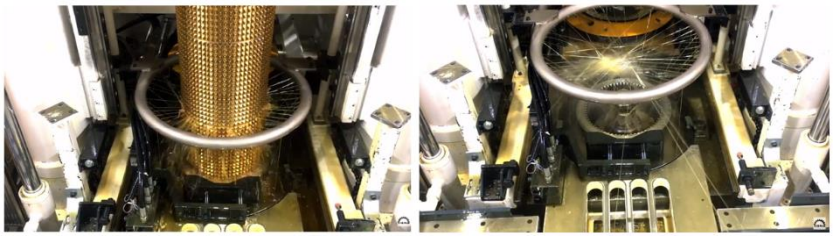
Bu yöntemde kesici bıçak dişli çark şeklindeki bir kesici bıçak kullanılır. Bu metotta kesici bıçak yukarı yönde boş hareketi yapar ve aşağı yönde talaş kaldırarak diş açar. Kesici takım, diş açılacak dişli çarkın yukarısındayken gerek kendisi gerek dişli çark küçük bir dönme yapar (Şekil 18).



Şekil 18. Fellow Metodu ile Diş Açma

Broşlama metodu ile dişli üretimi

Broşlama, doğrusal kesme hareketi uygulayarak iş parçasının içinden veya dışından talaş kaldırma işlemine denir. Kama yuvalarının açılması, iç profilli düz dişli çark, dış profilli düz dişli çark üretimi, freze ile yapılması gereken işleri, el takım imalatı için kullanılan metal işleme metotlardan biridir. Broşlama diğer metal işleme yöntemlerine göre daha hızlı ve hassastır. Bu metot ile işlenecek parçanın dış yüzeyini veya önceden açılmış bir deliğin iç yüzeyinden talaş kaldırarak şekillendirilir. Üzerinde kademe kademe artış gösteren birçok kesici ağız diş veya kenar bulunan bir kesici takımı ile broşlama işlemi gerçekleşir. Düz dişli üretiminde broş tığları genellikle doğrusal hareket ettirerek kullanılır (Şekil 19) (Koray, 2018).



Şekil 19. Broşlama Metodu ile Dişli Üretimi

Diğer metotlarla dişli çark imalı

Zımbalanarak, küçük güçleri ileten mekanizmalarda kullanılan dişliler zımbalama metodu ile ince saçlardan veya ince levhalardan imal edilir. Kesici hassasiyetine göre dişli çarklar düzgün yapılabilir.

Püskürtmeli dökümle, genellikle bu yöntem plastik dişlilerin imalatı için tercih edilir. Kalıplara dişli çarklarda kullanılan malzemesi püskürterek dişli çarklar imal edilir.

Sinterleme ile dişli imalı, dişli çarkın imalında kullanılan toz halinde malzemeyi kalıplara doldurulur, preslerde preslenir ardından toz taneleri ısı ile erime derecesinin altına kadar sinterlenir. Elde edilen dişliler gözenekli görünse de mukavemetlidir.

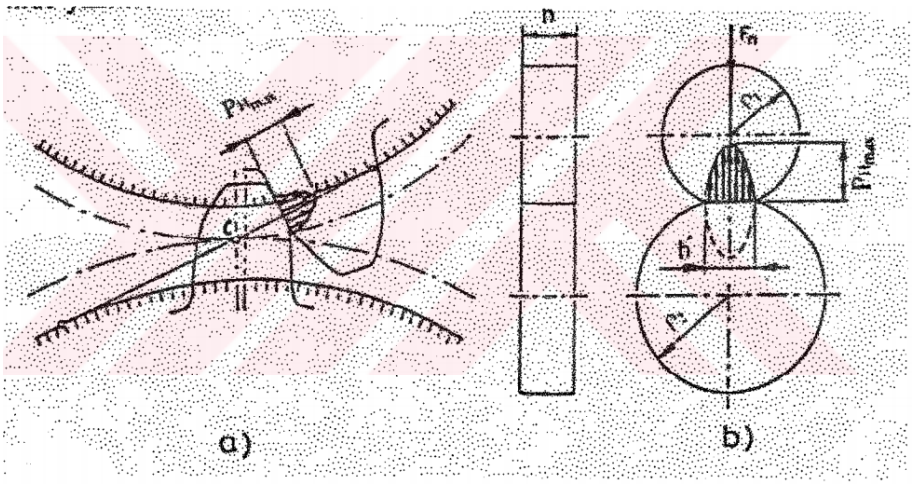
Lazer Kesim Metodu, Kalınlığı 12 mm az olan dişliler bu metot ile üretilir. Hassasiyetin çok elzem olmadığı ve düşük hızda çalışan sistemlerde tercih edilir.

Diş profilleri arasındaki yüzey basıncı

Eş çalışan düz dişli profillerin temas noktasında, Şekil 20'de de gösterildiği gibi Hertz tipi yüzey basıncı meydana gelmektedir. Bu yüzey basıncı ifade edebilmek için Şekil 20'de gösterilen temasta bulunan iki silindir ele alınır. Bu silindirlerin temas yüzeyinde Fn normal diş kuvvetinin etkisi altında oluşan yüzey basıncı

$$P_H = \sqrt{\frac{F_n \cdot E}{2 \cdot \pi \cdot b \cdot \rho}}$$

Şeklinde yazılır.



Şekil 20. Dişli Çarklarda Hertz Yüzey Basıncı

Burada E eşdeğer elastisite modülü;

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{2}\left[\frac{1-\nu_1{}^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2{}^2}{E_2}\right]$$

(ν) Dişlide kullanılan malzemenin poison oranı çelik için 0,3 alınır. ve (ρ) eşdeğer eğrilik yarı çapı.

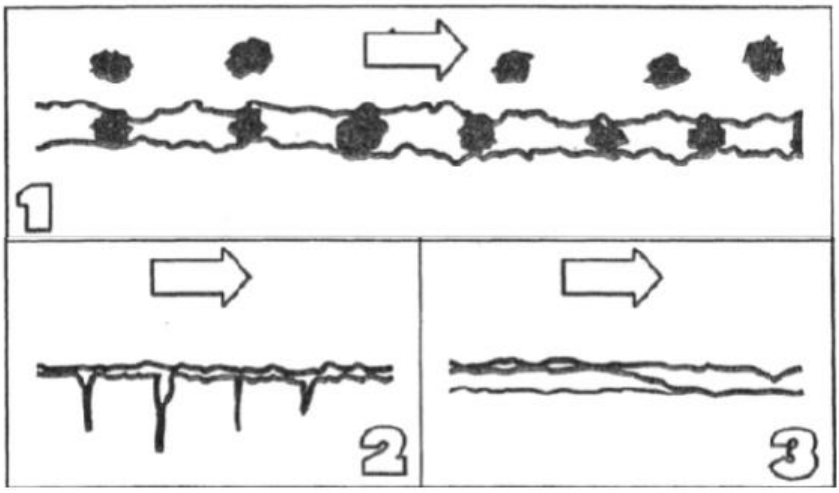
$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_1} \mp \frac{1}{\rho_2}$$

AŞINMANIN TANIMI ve TÜRLERİ

Aşınma, kullanılan malzemelerin başka malzemelerle temas halinde dış etkenlerden dolayı malzeme yüzeyinden küçük parçacıkların kopması ile malzeme yüzeyinde istenmeyen değişiklikler meydana gelmektedir. Bu istenmeyen olaya aşınma denir. DIN 50320'e göre aşınma; katı cisimlerin yüzey alanlarındaki tribolojik zorlanma sonucu sürekli artan malzeme kaybı şeklinde ifade etmiştir. Aşınmadan söz edebilmek için aşındırıcı ve aşınılan arasında mekanik etkenlerden sürtünme var olması, yavaş ve sürekli olması ve malzeme yüzeyinde değişiklik meydana gelmesi gerekmektedir. Teknik bir sorun olan aşınma ekonomiyi de yakından ilgilendirmektedir. Önceki araştırmalar sonucu karşılaşılan aşınma sebeplerinden açığa çıkan parçacık kayıpları ülkelerin yıllık brüt milli hasılatının %6-7'sini oluşturduğu saptanmıştır (Yılmaz, 2017). Erdem, (2006) kendi tez çalışmasında aşınma hakkında literatür araştırması yaparken aşınma hakkında bilimsel ve

tarihsel çalışmaları şöyle anlatır. Aşınma ile ilgili ilk kez Sümer ve Mısır uygarlıkları daha sonraları ise Rönesans devrinde Leonardo, (1452-1519) ve Amontos, (1663-1705) tarafından incelenmiş ve onlar tarafından ana prensipleri ortaya konmuştur (Erdem, 2006). Aşınma ile ilgili bu çalışmalar diğer bilim adamlarına büyük ışık tutmuştur. Eş çalışan düz dişli çarklar işlem esnasında çeşitli yük faktörlerinin nedeni olarak 3 temel aşınma mekanizmanın performansına etki eder (Şekil 21) (Kılıçay, 2012).

1. Abrasif aşınması
2. Adhesiv (Scuffing)aşınması
3. Yorulma (Pitting) aşınması

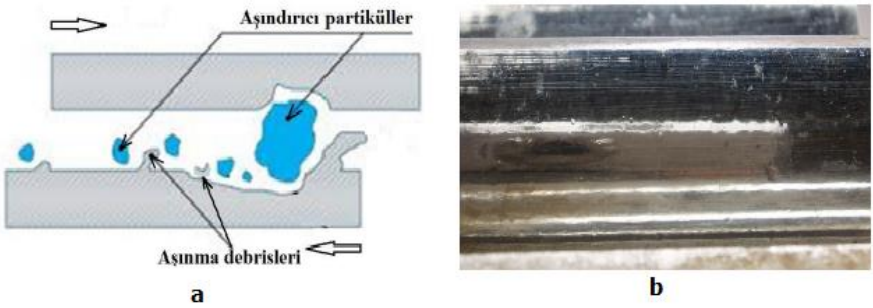


Şekil 21. Temel Aşınma Tipleri (Kılıçay 2012)

Abrasif aşınması

Sert malzemenin yüzey pürüzleri ile daha az sert malzemenin yüzey pürüzlerin teması ile yumuşak malzemenin yüzeyinde malzeme kaybı olarak bilinir. Bu temasta malzeme yüzeyleri birbirine göre bağıl hareketi sahiptir. Temas sırasında sert olan yüzey yumuşak olan yüzeyde plastik deformasyona neden olur. Abrasif aşınmanın oluşması için iki durum söz konusudur. Birincisi sürtünen yüzeylerden biri daha serttir ki buna iki cisimli abrazyon denir. Bu tür abrazyon dişli çark mekanizmalarında görünse de daha çok talaşlı imalat işlemlerinde görülür. İkinci durumda ise sert malzeme iki yüzey arasında bulunur (Şekil 22). Yüzeylerden birini veya her ikisini de aşındırabilir. Buna üç cisimli abrazyon aşınması denir. Dişli çark mekanizmasından ve parlatma işlemlerinde görülmektedir (Çakır, 2006).

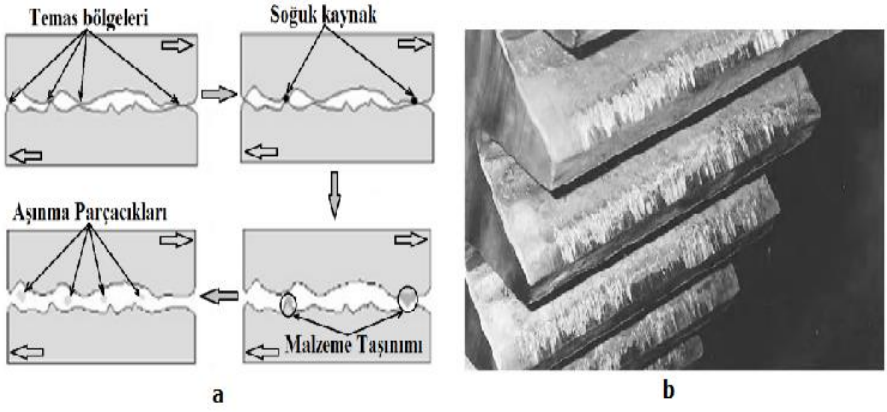
Dişlinin diş yüzeylerinde oluşacak abrasif aşınmaya karşı yüzey kaplama yöntemleri ile temas yüzeylerinin sertleştirilmesi ve yağlayıcı madde kullanımı önerilmektedir.



Şekil 22. (A) Abrasif Aşınması (B) Diş Yüzeylerindeki Abrasif Aşınmanın Görünümü

Adhesiv aşınması

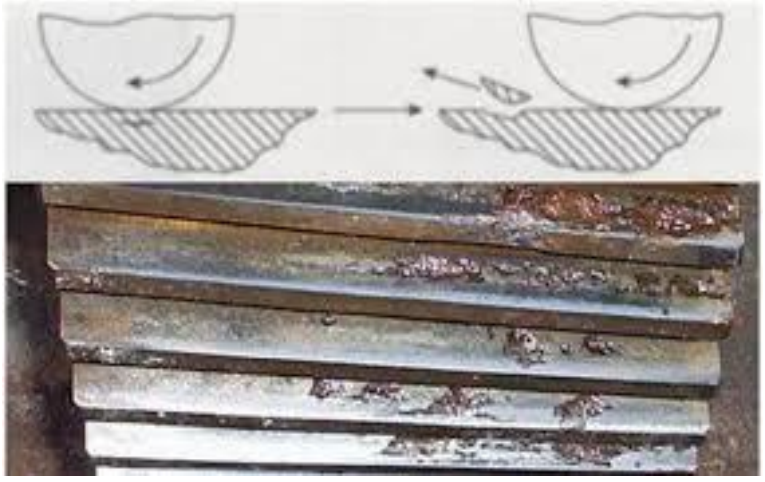
Birbirine göre rölatif olarak hareketi sahip ve aynı anda temas halinde çalışan iki metal parçanın yüzeyleri yüksek noktalardan temas ederler. Bu durumda temas noktalarında yüksek basınç meydana gelir. Yüksek basıncın nedeni metallerin akma sınırından geçmesi ve temas bölgelerinde soğuk mikro kaynak oluşmasıdır. Temas yüzeylerinin rölatif hareketinin sonucunda mikro kaynaklar kırılır. Yumuşak metal malzeme yüzeyinde küçük kütle zerreleri koparılır. Bu şekilde meydana gelen aşınma adhesiv aşıma olarak isimlendirilir (Şekil 23). Bu tip aşınma düz dişli çark mekanizmalarında en bariz hasar olarak kendini göstermektedir. Düz dişli çarklardan oluşan bu tip aşınmaya en fazla tesir eden faktörler temas eden diş yüzeyin sertliği, diş yüzey kaliteleri ve moment iletim sırasında diş yüzeyinde oluşan basınçtır (Şahin, 2001).



Şekil 23. (A) Adhesiv Aşınması (B) Düz Dişlide Dar Tolerans, Yüksek Hız ve Yüksek Basınç Nedeni İle Oluşan Adhesiv (Yenme) Aşınması

Yorulma (Piting) aşınması

Bu tip aşınma çalışma sırasında metal parçaların yüzeyinde küçük kırıkların oluşması ile başlar ve büyük malzeme kütlesi ana malzemeden kaybı ile sona erir. Yorulma aşınması dişli çarklar, rulmanlı yataklar ve kama mekanizmaları gibi birbiri ile sürekli temas halinde olan yüzeylerde en çok görülen aşınma türüdür. Bu tip aşınma kayma gerilmesi maksimum olduğu yüzeylerde plastik deformasyon ile başlar zamanla bu deformasyon yüzeye ilerleyerek yüzeylerde çukurlar olarak meydana gelir (Şekil 24) (Stolarski, 2000).



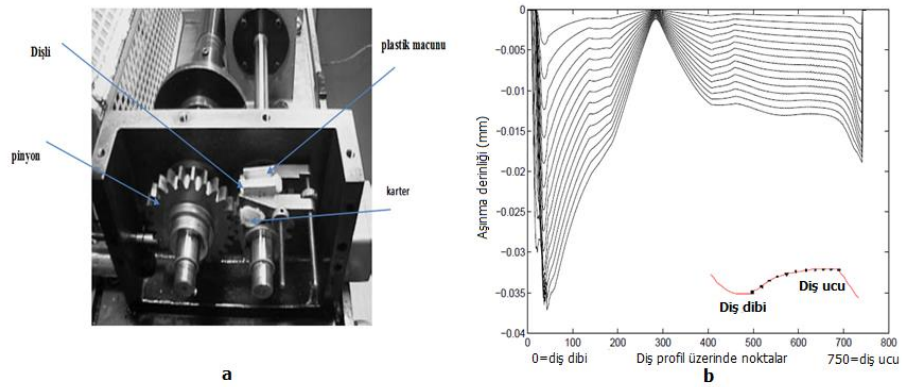
Şekil 24. Yorulma (Pitting) Aşınması (Varol, 2016)

YÖNTEM

Çalışmanın konusu, dişli çarklarda oluşan aşınma üzerine kaplamanın etkisinin incelemesidir. Bu kapsamda dişli çarklarda oluşan hasarı dişlinin diş yüzeyinde tanımlamak ve bu soruna çözüm aramaktır. Sunulan çözüm seçenekler arasında en uygun olanı yani dişlinin kaplama seçeneği tercih edilmiştir. Dişli çarklar PVD, CVD ve Plazma sprey yöntemi ile kaplanır (Yalçınkaya, Shaib, 2020). Kaplanacak malzemede MoS_2 (Molibden disülfür), WS_2 (Tungsten disülfür), WC/C (Tüngsten karbon karbür), BN (Bor nitrür), CrN (Krom nitrür) ve sayrı kaplama malzemeleri belirlemektedir (Liu, Zhu, Zhang, Wang, Song, 2016). Kaplanmış olan dişli çarklar FZG gibi dişli çarklar deney setlerinde belirli moment altında ve belirli süre içinde çalıştırmaktadır. Ardından dişli çarkları deney setinden çıkartarak hasar analizi yapılmaktadır.

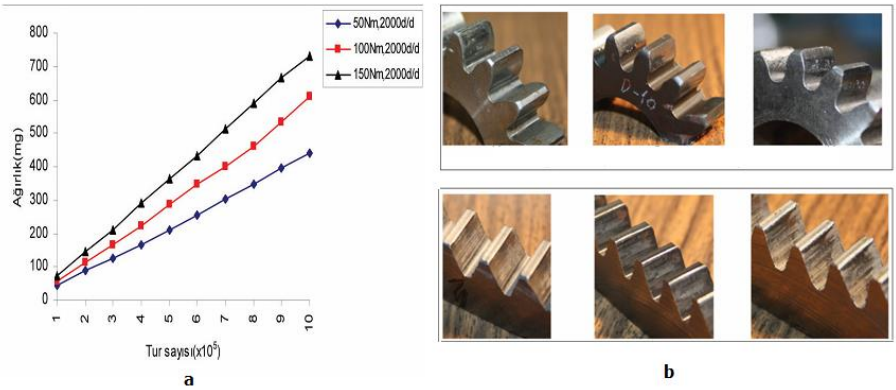
Dişli çarklarda hasar tespiti

Düz dişli çarkın diş yüzeylerinde oluşana hasarı belirleme doğrultusunda dişli çarklar FZG deney setlerinde 100Nm, 150Nm, ve 200Nm moment altında 10 bin, 20 bin, 30, bin, … 80 bin devir sayısı kadar çalıştırılır. Her on bin devirden sonra numune deney setinden çıkartılır ve aşınma muayene uygulaması altında alınır (Şekil 25).



Şekil 25. (A) FZG Deney Seti (B) Düz Dişlinin Diş Profilinde Aşınma Dağılımı

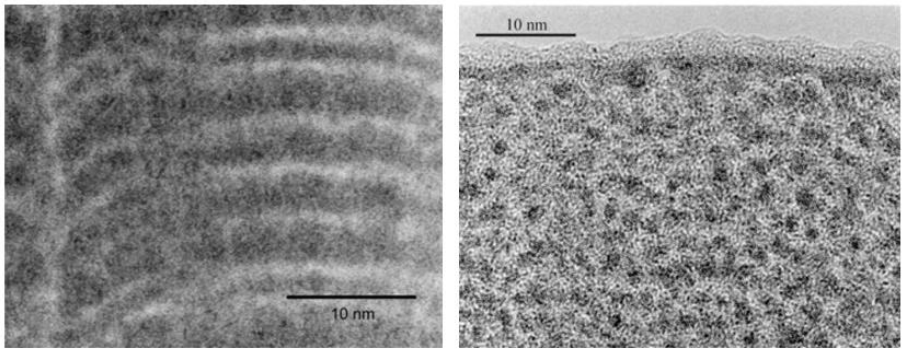
Şekil 25 gösteriyor ki düz dişlinin diş uçlarında ve diplerinde aşınma fazla meydana gelirken dişlinin taksimat bölgesinde hasra az meydana geliyor. Bu hasarları önlemek için düz dişli çarklar PVD, CVD veya Plazma sprey yöntemi ile kaplanır. Kaplamada kullanılan malzeme, dişli çarklar için MoS_2, WC/C, WS_2, CrN, BN dişlinin çalıştırma şartlarına göre tercih edilir (Shaib, Yalçınkaya, 2020). Kaplama işleminden sonra bu kaplamaların aşınma üzerinde etkisi inceleme kısmında ise tekrar dişli çarklar FZG deney setinde belirli yük altında ve belirli süre içinde çalıştırılır ardından gelişmiş mikroskoplarla dişlinin diş yüzeyinde oluşan hasarlar gözlemlenir ve tartı ile dişli çarklarda oluşan aşınma belirlenir. Tunaoğlu, Tuç, (2007) çalışmasında iç dişli çarklarda oluşan aşınmayı incelemişler. Çalışmalarında FZG (Forschungsstelle fur Zahnrader und Getriebebau) deney düzeneğini kurmuşlar. Çalışmalarında 1/1000 hassasiyetli terazi 2000/dak elektrik motoru kullandılar. Deneyde numuneleri 50Nm $1x10^5$ dönme 100Nm $1x10^5$ dönme 150Nm $1x10^5$ dönme, yük ve dönme altında çalıştırdılar. Vardıkları sonuçları Şekil 26'da gösterilmiştir.



Şekil 26. Dişli Çarklarda Oluşan Hasar ve Aşınma (A) Aşınma İletilen Yük ve Dönme Sayısına Doğrusal İlişkiyi Sahiptir (B) Oluşan Aşınma Dişlinin Diş Yüzeyinde Malzeme Kaybı Olarak Gözle Görünüyor

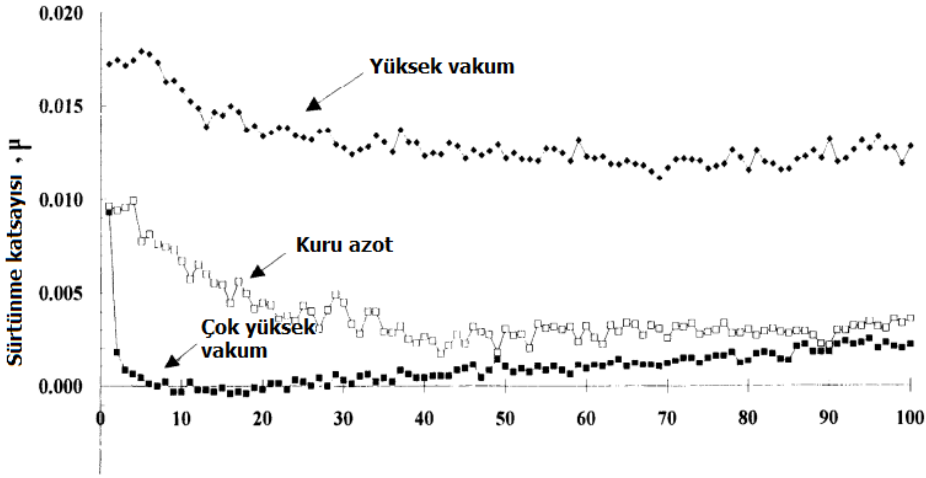
BULGULAR

Düz dişlilerin performansını ve çalışma ömrü artırmak doğrultusunda genellikle dişlilerde uygun kaplama malzemesi olarak MoS_2 (molibden disülfür), WS_2 (Tungsten disülfür), BN (Bor nitrür) ve WC/C (Tungsten karbon karbür), kullanılır (Martins, Moura, Seabra, 2006) kullanır. Strongdl,Carvalho, De Hosson, J Van, (2003) yılında düz dişli çarklarda oluşan aşınma üzerine WC/C kaplamayı incelemiştir. Çalışmanın sonucu olarak, WC kaplaması üzerine C (karbon) ekleyerek kaplamanın mekanik performansı yükseltilebilirliğini göstermiştir. Bu performansı dişlinin diş yüzeyinde pürüzlük değeri ölçülmemesine, sürtünme katsayısının belirlemesine ve yük aktarma kapasitesini belirlemesinde yetinmiştir (Şekil 27).



Şekil 27. WC ve WC/C SEM (Elektronik Tarama Mikroskop) Görüntüsü

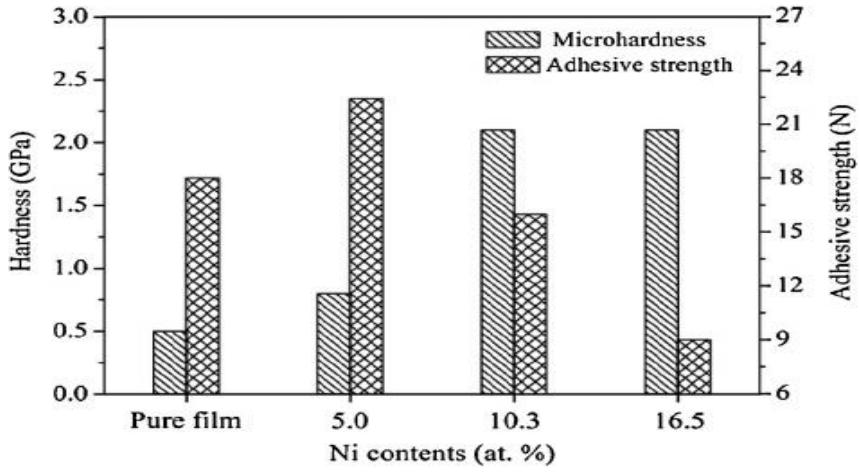
MoS_2 kaplama malzemesi ile kaplanmış düz dişli çalkar en çok Vakum, Kuru ve Düşük sıcaklığı sahip ortamlarda daha aşınma olayına etkilidir (Şekil 28). Nemli ortamlarda ve yüksek basınçlarda kaplamanın verimliliği azalmaktadır (Donnet, Mogne, Martin, 1993).



Şekil 28. Düz Dişli Çarklarda Mos2 Kaplamanın Farklı Ortamdaki Sürtünme Katsayıları

Molibden disülfür (MoS_2) en bilinen katı yağlayıcı kaplama malzemesidir ancak kuru ortamda ve düşük sertlikte yüzeye ihtiyaç duyulan yerlerde kullanılır (Hudec, Mikula, Satrapinsky, Roch, Truchli, Mikula, 2019). MoS_2'nin nemli ortamlarda aşınmaya karşı performansını yükseltme doğrultusunda MoS_2'ye Ti Dopant eklenmektedir (Scharf, Prasad, 2013 ve Hu, Bultman, Zbinski, 2006).

Xu, Gao, Hum, Sun, Jiang, Zhou, Lia, Weng, (2014) yılında düz dişli çarklarda oluşan aşınma üzerine WS_2 kaplamayı incelemiştir. Çalışmanın sonucu olarak, WS_2 kaplaması üzerine Ni ekleyerek kaplamanın mekanik performansı yükseltilebilirliğini göstermiştir (Şekil 29). Bu çalışmaya benzer Fominski, Grigorivets, Gnedovets, Romanov, (2012) saf kaplamanın mekanik özelliğini geliştirmek üzere Ni katkı malzemesi olarak kullanmışlar.



Şekil 29. Farklı Ni % Sini İçeren Kaplamanın Mikro Sertliği (Gpa) ve Yapışma Kuvveti (N) WS_2 Kaplaması Üzerine Etkisi (Xu, Gao, Hum, Sun, Jiang, Zhou, Lia, Weng, (2014)

TARTIŞMA

Dişli çarklar, literatürlerde ağırlıklı olarak MoS_2, WS_2, WC/C BN, … Kaplama malzemeleri ile kaplama yapıldığı görülmektedir. Yapılan çalışmalara göre, WC (Tungsten karbon) kaplamasında C (Karbon) eklemesi ile kaplama yüzeyin sürtünme kat sayısı düşürür ve kaplamanın sertlik özelliği daha yükseltir. WC (Tungsten karbon) kaplaması MoS_2 (Molibdenim disülfür) kaplamasına göre mekanik özelliği açıdan daha serttir. MoS_2 (Molibden disülfür) kaplamasında Ti (Titanyum) eklemesi ile nemli ortamında mekanik özelliği yükselmiş olur. MoS_2 (Molibden disülfür) daha kuru ve vakum ortamlarda aşınmaya karşı mukavemetlidir. Yük taşıma kapasitesi açıdan WC/C (Tungsten karbon karbür) MoS_2 (Molibden disülfür)'e göre daha büyük bir avantaja sahiptir. Tungsten karbon karbür Molibden disülfür'e göre daha düşük sürtünme katsayısına sahiptir. MoS_2 (Molibden Disülfür), fiyat açıdan ucuz ve pazarda daha kolay bulunabilirlik nedeniyle WS_2 (Tungsten Disülfür)'den daha popülerdir. WS_2 (Tungsten Disülfür) fiyatı, MoS_2 (Molibden Disülfür)'nin neredeyse 10 katıdır o yüzde WS_2 (Tungsten Disülfür) en çok NASA, askeri, havacılık ve otomotiv endüstrisi tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, dişli çarkın tanımı ve kullanım alanları, düz dişli çarklarda operasyon sürecinde meydana gelen aşınma türleri ve aşınma inceleme yöntemleri, düz dişli çarklarda aşınmaya uygun kaplama yöntemleri, düz dişli kaplamasına uygun kaplama malzemesinin çeşitleri verilmiştir. Çalışmada MoS_2, WC/C, WS_2 yüzey kaplı düz dişli çarkların yüzey aşınmasına yorulma davranışlarının etkileri konu ile ilgili yapılan deneyler ve uygulama çalışmaları incelendi. İncelenen çalışmalar dişli çark mekanizmalarının çalışma şartları altında maruz kaldıkları problemleri tespit edildi. Tespit edilen problemler için çözüm önerileri sunuldu. Bu çözüm önerilerinin karşılaştırmaları yapıldı.

KAYNAKÇA

Alsaran A., (2018), "Makine Elemanları II Ders Notları", T.C. Kars Kafkas Üniversitesi.

Donnet C., Mogne L., Martin M.J., (1993). "Super low friction of oxygen-free MoS2 coatings in ultrahigh vacuum", Surf Coat Technol; 62:406–411. Doi:10.1016/0257-8972(93)90275-S.

Erdem S., (2006) "Yüksek Karbon İçeriğine Sahip, Yüksek Kromlu, Manganli Ve Alaşımsız Düşük Karbonlu Çeliklerin Aşınma Davranışlarının Araştırılması", Fırat Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ/Türkiye.

Erkaya S. ve Ulus Ş., (2015). "Dişli Çark Mekanizmalarındaki Hataların Akustik Yöntemler ve Titreşim Metodu ile Karşılaştırmalı Analizi", Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu, İzmir, Türkiye.

Fetvacı M.C. ve İmrak C.E. (2007). "Evolvent Düz Dişli Çarklarda Diş Kökü Eğrilerinin İncelenmesi", Mühendis Makina • Cilt : 48 Sayı: 570.

Fominski, V.Yu. Grigorivets S.N. Gnedovets A.G. and Romanov R.I., (2012). "Pulsed laser deposition of composite Mo–Se–Ni–C coatings using standard and shadow mask configuration", Surface and Coatings Technology, volume: 206, Issue 24, pp. 5046-5054. Doi:10.1016/j.surfcoat.2012.06.004.

Hu, J.J., Bultman J.E., Zbinski J.S., (2006). "Microstructure and lubrication mechanism of multilayered MoS2/Sb2O3 thin films", Tribol. Lett. 21, 169–174. Doi:10.1007/s11249-006-9035-6.

Hudec T., Mikula M., Satrapinsky L., Roch T, Truchli M., and Mikula T.H., (2019). "Structure, mechanical and tribological properties of Mo-S-N

solid lubricant coating" National Centre for Advanced Tribology at Southampton, Faculty of Engineering and the Environment, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, United Kingdom. Doi:10.1016/j.apsusc.2019.03.294.

Kavaliauskiene L., Bendikiene R. and Ciuplys A., (2019). "Circular economy practice: From industrial metal waste to production of high wear resistant coatings", Department of Production Engineering, Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology, LT-51424, Kaunas, Lithuania. (pp. 1225-1232). Doi:10.1016/j.jclepro.2019.05.068.

Lewis M.J.T., (1993). "Gearing in the ancient world" Endeavour, New Series, Volume 17, No. 3. Doi:10.1016/0160-9327(93)90099-O.

Liu H., Zhu C., Zhang Y., Wang Z., and Song C., (2016). "Tribological Evaluation of a Coated Spur Gear Pair", State key laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing, 400044, China. Doi:10.1016/j.triboint.2016.03.014.

Martins R. C., Moura P.S. and Seabra J.O., (2006) "MoS2/Ti low-friction coating for gears", FEUP, Faculdade de Engenharia da Universidade do porto, Portugal. Doi:10.1016/j.triboint.2006.02.065.

Meyoshi K., (2001). "Solid Lubrication Fundamentals and applications" NASA Glenn Research Center, Cleveland New York. (pp. 383-391). Doi: 10.1201/9781420027068.

Napiorkowski J., Lemecha M. and Konat L., (2019)., "Forecasting the Wear of Operating Parts in an Abrasive Soil Mass Using the Holm-Archard Model" Chair of Vehicles and Machinery Exploitation, The Faculty of Technical Sciences, The University of Warmia and Mazury in Poland. Doi:10.3390/ma12132180.

Neville W., and Sachs P.E., (2014). "Gears – and How Their World is Changing"

Scharf, T.W., and Prasad V. S., (2013). "Solid lubricants: a review", Journal of materials science 48, 511–531. Doi:10.1007/s10853-012-7038-2.

Shaib A.G. ve Yalçınkaya S., (2020)., "A Mini Review on Investigation of The Influence of Ws2, Mos2 Surface Coating on Wear of Spur Gear", 6th International Congress on Engineering, Architecture and Design (17 – 18 December 2020)

Strongdl C., Carvalho N.M., De Hosson Th. M. and J van der kolk G., (2003), "Investigation on the formation of tungsten carbide in tungsten-containing

diamond like carbon coatings" Surface and Coatings Technology, Volume 162, Issues 2–3, Pages 288-293. Doi:10.1016/S0257-8972(02)00497-8.

Temiz V. (2005), "Dişli Çark Mekanizmaları", makine elemanlar 2 - dişli çarklar.

Tunaoğlu M. Ş. ve Tuç B., (2012) "İç dişli çarklarda aşınmanın deneysel olarak incelenmesi", Mühendislik ve Makine, Cilt:53 Sayı:632.

Varol T., (2016)., "Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği ölümü Laboratuar Föyü" Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi.

Xu S., Gao x., Hum M., Sun J., Jiang D., Zhou F., Lia W., and Weng L., (2014). "Nonostructued WS2-Ni Composite Films for İmproved Oxidation Resistance and Tribological Performance", Lanzhou institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Science, Lanshau 73000, PR, China. Doi:10.1016/j.apsusc.2013.09.024.

Yalçınkaya S., Shaib A.G., (2020)., "A Mini Review on Influence of WC/C, Mos2 Surface Coating on Wear and Fatigue Behavior of Spur Gear", 6th International Congress on Engineering, Architecture and Design (17 – 18 December 2020)

Can M., (2016). "100Cr6 Çeliğinden Burç İmalatında İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme Uygulaması ve Aşınma Davranışının İncelenmesi", (Yüksek Lisans Tezi), Balıkesir Üniversitesinin, Fen Bilimler Enstitüsü. Balıkkesir, Turkiye.

Kılıçay K. (2012) "AISI 1020 Çeliğinin Frezelenmesinde Katı Yağlayıcı Kullanımının Araştırılması" Konstrüksiyon-İmalat Bilim Dalında Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Koray Yalçın M. (2018) "Broş Kesici Takımların Dizaynı İçin Dişli Açma imülasyonu", (Yüksek lisans tezi), Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav yönetmeliğinin Makine Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü.

Yılmaz, H., (2017). "Atıkların Al 6061 Üzerindeki Aşındırma Davranışlarının İncelenmesi", (Yüksek Lisans Tezi), Bartın Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim dalı. Bartın, Türkiye.

Çakır M. C., (2006)., "Modern talaşlı imalatın esasları", Kitab, Dora Yayıncılık, 2. Baskı, S: 267.

Derek J. ve Solla P. (2014). "On the Origin of Clockwork, Perpetual Motion Devices, and the Compass" E-book, Contributions from he Museum of History and Technology: Paper 6.

Dudley D. W., (1954). "Practical Gear Design. İnternational Student Edition", Copyright by the McGraw-Hill Book Company İnc.(Page:1-15)

Norton, Robert L., (2004) "Design of Machinery: An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines", Book,3th edition McGraw-Hill Professional PP: 462.

Stolarski T.A. (2000)., Tribology in machine design" Book,

Şahin Y., (2001)., "Talaş kaldırma prensipleri 2", Kitap, Nobel Yayıncılık, 2, S: 490.

Tevrüz T. (2015). "Makina Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri Cilt 3" Çağlayan Kitabevi; Facsimile, Istanbul Turkey.

İNTERNET KAYNAKLARI

https://www.kaizen40.com/disli-cark-nedir-ve-cesitleri-neler-dir/#:~:text=Di%C5%9Fli%20%C3%A7arklar%2C%20binlerce%20y%C4%B1l%20%C3%B6nce,hareket%20aktar%C4%B1m%C4%B1%20gereken%20yerlerde%20kullan%C4%B1lmaktad%C4%B1r

https://www.federalgear.com/blog/a-short-history-of-gears-and-where-gear-manufacturing-is-today

http://www.antikythera-mechanism.gr/faq/general-questions/why-is-it-so-important

https://en.wikipedia.org/wiki/Gear#:~:text=Gears%20appear%20in%20works%20connected,(287%E2%80%93212%20BC)

https://www.makinaegitimi.com/disli-cark-terimleri-disli-cark-elemanlari/

https://teknikbilgisitesi.blogspot.com/2015/01/duz-disli-carklar.html

BÖLÜM 18
GEMİ GÖVDE SACLARINDA; SAW VE FCAW KAYNAK UYGULAMALARI VE ETKİLERİNİN FARKLI TEST YÖNTEMLERİYLE İNCELENMESİ

Serap ÖZHAN DOĞAN[1]*, Onur KOŞAR[2], Burak Galip ANIK[2]
Doktor Mühendis, Aktif Analiz Mühendislik Hizmetleri San. Ve Tic. Ltd. Şti., İstanbul/ TÜRKİYE
[2]Mühendis, Tersan Tersanecilik A.Ş Yalova/ TÜRKİYE.

Öz: Bu çalışma; gemi gövdelerini oluşturan mega blokları oluşturan blokların SAW ve FCAW kaynak yöntemleri ile birleştirilerek kaynak dikişlerinin; göz ile (görsel) muayene, radyografik muayene, çekme testi ve darbe-çentik testleri ile incelemeleri kapsamaktadır. Deneysel çalışmadaki amaç; en az hata oranı ile en hızlı metodu belirleyerek blokların kaynatılmasıdır. 60m'lik bir gemi gövdesinde yaklaşık 25-35 adet mega bloktan ve 45-60 adet bloktan oluşmaktadır. Bu çalışmada; gemi gövdesini oluşturmak üzere 1.2cm kalınlığında 1200cm boyunda 2200cm enindeki Grade A çelik sac bloklar kullanılmış olup tozaltı (SAW) ve gazaltı (FCAW) kaynağı uygulanmıştır. EN ISO 14171-A standart kapsamında tozaltı kaynağı uygulanarak; Tandem tel çapı 4mm ve ICE tel çapı 2.4mm, Tandem: 1100Amper, 35 Volt ve 80cm/min. ICE: 550 Amper 35 Volt %40 ICE parametreleri kullanılmıştır. EN ISO 14341-A standart kapsamında ise gazaltı kaynağı uygulayarak; 1.2mm tel çapı, 190 Amper, 25 Volt ve 46cm/min. parametreleri kullanılmıştır. Her kaynak uygulamasından 3 adet blok paneller ve toplamda 6 blok panel kullanılmıştır. Her bir kaynaklı birleştirmelerden alınan numunelerin; NDT testleri ile uygunluğu, çekme ve çentik-darbe testleri ile mekanik dayanımları, farklı iki metotta kullandığımız aynı kaynak ilerleme hızları ile oluşan hatalar incelenmiştir.

Test numunelerinde Ndt sonuçları incelendiğinde; SAW 1-A numunesinde birleşme noksanlığı (C) ve nüfuziyet yetersizliği (Db), SAW 1-B numunesinde nüfuziyet yetersizliği (Db) ve SAW1-C numunesinde ise birleşme noksanlığı (C) tespit edilmiştir. FCAW2-A numunesinde gözenek (porosity-Aa) ve yetersiz nu-

füzuyet (ack of fusion-C), FCAW2-B numunesinde grup gözenekler (group porosity-Ac) ve FCAW2-C numunesinde ise yetersiz nüfuziyet (ack of fusion-C) hataları saptanmıştır. Çekme test sonuçları incelendiğinde; toz altı kaynağı uygulanan SAW2-A numunesinin ve gazaltı kaynağı uygulanan FCAW1-B numunelerinin standart dışında, kaldığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda SAW2-A numunesinde elde edilen akma değerinin de standart kapsamında kaldığı tespit edilmiştir. Çentik Darbe test sonuçları incelendiğinde ise; tozaltı kaynağı uygulanan SAW2-C ve SAW3-B numuneleri standart kapsamı dışında kalmıştır. Gemi gövdesine ait bu büyük boyutlu panellerin birleştirilmesinde uygulanan iki yöntem değerlendirildiğinde; SAW yönteminin daha avantajlı olduğu kanıtlanmıştır. SAW metodu, montajdan kaynaklanan hataları tolere ederken, FCAW metodunda hatalara ve geri dönüşlere neden olur. Bu çalışmada; FCAW metodu ile birleştirme iki kez geçiş (tekrarlama) yapmak gerekmişken, SAW metodu ile birleştirme tek geçişte tamamlanmıştır. Yani, FCAW uygulaması tek seferde 12mm kalınlığı kaynatmakta başarılı olmamıştır ve ikinci kez tekrar uygulanması gerekmiştir. FCAW yönteminde tek seferlik uygulanması 26 dakikada gerçekleşirken, SAW yönteminde 17dakikada uygulama tamamlanmıştır.

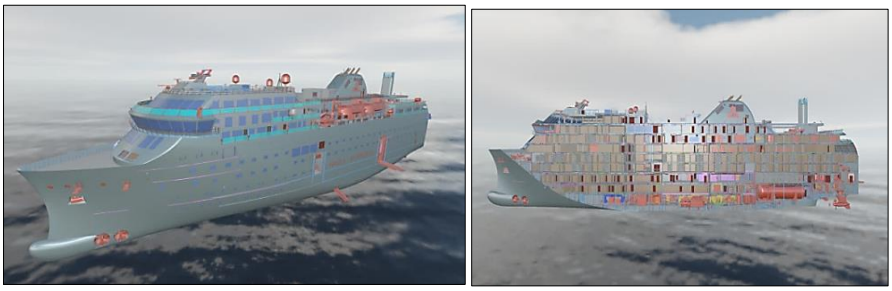
GİRİŞ

Dünya geneline bakıldığında; diğer üretim sanayilerine kıyasla gemi inşa sanayi kendi özelinde spesifik özellikler göstermektedir. Çok çeşitli mühendislik disiplinine ihtiyaç duyan bu sektörde, rekabetçi olabilmek için gerekli altyapı, teknolojik donanım, ekipman imkanları sağlamak önemli bir gerekliliktir. İlaveten tersanecilik sektörü, gerek meteryal gerekse teknolojik gelişmeleri takip edecek ve uygulayacak çeşitli teknik yeteneklere sahip personele ve de çok fazla çalışma saatine ihtiyaç duyulan bir süreçtir.

Ulusal ve uluslararası rekabet standartlarına kavuşulduğu taktirde tersanecilik sektörü; bulunduğu devletlere önemli derecede katma değer girdisi sağlayabilen aynı zamanda yan sanayileriyle birlikte çok geniş istihdam alanları yaratabilen ve uluslararası ticaretin güçlenmesine doğrudan etkisi olabilen bir yapıdadır. Dünya'da gemi inşa sektörü sürekli yükseliş gösteren yeni gemi inşa, gemi bakım/onarım ve dönüşüm faaliyetleri ile büyük ekonomik girdiler sağlayabilen stratejik bir sektördür.

Sanayi ve teknolojinin hızla ilerlediği geliştiği günümüzde, kaynak teknolojisi de büyük atılımlar göstermektedir. Daha kısa zamanda, daha uygun maliyette

ve daha kaliteli kaynak metodolojisi geliştirmek çabası içerisindedir. Daha evvel kas gücüne bağlı olarak faaliyet gösteren sektör, kaynak teknolojisinin gelişmesine bağlı olarak ve yeni metotların uygulanmasıyla birlikte son zamanlarda üretime büyük hız kazandırmıştır. Eski teknolojiye kıyasla yeni teknolojiyi kullanabilen tersaneler, eskiye nazaran üretim süreçlerini hızlandırarak çok daha kısa sürede gemiler inşa edilerek denize indirmektedirler. Şekil-1'de gemiyi oluşturan mega bloklara ait kesit ve üç boyutlu çizimleri paylaşılmıştır.



Şekil 1. Gemi 3D tasarımı ve kesit görünümü



Şekil 1. Gemi gövde mega blok inşası

Şekil-1 ve Şekil-2'de paylaşılan kesitlerde bir gemiyi oluşturan panellerin ve bunların blok sonrasında mega bloklara dönüşmesiyle devasal yapıların oluştuğu

görülmektedir. Devasal bu yapıların kaynaklı birleştirmeleri de oldukça zahmetli ve güçtür. Doğru kaynak metodu ile doğru parametreler kullanılması ve doğru uygulama yapılması son derece elzemdir. Bu sebepledir ki bilgi ve tecrübenin arandığı bir üretim alanıdır.

Gaz altı kaynağı; kaynak için istenen ısının, biten bir elektrot ile kaynak uygulanan malzeme arasında oluşan ark sayesinde ortaya çıkan kaynak metodudur. Kaynak uygulanan bölgeye devamlı şekilde besleyerek, masif haldeki tel elektrot ergiyerek tükendikçe kaynak metalini oluşturur. Elektrod atmosferin zararlı etkilerinden korunması gerekmektedir. Bu metot; kaynak banyosu, ark ve iş parçası üzerinde (kaynak alanında) sistemin torcundan gelen gaz veya karışım gazlar tarafından elektrodun korunması sağlanmaktadır. Gaz, kaynak bölgesini tam olarak korunamaması durumunda, kaynak bölgesinde birçok kaynak kusurlarının oluşmasına sebebiyet verir. Sonuç olarak hem kaynak bölgesinde hem de kaynak metalinde hataya sebep olur. FCAW metodu özlü kaynak ark kaynağıdır. Yani, çubuk elektrotun kullanım kısıtlarının üstesinden gelmek için örtülü çubuk elektrotla ark kaynağının geliştirilmiş halidir. MIG/ MAG metodunun bir varyantıdır. FCAW elektrot, içinde akı bulunan boru şeklinde bir teldir. Kaynak işlemi sırasında elektrot akısı erir ve koruyucu bir gaz ve bir sıvı akı üretir. Ark alanı koruyucu gaz ile kaplıdır. Kaynak havuzu, gaz ve cüruf ile atmosferden korunur. Kaynak havuzu ayrıca ekstra koruyucu gazlarla korunur. Çoğunlukla karbondioksit kullanılır. FCAW metodu, yarı otomatik veya otomatik olarak uygulanabilir. Elektrot ise, özünde dekapan[10] ve diğer katkı maddeleri (Deoksidanlar ve alaşım elementleri) içeren sürekli bir eriyen tüptür (Sharma, Rajput, Singh; 2020). Özlü tel elektrodun, solid tel elektroda kıyasla; uygulanabilen dolgu veriminin çok yüksek olması, öz maddesi sayesinde kaynak uygulama sırasında koruyucu bir ortam oluşturmaktadır. Bu metot ile kaynak uygulama hatalarına sebep olan sıçrama kayıplarının azaltılması, kaynak uygulama hızının yüksek olması ve derin nüfuziyetli kaynak elde edilebilmesi sebeplerinden dolayı kullanım alanları ve oranları gün geçtikçe artmaktadır. Aynı zamanda kaynakçıların uygulanan kaynak dikiş kalitesi üzerinde etkisini minimize etmek için günümüz teknolojilerinde otomatik

[10] Dekapan: Kaynak uygulama sırasında, kaynak bölgesi üzerinde oksitlerin ve diğer kirlenmelerin oluşmasını engelleyen hatta bunları çözerek uzaklaştırabilen etkin bir maddedir.

veya mekanize kaynak yöntemlerinden olan Toz altı kaynağı (SAW) ve Gazaltı kaynağı (FCAW) yaygın bir şekilde kullanımı başlamıştır.

Tozaltı Ark Kaynağı (SAW), arkın bir boşluklu granüler ve eriyebilir akı ile gizlendiği bir ark kaynağı işlemidir (Sharma, Rajput, Singh; 2020), (O'Brien; 1991),(Olson et all.; 1983). Bobin üzerinden gelen kaynak teli, motorun tahrik ettiği makaralar arasından ve bir meme arasından geçmektedir. Bu yöntemle; tel ve iş parçası arasında oluşan ark, başka bir kanaldan gelen toprak alkali metalleri içeren tozlarla ve slikat, atmosferin negatif etkilerinden korunmaktadır. Çevreye ışınım yansıtmadığından ve ark enerjisinin büyük bir kısmı direk olarak kaynaklı birleştirme için üretilmiş hale gelir. Ergime gücünün çok yüksek olması sebebiyle, yeterince nüfuziyet sağlayabilmesi sayesinde 15mm kalınlığındaki sacı dahi iki pasoda kaynatılması mümkün olabilmektedir. Sıçrama kusurlarının ve elektrot kayıplarının olmaması, kaynakçı faktörünün kaynak dikişi üzerinde etkisinin az olması ve uygulama sırasında koruyucu donanım gereksinim duyulmaması en önemli avantajlarından biridir.

Çelik malzemelerin sahip olduğu teknik özellikleri, kimyasal kompozisyon değerlerinin değiştirilmesi ile sağlanabilmektedir. Mesela; çeliğin çekme mukavemetini güçlendirmek için kompozisyondaki karbon oranını değiştirerek veya kimyasal kompozisyona manganez, krom, nikel gibi alaşım elementleri ilave edilerek değiştirilir. Genellikle; kompozisyondaki karbon element oranının artması çeliğin sertlik değerini yükseltmektedir. Gemi yapımı ve onarımında kullanılan çelik malzemenin fiyatı, fiziksel-kimyasal özellikleri ve piyasa da temin edebilme açısından en yaygın kullanımı olan "yumuşak çelik" malzemeleridir. Bu malzemeler, soğuk ve sıcak şekillendirilmeye ve kaynak uygulamalarına uygundur. İşleme sıcaklıklarında mekanik özelliklerinde önemli bir değişme gözlenmez. Ancak, sıcaklık çok düşürüldüğünde darbe sertliğini yitirir, kırılganlık özeliği kazanır ve yapısında kırılganlık zafiyeti oluşturabilir.

OLUŞAN KAYNAK HATALARI

Kaynak uygulamalarında oluşan kusurlar, alışıla gelmiş sebeplerden dolayı ortaya çıkabildiği gibi, görünmeyen ve karmaşık nedenlerden dolayı oluşabilmektedir. Bu durumda da sorunun sebebi gözden kaçmaktadır. Bazı durumlarda kaynak kusurları bir veya birden fazla nedenin bir araya gelmesiyle oluşuyor olabilir. Bu sebeple oluşan kaynak kusurlarının tek tek incelenmesi, olası nedenlerinin her

kaynak yöntemi için yine tek tek değerlendirilmesi gereklidir. Oluşan bazı kusurlar incelendiğinde;

Sıçrantı

Kaynak uygulamalarında; kaynak amperi veya ark boyu yüksek olabilmektedir. Bu sebeple kaynak öncesi uygun akım tercih edilmelidir ve ark boyu mesafesi kullanılan tel çapına göre ayarlanmalıdır. Bazı durumlarda, yetersiz gaz koruması sebebiyle bu tarz kusurlar yaşanabilmektedir. Yine böyle bir durum söz konusu olduğunda kullanılan gaz tipinin uygunluğu ve gaz debisi (gaz akış hızı) kontrol edilmelidir.

Çarpılma

Uygun olmayan kaynak sıraları, fazla miktarda ve çok ince kaynak dikişleri, kaynak birleştirme planında yanlışlık, kaynak malzemesinin iyi sabitlenememesi gibi durumlarda bu tip kusurlar meydana gelmektedir. Birleştirmeler mümkün olduğu kadar simetrik yapılmalıdır. Tasarıma uygun çaplı elektrot tercih edilmelidir. Kaynatılan malzemenin yapısı öngörülmüş olan çekme payını karşılayacak biçimde birleştirilmeli ve kaynak uygulama açısı bu doğrultuda tasarlamalıdır. Kaynak yapılan malzemenin doğru sabitlenmesi gerekmektedir. Kaynak uygulaması öncesi gerekli tedbirler alınmalıdır.

Ark Üflemesi

Manyetik etkilerin sonucu olarak manyetik sapmalar yaşanabilmektedir. Bu sebeple sabitleme parça bağlantısından yeterli mesafede kaynak uygulaması yapılmalıdır. Ayrıca sabitleme parçalarının ikiye ayırarak iş parçasının her iki tarafına bağlanayarak kaynak gerçekleştirilmelidir. İlaveten ark mesafesi olabildiğince kısa tutulmalıdır.

Tutuşturma Zorlukları

Kaynak amper değeri düşük olduğunda veya şase bağlantısı düzgün bir şekilde sabitlenmediği durumlarda bu tip kusurla karşılaşılabilmektedir. Aynı zamanda, kaplamanın düzgün olup olmadığı veya tutuşturma ucunun açık olup olmadığı bilinmelidir.

Gözenek

Nemlemiş sarf malzemeleri, su sızıntısı olan bir torç, rutubet içeren bir koruma gazı gibi durumlarda bu tip kusurlar görülebilir. Ana malzemelerden de kaynaklı olabileceğinden her türlü kirliliğin olmaması gerekmektedir. İş parçasına uygulanacak yönteme uygun gazı tercih edilmeli, seçilen gaz nozulları tıkanık ve kirli olmalıdır. Gaz debisi; seçilen tel çapına ve uygulama bölgesinin büyüklüğüne göre dikkat edilerek belirlenmelidir.

Yanma

Parametrelerin (voltajın) yüksek olması, ark boyunun yüksek olması, hatalı torç veya elektrot açısının olması veya kaynak hızının yavaş olması durumlarda bu tip kusurlarla karşılaşılmaktadır.

Çatlaklar

Kaynak uygulamanın biranda bitirilmesi ile yani kaynak banyosunun ani terk edildiği durumlarda bu kusurlarla karşılaşılır. Bu sebeple, katılaşma büzülmesinin sebep olmasıyla oluşan boşluktan dolayı çatlak kusurları oluşabilmektedir. Kaynak uygulama işlemi sonlandırılırken 2-5mm kadar geri dönülerek oluşan krater bölgesi hafifçe kapatılmalıdır. Kök paso işlemlerinde ise, kaynak sonunda ark banyosu plakanın yanına hızlıca geçilerek prosesin sonlandırılması gerekir.

Yetersiz Ergime

Isı girdisinin düşük kaldığı, kaynak ağzının yanlış belirlenmiş olduğu, kaynak dikişlerinin uygun olmayan şekilde sıralanması gibi durumlarda bu tip hata ile karşılaşılabilir.

KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERDE EN ÇOK UYGULANAN TEST METOTLARI

Kaynaklı imalatta her ürünün aynı kalitede üretilmesi ve kalite kontrolünün sağlanması oldukça önemlidir ve titizlik isteyen bir husustur. Bu doğrulamaların yapılması tahribatlı ve tahribatsız test güvenilirliği kaynak kalitesini direk etkilemektedir.

Kaynaklı Birleştirilen Numunelere Uygulanan bazı tahribatlı testler şunlardır;

Çekme Testleri

Çekme testi; kaynaklı uygulanan bölgeye ait mukavemet değerlerinin, ana malzemenin mukavemet değeri ile karşılaştırmak ve de aralarında oluşan ilişkiyi tanımlamak için uygulanmaktadır (TSE EN ISO 4136:2012). Yapılan çekme testi neticesinde, numunenin kopmadan dayanabileceği maksimum yük, çekme ve akma dayanımı, yüzde uzama nitelikleri tespit edilebilir.

Eğme Testleri

Eğme testi yapılarak; alın kaynaklarında süneklik ve kaynak-ana malzeme arasındaki süreksizlikleri tespit etmek için kullanılmaktadır (TS EN ISO 5173:2010). Bu test metodunun sağladı katkı; birleşim bölgesindeki gözenek, ergime noksanlığı, çatlak gibi oluşan kusurları meydana çıkarmayı sağlar.

Mikro ve Makro Kesit Testleri

Makro kesit incelemesi; kaynakla birleştirmeden alınan örnek kesitin maksimum on kat büyütülerek incelenmesidir. Makro test yöntemi incelemesi ile köşe kaynaklarında görülen boğaz yüksekliği, efektif boğaz yüksekliği, alın ve köşe kaynaklarında görülen nüfuziyet yetersilikleri, süreksizlikler (gözenek, çatlak, ergime noksanlıkları gibi) belirlenebilmektedir.

Mikro kesit incelemesi, kaynaklı birleştirmeden alınan örnek kesitin on kattan fazla büyülterek incelenmesi yöntemidir. Bu test yöntemi ile tane yapısı, tane boyut miktarı, uygulanan kaynak sonucu oluşan faz değişimleri ve mikron boyutundaki çatlaklar tespit edilebilir.

Sertlik Testleri

Sertlik test uygulama amacı, kaynak öncesi ve kaynak sonrası sertlik değişimini tespit edebilmek için kullanılır.

Darbe-Çentik Testleri

Çentik darbe testi; kaynak ile birleştirilen bölgenin belirli sıcaklık altındaki darbe dayanımını tespit etmek kullanılır. Dönüşümlü malzemelerde; düşük sıcaklıklar kırılganlık etkisi göstermektedir. Bu sebeple kaynak ile birleştirilen bölgenin, kullanılacağı sıcaklığa göre belirli bir tokluk değerini vermesi istenmektedir.

Tahribatsız muayene yöntemi ile testi gerçekleştirilen malzemenin, materyal yüzeyinde veya yüzey altında oluşan süreksizlikler, hücresel boşluklar ve kusurlar kolaylıkla saptanabilmektedir. Tahribatsız muayene yöntemleri, oluşan kusur ve hata tespitlerinin dışında, dışarıdan incelenemeyen kapalı bir malzemenin de muayenesinin gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Kaynaklı Birleştirilen Numunelere Uygulanan bazı tahribatsız testler şunlardır;

Ultrasonik Testler

Kaynak bölgesindeki gözenek, çatlak, ergime noksanlıkları gibi kusurları tespit edebilmek için ultrasonik muayene metodu kullanılır. Prob tarafından üretilen yüksek frekanstaki ses dalgalarının test malzemesi içerisinde yayılırken oluşan bir kusura çarptıktan sonra tekrar proba yansıması ve böylece prob tarafından algılanması esasına dayanmaktadır. Ultrasonik muayene yöntemi; metalik veya metalik olmayan malzemelerde beklenen hacimsel hatalar ile çatlak türü yüzey hatalarının tespitinde kullanılmaktadır.

Radyografik Testler

Radyografik testler; yüksek enerjili elektromanyetik dalgalar birçok malzemeye etkilemektedir. Belirli bir malzeme hacmine etki eden ışınım malzemenin karşı tarafına iliştirilmiş olan ışımaya duyarlı filmleri de etkilemektedir. Etkilenen filmler banyo yapılırken ışınımın içinden geçtiği malzemenin içyapı görüntüsü filmde görülür. Radyografik testinin kısıtları; test yapılacak parçanın kalınlığının yanı sıra, kullanılacak ışınım kaynağının cinsine bağlıdır. Uygulanacak ışınım miktarı belirli sınırları aşmamalıdır. Standartlarda farklı ışınım cinsleri için kullanılabilecek parça kalınlıkları ve uygulama miktar aralıkları sunulmuştur. Bu test metodunda malzeme cinsinden çok uygulanacak malzemenin kalınlığı önemlidir.

Manyetik Parçacık Testleri

Bu test metodu; kaynak bölgesindeki yüzeyde oluşan kusurların tespiti için kullanılmaktadır. Kusurların göz ile görünüyor yani yüzeyde açık olması şartı aranmamaktadır. Basit, etkili bir yöntem olmasına ilaveten çabuk bir metot olması uygulanabilirliği konusunda önemli bir etken olmaktadır. Test yüzeyine bir manyetik akı uygulanması durumunda yüzeyde yer alan gözenek, çatlak, ergime noksanlıkları gibi kusurlar; yüzeydeki konumlanan durumundan kaçak akı oluşturarak tespit sağlanır. Manyetik Parçacıkla Test, uygulanan yüzeye demir manyetik

tozlar serpilir ise, bu tozlar kaçak akılar tarafında çekilerek oluşan kusurlar üzerine birikir. Böylece bu yöntemi ile kusurların yerleri belirlenebilir.

DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışma kapsamında gemi gövdelerini oluşturan blokların mega bloklara (büyük ebatlı çelik saclara) dönüştürürken FCAW (Flux cored arc welding) ve SAW (Submerged arc welding) kaynaklı birleştirme metodu kullanılarak, sonuçlar kıyaslanmıştır. Buna bağlı olarak çıkan hatalar ve etkileri incelenmiştir.

Gemilerin yapımında; büyük bir kısmının Grade-A kalitede sac kullanılmaktadır. Bu çalışmada; kaynak yapılacak panellere ait kimyasal analiz sonuçları Tablo-1'de paylaşılmıştır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan çelik sacın kompozisyon değerleri

Grade A	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Fe
(Ship Plate)	0,153	0,183	0,696	0,019	0,011	0,24	0,005	0,8	0,026	0,052	Kalan

Tozaltı metodu (SAW) ile birleştirilirken kullanılan kaynak tozuna ve 4 mm çaplı telin kimyasal kompozisyon değerleri ve Tablo 2 ve Tablo 3'te paylaşılmıştır.

Tablo 2. Kaynak tozun kimyasal bileşim değerleri

Material	C	Si	Mn
ELIFLUX BFB	0.07	0.35	1.50

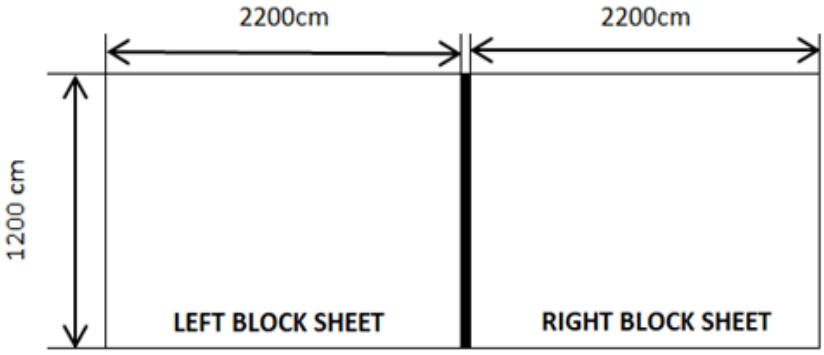
Tablo 3. Kaynak telinin kompozisyon değerleri

Material	C	Si	Mn	Cu
GEKA S2	0.12	0.10	1.0	<0.30*

* Copper plated

Deney Çalışma Numunelerinin Hazırlanması

12cm kalınlık, 1200cm boy ve 2200cm ende bulunan yüksek ebatlara sahip 12 adet blok sacların kaynaklı birleştirilmesi yapılmıştır. SAW metodu için 6 adet ve FCAW metodu için ise yine 6 adet blok sac malzeme bu çalışmada kullanılmıştır. Her iki bloğun kaynaklı birleştirilmesiyle 3 SAW metodu ve 3 de FCAW metodu ile toplamda ise 6 adet mega blok elde edilmektedir.



Şekil 2. Birleştirilen blokların ölçüleri

Her iki metod uygulaması için (her deneysel koşul için) 6 mega blok oluşturuldu. Kodlar, her birinin test takibi açısından numunelere verilmiştir. Verilen bu koslar aşağıda Tablo-5'te paylaşılmıştır.

Tablo 4. Deney numunelerine verilen kodlar

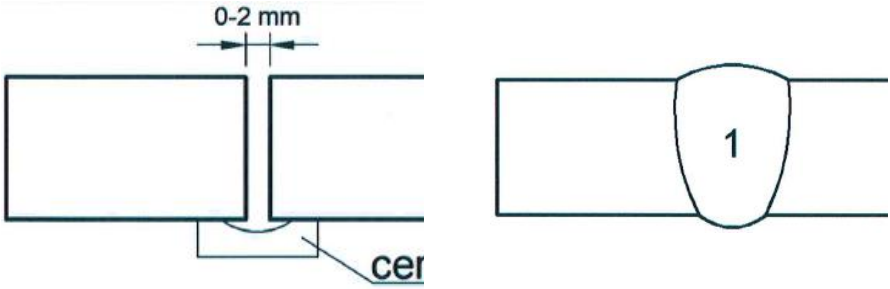
SAMPLE CODES					
SAW Group			FCAW Group		
SAW 1-Right and Left	SAW 2-Right and Left	SAW 3-Right and Left	FCAW 1-Right and Left	FCAW 2-Right and Left	FCAW3 -Right and Left

KAYNAK UYGULAMASI

SAW Metodu Uygulaması

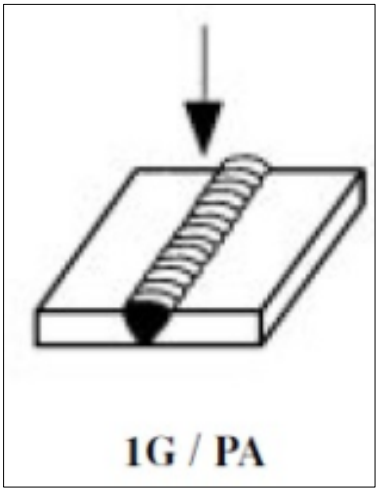
CNC' de 1200cm boyunda 2200cm eninde kesilmiş olarak gelen paneller tozaltı kaynağı yapılacak yere getirilmiştir. Kaynak yapılacak yerde; öncelikle CNC kesimden kaynaklı oluşan çapaklar temizlenmiştir ve temizleme işlemi bittikten

sonra iki panel aralarında 0-2mm arasında boşluk gelecek şekilde seramik altlık kullanılarak montajlama işlemi yapılmıştır.



Şekil 3. SAW metodu uygulama öncesi panellerin yerleşim şekli

Montaj aşaması bittikten sonra tozaltı kaynak makinasında parametreler hazırlanarak kaynak işlemine uygulanmıştır. EN ISO 14171-A standart kapsamında tozaltı kaynağı uygulanmıştır. Tandem tel çapı 4mm ve ICE tel çapı 2.4mm, Tandem: 1100Amper, 35 Volt ve 80cm/min. ICE: 550 Amper 35 Volt %40 ICE parametreleri kullanılmıştır. Kaynak PA pozisyonunda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. EN 26947 standart gereği PA kaynak pozisyonu

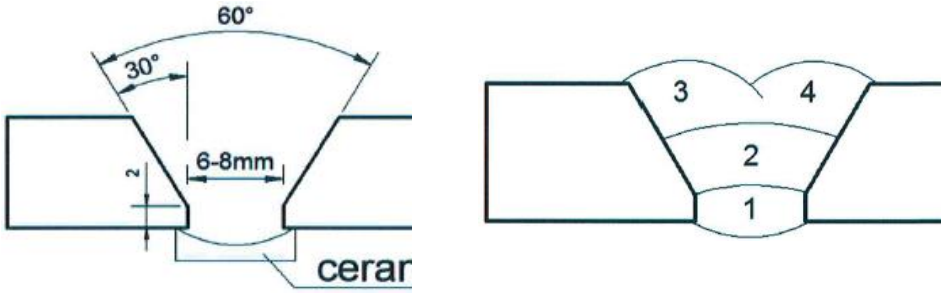
Kaynak panelin 15cm dışından başlatılmış ve panelin 15cm dışında bitirilmiştir. Bunun sebebi ise, ilk başlama ve kaynağı durdurma esnasında oluşacak kaynak hatalarının iş parçasının dışında olması içindir.



Şekil 5. SAW parametrelerinin ayarlanması

2.2.2. FCAW Metodu Uygulaması

CNC'de 1200cm boyunda 2200cm eninde kesilmiş olarak gelen paneller gazaltı kaynağı yapılacak yere getirilmiştir. Kaynak yapılacak yerde; SAW uygulamasında olduğu gibi öncelikle, CNC kesimden kaynaklı oluşan çapaklar temizlenmiştir ve temizleme işlemi bittikten sonra iki panel aralarında 6-8mm arasında boşluk gelecek şekilde seramik altlık kullanılarak montajlama işlemi yapılmıştır.



Şekil 6. FCAW metodu uygulama öncesi panellerin yerleşim şekli

EN ISO 14341-A standardı kapsamında FCAW uygulanmıştır (ISO 14341:2010). 1.2mm tel çapı, 190 Amper, 25 Volt ve 46cm/min. Parametreleri kullanılmıştır. Kaynak yine PA pozisyonunda gerçekleştirilmiştir.

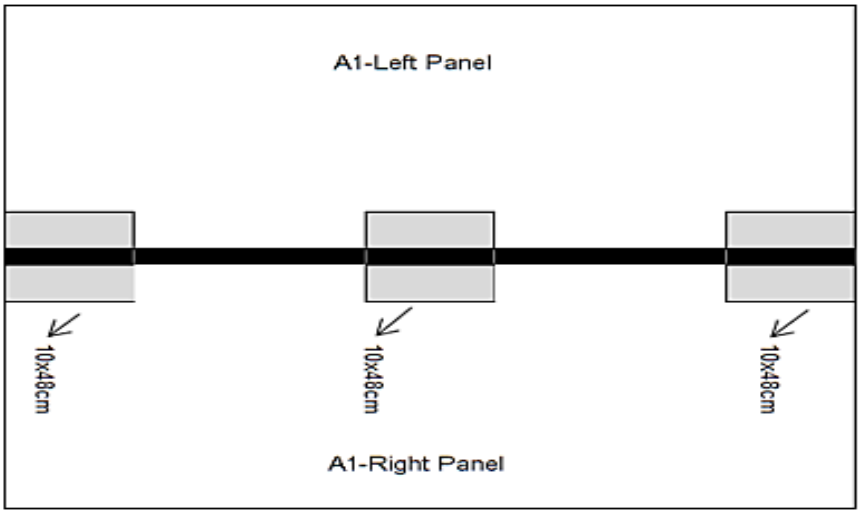
KAYNAK SONRASI UYGULANAN TESTLER

Göz İle Muayene

Optik bir yardımcı kullanılmadan, süreksizlikler ve yapısal kusurlar gibi kaliteyi etkileyen herhangi bir sonucun olup olmadığını görmek için göz muayeneleri yapılmıştır.

Radyografik Muayene

Tersanelerde tercih edilen ve kaynak kusurlarının tespitinde son derece güvenilir bulunan yaygın bir metot olması sebebiyle bu çalışmada kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında; geminin gövdesine ait mega panellerin kaynak dikişleri radografik bir inceleme ile test edilmiştir. Radyografik Test için panelin baş-orta ve uç kısımlarından 10x48 cm boyutunda kesitler alınarak her mega blok üzerinde radyografik testler gerçekleştirilmiştir. Her mega panelde test edilecek bölümler Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 7. Kaynak birleşim üzerinden 10x48cm'lik alınan test kontrol parçaları

Her mega panelin 3 test bölümü (baş-orta ve son) olduğu için; deney sonuçlarının karışmaması için yine, her bir test kontrol parçasına kodlar verilmiştir. Bu ek kodlama aşağıdaki Tablo 7'de gösterilmektedir.

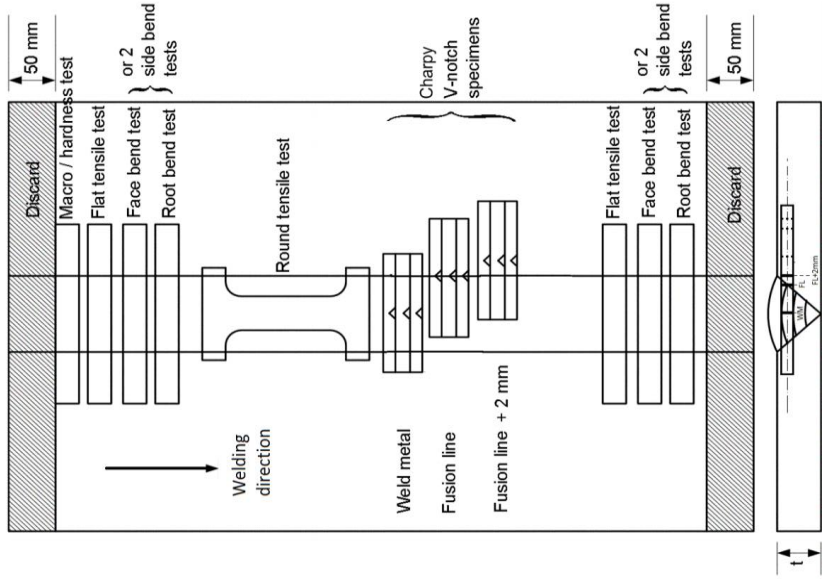
Tablo 5. Test kontrol parçalarına verilen kodlar

SAMPLE CODES					
SAW Group			FCAW Group		
SAW1-A	SAW2-A	SAW3-A	FCAW1-A	FCAW2-A	FCAW3-A
SAW1-B	SAW2-B	SAW3-B	FCAW1-B	FCAW2-B	FCAW3-B
SAW1-C	SAW2-C	SAW3-C	FCAW1-C	FCAW2-C	FCAW3-C

Her test parçası, radyasyon kaynağından gelen bir radyasyon ışınıyla (Se75 Gamma) ışınlanır. Radyasyon malzemenin içinden geçtikten sonra parçanın arka yüzeyine yerleştirilen filme ulaşır. Kaynak kusurları, radyasyonu farklı şekilde emdiğinden kusurların meydana geldiği kısımlarda oluşan radyasyonun şiddeti, filmde farklı koyulaşmalar yaratır. Filmin geliştirilmesinden sonra, film üzerindeki bu koyulaşma, hatanın radyasyon göstergesini sağlayacaktır. Buradaki amaç, radyografik test yöntemi ile görsel muayeneden kaçan kaynak hatalarını tespit etmektir.

Uygulanan Mekanik Testler

Çalışma kapsamında her mega blok için; .çentik darbe testi ve çekme testleri yapılmıştır. Test koşulları TS EN ISO 4136 ve TS EN ISO 9016 standartlarına uygun olarak oluşturulmuş ve aşağıda Şekil-5'te paylaşıldığı gibi kaynak yapılan bölgeden çekme test numuneleri alınmıştır.



Şekil 8. Kaynak dikiş hizasından alınarak, çekme ve darbe-çentik testi numuneleri hazırlama koşulları (Türk Loydu;2018)

Çekme Testleri

Bu test, yük altında kaynaklı bağlantıların mukavemet özelliklerini belirlemek için yapılmıştır. TS EN ISO 4136 standardına göre hazırlanan numuneler çekme cihazına bağlanarak 171kN kuvvetli çeneler yardımı ile çekildi; verim ve çekme dayanımı ölçüldü.

Çentikli Darbe Testi

Kaynak bölgesi; Bu test sünek ve kırılgan davranışı belirlemek için yapılmıştır. Malzemelerin kırılma enerjileri sıcaklığa göre değişir. Sıcaklık düştükçe kırılma enerjisi azalır. Test numuneleri TS EN ISO 9016 kapsamına göre oluşturulmuştur. Hazırlanan örnekler Şekil 7'de paylaşılmıştır.



Figure 10. Çentik-Darbe Testi için alınan örnek Parçaların görüntüsü

Kaynak Uygulama Süresi

Her iki kaynak metodunda; her bir test numunesi için kaynak uygulama süreleri tutulmuştur. Böylelikle hangi kaynak çeşidinde karşılaşılan hataların yanı sıra uygulama süreleri hakkında bilgiler edilmek istenmiştir. Çünkü bu sayede; çok büyük ebatlara sahip bu panellerin birleştirilmesinde en iyi uygulamanın ortaya çıkmasını destekleyecek olmasıdır.

TEST SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Göz İle Muayene

Gazaltı kaynak (FCAW) yöntemi ile 12mm kalınlığa uygulama ilk seferde başarıya ulaşamamıştır. Bu sebeple ikinci kez tekrarlanmıştır. Tozaltı kaynak

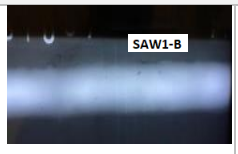
(SAW) yönteminde ise ilk seferde 12mm kaynatmak (birleştirmek) mümkün olmuştur.

Tozaltı kaynağı ve gazaltı kaynağı uygulamasında kusurlu kısımlar olduğu görülmüştür. Bu kusurlu numunelere bakıldığında; kusur sebebinin yetersiz nufuziyetten kaynaklandığı tespit edilmiştir. Daha detaylı sonuçlar radyografik testlerde daha da netleşmiştir.

Radyografik Test

Tozaltı kaynağı uygulama sonrası, numunelerin radyografik test sonuçlardan elde edilen filmler aşağıda Şekil-11'de paylaşılmıştır.

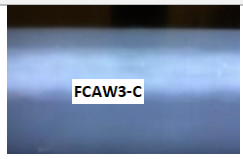
SAW METODU İLE BİRLEŞTİRİLEN BLOKLARA AİT RADYOGRAFİK TEST SONUÇLARI

Numune Kodları	**Resimler**		
SAW-1			
SAW-2			
SAW-3			

Şekil 9. SAW yöntemiyle birleştirilen panel numunelerine ait radyografik test sonuçları

Sonuçlar incelendiğinde; SAW1-A numunesinde birleşme noksanlığı ve yetersiz nufizuyet (ack of fusion-C and incomplate-D), SAW1-B numunesinde yetersiz nufüzuyet (incomplete-Db) ve SAW1-C numunesinde ise birleşme noksanlığı (ack of fusion-C) hataları saptanmıştır.

Gazaltı kaynağı uygulama sonrası, numunelerin radyografik test sonuçlardan elde edilen filmler aşağıda Şekil-12'de paylaşılmıştır.

FCAW METODU İLE BİRLEŞTİRİLEN BLOKLARA AİT RADYOGRAFİK TEST SONUÇLARI			
Numune Kodları	**Resimler**		
FCAW-1			
FCAW-2			
FCAW-3			

Şekil 10. FCAW yöntemiyle birleştirilen panel numunelerine ait radyografik test sonuçları

FCAW metodu ile birleştirilen test numunelerinin radyografik sonuçları incelendiğinde; FCAW2-A numunesinde gözenek (porosity-Aa) ve yetersiz nufüzuyet (ack of fusion-C), FCAW2-B numunesinde grup gözenekler (group porosity-Ac) ve FCAW2-**C** numunesinde ise yetersiz nüfuziyet (ack of fusion-C) hataları saptanmıştır.

MEKANİK TEST SONUÇLARI

Çekme Test Sonuçları

Yukarıda radyografik sonuçlarında SAW1-A, SAW1-B ve SAW1-C numunelerinde hatalar tespit edilmesi sebebiyle, bu hatalı numunelere çekme testi uygulanmamıştır. Diğer 6 test numunesine uygulanan çekme deney test sonuçları ve akma değer sonuçları aşağıda Tablo 6'da paylaşılmıştır.

Tablo 6. SAW grubuna ait çekme test sonuçları

ÇEKME TEST SONUÇLARI					
Test Numune Kodları	**Ölçü**	**Alan (mm^2)**	**Test Yükü-Fr (N)**	**Akma Dayanımı (MPa)**	**Çekme Dayanımı (MPa)**
SAW 2-A	12X25	299,15	171 kN	340	477
SAW 2-B		298,52		390	572
SAW 2-C		297,3		393	546
SAW 3-A	12X25	298,5	171 kN	395	547
SAW 3-B		298,57		390	560
SAW 3-C		299,65		388	561

Akma dayanımı standart gereği minimum 355N/mm^2 olma şartı ile sonuçlar incelendiğinde; sadece SAW2-A numunesinin standart kapsamı dışında kaldığı tespit edilmiştir. Çekme testi için standart gereği 490-630N/mm^2 aralığında olması şartı ile sonuçlar incelendiğinde; yine sadece SAW2-A numunesinin kapsam dışında kaldığı tespit edilmiştir.

Yine radyografik sonuçlarında FCAW2-A, FCAW1-B ve FCAW1-C numunelerinde hatalar tespit edilmesi sebebiyle, bu hatalı numunelere çekme testi uygulanmamıştır. Diğer 6 test numunesine uygulanan çekme deney test sonuçları ve akma değer sonuçları aşağıda Tablo 7'da paylaşılmıştır.

Table 7. FCAW grubuna ait çekme test sonuçları

ÇEKME TEST SONUÇLARI					
Test Numune Kodları	**Ölçü**	**Alan (mm^2)**	**Test Yükü-Fr (N)**	**Akma Dayanımı (MPa)**	**Çekme Dayanımı (MPa)**
FCAW 1-A	12X25	298,18	171 kN	358	572
FCAW 1-B		299,88		363	471
FCAW 1-C		299,51		365	581
FCAW 3-A	12X25	299,62	171 kN	364	522
FCAW 3-B		298,77		367	532
FCAW 3-C		299,85		362	578

Akma dayanımı minimum 355N/mm^2 olma şartı ile sonuçlar incelendiğinde; tüm numunelerin standart kapsamı içinde olduğu tespit edilmiştir. Çekme testi için standart gereği 490-630N/mm^2 aralığında olması şartı ile sonuçlar incelendiğinde; sadece FCAW1-B numunesinin kapsam dışında kaldığı tespit edilmiştir ve diğer 5 numune standart dâhilinde değerler elde edilmiştir.

Darbe-Çentik Test Sonuçları

SAW ve FCAW metotları ile birleştirilen test numunelerinde radyografik testten geçemeyen hatalı numunelere darbe-çentik testleri uygulanmamıştır. Fakat çekme testi sonuçları hatalı olanlara numunelere darbe-çentik testi yapılmıştır. Test sonuçları aşağıda Tablo 8 ve Tablo 9'da paylaşılmıştır.

Tablo 8. SAW grubu için uygulanan darbe-çentik test sonuçları

DARBE ÇENTİK TEST SONUÇLARI						
Numune Kodu	**Test Sıcaklığı**	**Çentik Yeri**	**Sonuç 1 (J)**	**Sonuç 1 (J)**	**Sonuç 1 (J)**	**Ortalama (J)**
SAW 2-A	0 ºC	Weld Metal	47	64	35	49
		Fusion Line	110	48	123	94
		Fusion Line + 2mm	170	172	166	169
SAW2-B	0 ºC	Weld Metal	44	37	41	41
		Fusion Line	72	64	65	67
		Fusion Line + 2mm	98	97	132	109
SAW 2-C	0 ºC	Weld Metal	30	32	41	34
		Fusion Line	50	57	68	58
		Fusion Line + 2mm	120	121	118	120
SAW 3-A	0 ºC	Weld Metal	47	45	49	47
		Fusion Line	118	120	117	118
		Fusion Line + 2mm	175	178	181	178
SAW 3-B	0 ºC	Weld Metal	28	30	32	30
		Fusion Line	108	105	107	107
		Fusion Line + 2mm	110	117	115	114
SAW 3-C	0 ºC	Weld Metal	40	41	41	41
		Fusion Line	130	134	135	133
		Fusion Line + 2mm	166	170	175	170

Standart kapsamına girebilmesi için değerlerin 34Joules değerinin altında olması gerekmektedir. Tablo 8'de paylaşılan sonuçlar incelendiğinde; SAW2-B ve SAW3-B numunelerinin standart kapsamında olmadığı tespit edilmiştir.

Tablo 9. FCAW grubu için uygulanan darbe-çentik test sonuçları

DARBE ÇENTİK TEST SONUÇLARI						
Numune Kodu	**Test Sıcaklığı**	**Çentik Yeri**	**Sonuç 1 (J)**	**Sonuç 1 (J)**	**Sonuç 1 (J)**	**Ortalama (J)**
FCAW 1-A	0 ºC	Weld Metal	43	38	35	39
		Fusion Line	63	58	52	58
		Fusion Line + 2mm	101	103	105	103
FCAW 1-B	0 ºC	Weld Metal	55	47	58	53
		Fusion Line	70	71	68	70
		Fusion Line + 2mm	98	100	97	98
FCAW 1-C	0 ºC	Weld Metal	38	40	39	39
		Fusion Line	88	90	95	91
		Fusion Line + 2mm	128	135	141	135
FCAW 3-A	0 ºC	Weld Metal	40	36	38	38
		Fusion Line	100	105	107	104
		Fusion Line + 2mm	120	122	119	120
FCAW 3-B	0 ºC	Weld Metal	40	47	38	42
		Fusion Line	130	132	130	131
		Fusion Line + 2mm	140	142	147	143
FCAW 3-C	0 ºC	Weld Metal	40	47	45	44
		Fusion Line	100	97	98	98
		Fusion Line + 2mm	127	120	131	126

Tablo 9 incelendiğinde; tüm numunelerinin standart kapsamında (34Joule üzerinde) olduğu tespit edilmiştir.

Kaynak Uygulama Süresi

Bu çalışmada; FCAW metodu ile birleştirme iki kez geçiş (tekrarlama) yapmak gerekmişken, SAW metodu ile birleştirme tek geçişte tamamlanmıştır. FCAW yöntemi test panellerine ikinci kez (tekrar) uygulanması gerekmiştir. FCAW yönteminde; bir panel tek seferlik uygulanmasında 26 dakikada gerçekleşirken, iki kere uygulanması 52 dakikayı bulmuştur. SAW yönteminde ise, bir panelin birleştirilmesi 17dakikada tamamlanmıştır.

SONUÇLAR

- Gazaltı kaynağı tozaltı kaynağına göre daha yavaştır.
- 12mm kalınlığındaki ve çok büyük ebata sahip olan çalışma panellerine uygulanan farlı iki metot kıyaslandığında tozaltı kaynağı daha avantajlı olduğu elde edilmiştir. Bu avantaj gerek uygulama süresinde gerekse maliyeti içermektedir.
- Gazaltı kaynağında kaynak ağzı açmak gerekirken tozaltı kaynağında gerek olmamaktadır. Kaynak ağzı açma işlemi ekstra zaman ve maliyet getirmektedir.
- Tozaltı kaynağı montajdan kaynaklanan hataları tolere ederken gazaltı kaynağında hatalara ve geri dönüşlere sebep olmaktadır.
- Gazaltı kaynağında çoklu paso atmak gerekirken tozaltında tek pasoda kaynak tamamlanmaktadır.

KAYNAKÇA

Dündar C.; (2008). "Gemi İnşa Sanayiinde, Kaynak Teknolojilerindeki Yenilikler"; TERSANE E- Jornal; Volume 31.

EN ISO 5579., "Tahribatsız muayene-Metalik malzemelerin film ve X- veya gama ışınlarıyla radyografik muayenesi için genel prensipler".

Mandal, N.R.; (2017); "Ship Construction and Melding. Los Angeles: Springer".

O'Brien R.L.; (1991); "*Welding Handbook";* Vol 11, P 191-232

Olson D.L. *et all.; (1983); "*Submerged Arc Welding"; *Metals Handbook,* American Society for Metals; Vol 6, 9th Education, P 114-152.

Sharma H., Rajput B., Singh R.P.; (2020); "A review paper on effect of input welding process parameters on structure and properties of weld in submerged arc welding process"; Materials Today: Proceedings 26; Pages 1931–1935.

ISO 14171, (2016), "Welding consumables, Solid wire electrodes, tubular cored electrodes and electrode/flux combinations for submerged arc welding of non alloy and fine grain steels", Classification.

ISO 14341, (2010) ., "Welding consumables", Wire electrodes and weld deposits for gas shielded metal arc welding of non alloy and fine grain steels, Classification

ISO 10675-1., "Non-destructive testing of welds", Acceptance levels radiographic testing

"The Procedure Handbook of Arc Welding", The Lincolin Electronic Co.; (1973); P 6.3-1 TO 6.3-24.

TSE EN ISO 4136., (2012)., "Destructive tests on welds in metallic materials", Transverse tensile test.

TS EN ISO 9016., (2012)., -"Destructive tests on welds in metallic materials", Impact tests, Test specimen location, notch orientation and Examination.

TS EN ISO 5173.,(2010)., "Metalik malzemelerde kaynak dikişleri üzerinde tahribatlı muayeneler"- Eğme deneyleri.

TS EN ISO 17639, (2014)., "Metalik malzemelerdeki kaynaklarda tahribatlı muayene Kaynakların makroskopik ve mikroskopik muayenesi".

TS EN ISO 9015.,(2011)., "Metalik malzemelerdeki kaynaklar üzerinde tahribatlı deneyler Sertlik deneyi",Bölüm 1: Ark kaynaklı birleştirmelerde sertlik deneyi.

İNTERNET KAYNAKLARI

https://web.itu.edu.tr/~ytemel/files/week10.pdf (E.T. 15.12.2020)

BÖLÜM 19
BİSİKLET TASARIMININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE YAPISAL ANALİZİNİN OPTİMİZASYONU

Kenan KOÇYİĞİT[1], Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA[2]
[1]Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, İstanbul / TÜRKİYE
[2]Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, İstanbul / TÜRKİYE

Öz: Bu çalışmada yetişkinlerin kullanım amacıyla tasarlanmış bir şehir bisikletinin kadrosu sonlu elemanlar yöntemiyle gerilme ve deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla standartlarda ön görülen maksimum yükler altında bisiklet gövdesine gelen kuvvetler hesaplanmış, ardından bu kuvvetlere maruz bir bisiklet kadrosunun statik ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca standart donanımlı bisiklet kadrosunun oldukça rijit olduğu ve darbeleri direkt olarak kullanıcıya aktardığı görülmüştür. Bu durum bizi darbeleri uygun ölçüde sönümleyebilen ve bu sayede kullanıcıya daha az iletmesini sağlayan, böylece kullanıcı konforunu ve güvenliğini arttıran yeni bir kadro geliştirmek konusunda motive etmiştir. Ayrıca yeni tasarımda çelik yerine alüminyum malzeme kullanılarak kadronun hafifletilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla yeni kadro tasarlanmış ve aynı kuvvetler altında statik ve dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçları bu yeni tasarımın kullanıcı açısından daha konforlu ve güvenli olduğunu göstermiştir.

BİSİKLET

Bisiklet Nedir

Bisiklet insanların ayaklarını kullanarak pedal çevirmeleriyle tekerleklerin dönmesini sağlayan yolculuk ve spor yapmayı sağlayan taşıttır. Günümüz bisikletleri iki tekerlek boyutları birbirlerine yakın ve bu tekerlekleri birbirine bağlayan

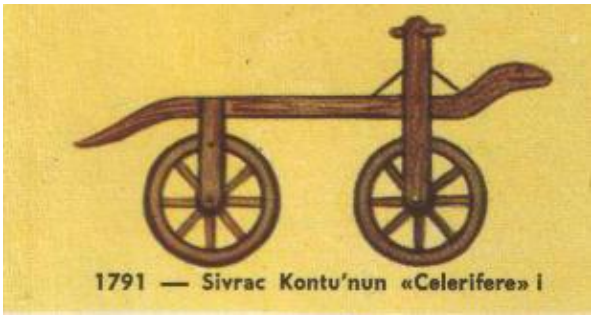
kadrodan oluşan araç genellikle boru malzemelerden üretilir. Sürücü, sele adı verilen kadro üzerindeki yapıya oturur, yönlendirmeyi sağlayan gidonu tutar. Sürücünün pedala uyguladığı kuvvet, zincir ve dişli aracılığıyla arka tekerleğe iletilir. Pedalın her hareketi sonucunda ilerleme sağlanır ve ilerlemeyi ön teklek ve gidon sayesinde yönlendirilir. Şekil 1'de ilerlemeyi sağlayan mekanizmayı ve genel görseli bulunmaktadır.



Şekil 1. Bisiklet ve Parçaları

Bisikletin Tarihsel Gelişimi

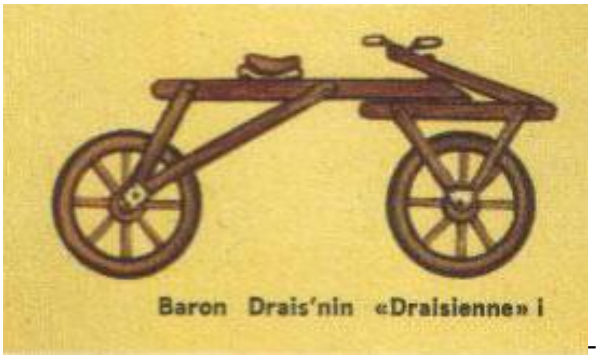
Bisiklet ilkel tekerleğin icadından itibaren en eski çağlara uzanan bir tarihe sahiptir. Tahmin edilen binlerce yıl öncesidir. İlk esintilerinin Mısırlıların iki tekerlekli ilkel bir taşıma arabası olduğu düşünülmektedir.



Şekil 2. Resmi Kayıtlı İlk Bisiklet

Günümüzde kullanılan bisikletler için tarih 18. ve 19. Yüzyılları gösteriyor ve bisiklet ilk olarak Fransa'da icat ediliyordu. Şekil 2 deki görselde tarihe geçmiş

ilk görsellerden biri bulunmaktadır. Sivrac Kontu çocuklar için iki tekerlekli bir oyuncak yapmayı planlarken bisiklet icat edeceğini muhtemelen bilmiyordu. Pedalsız bu alet kullanıcının itmesiyle hareket eden yarı oturaklı kaykay denilebilecek konumdaydı. Bu iki tekerlekli aracın üstüne Alman Baron von Drais bir gidon ve oturak yerleştirerek bu alete Draisienne adını verdi. Draisienne yıllar içerisinde komşu ülkelere yayılmaya başladı. Yazılı kaynaklara göre başlangıç tarihi 1817 yılını göstermektedir. Baron Drais geliştirdiği bisikletine isminden de yardım alarak "drazin" demiştir. Şekil 3'de görseli olan iki tekerleğini tahta ile bağlayarak dengesini sağlamış ve bir ayağı sağda diğer ayağı solda olacak şekilde sırası ile ittirerek hareketi sağlıyor ve kimse düşmeden o döneme göre rahat bir şekilde ilerleyebiliyordu.



Şekil 3. Yenilenmiş Drais Bisiketi

Alet üretildiği ilk zamanlar tahmin edileceği gibi çok pahalıydı ve "züppelerin atı" diye adlandırıldı. Zamanın İngiltere Kralı IV.George'un en büyük eğlencelerin biri bu ilkel bisiklete binmekti. Bu bisiklette pedal olmadığından sürüşü günümüz bisikletleri kadar kolay değildi. 1840'da Kirkpatrick Macmillan bu ilkel bisiklete bazı eklemeler yaptı ve geliştirdi. Arka tekerleğin yerine bir çeşit pedal eklemişti.



Şekil 4. Gelişmiş Michaux Bisikleti

Bu gelişmeler yıllar içerisinde hızlıca ilerledi ve günümüz bisikletlerinin oluşması 1860 yıllarına dayandı. Şekil 5 deki görselde Michaux'ların ilk pedallı bisikleti mevcuttur.



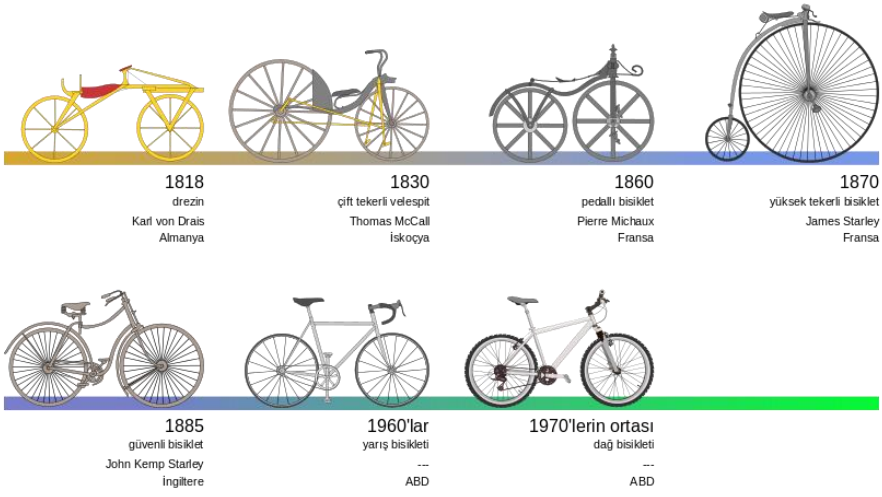
Şekil 6. Velocipede'nin Büyük Tekelekli Bisikleti

1860 sonrasında eklenen frenler ve pierre michaux fikriyle ön tekerleğe eklenen pedallar bisikleti Fransa'nın en yaygın aracı yaptı. 1870 yılına gelindiğinde geliştirilen yeni yapıma Bicyole ismi konuldu.



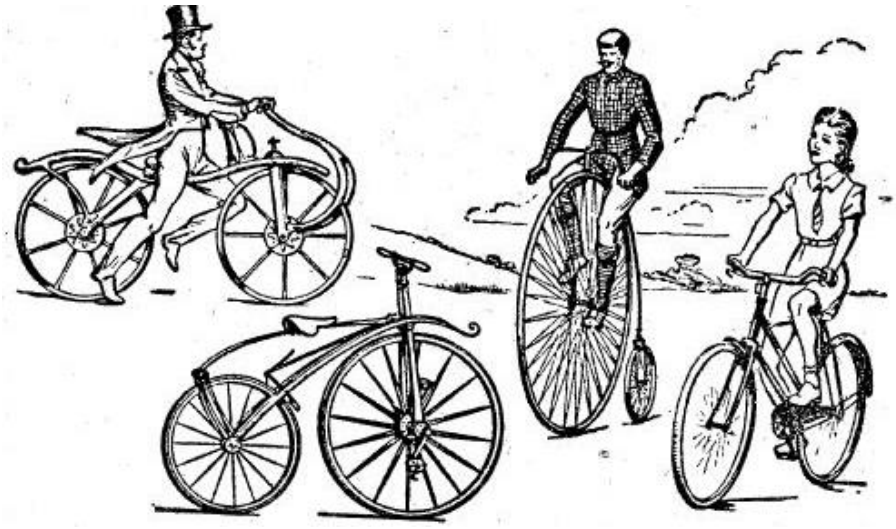
Şekil 7. İlk Zincirli Bisiklet

Bisiklet tarihini hızlı bir şekilde özetlemek gerekirse 19. ve 20.yy'larda hızlı bir değişim ve gelişim göstermiştir. Bu değişimi tek resimle özetlemek gerekirse;



Şekil 8. Bisiklet Tarihin Genel Gelişimi

Bisikletin günümüz halini alması 200 yıla yakın sürmüştür. Şekil 8'de bu gelişim görüntülenmektedir. Günümüzde ise tasarımdan çok bisikletin ağırlığı ve dayanıklılığı ön planda tutulmuştur.



Şekil 9. Tarihte En Çok Kullanılan Bisiklet Türleri

Farklı Kadrolu Bisiklet Türleri

Şehir Bisikletleri

Genel olarak asfaltlarda kullanılan bisikletlerdir. Motorlu taşıtların yoğun olduğu yerleşim yerlerinde sıkça tercih edilen sağlam kadrolu, konforlu taşıtlardır. Diğer taşıtlar tarafında görülmesini kolaylaştıran reflektörleri bulunur aynı zamanda dik duruş sağlayan sürüş sistemi göz ile daha kolay fark edilmesini sağlamaktadır. Şekil 10 görselinde genel yapısı görünmektedir.



Şekil 10. Şehir Bisikleti

MTB (MounTain Bike – Dağ Bisikleti)

Ormanlık ve dağlık ortam koşullarında kullanılmak amacıyla üretilen bisikletlerdir. Her türlü anlık darbelere ve frenlere karşı emilim gücü en yüksek bisikletlerdir ve oldukça hafiftirler. Dağ bisikletleri genel olarak iki türden oluşmaktadır basitçe tam süspansiyonlu ve yarım süspansiyonlu olarak ayrılmaktadır. İki tür bisiklette de darbe emilimini azaltmak için süspansiyon sisteminden yararlanılır. Bu sistem iki teker üstünde de yer alıyorsa tam olarak adlandırılır, herhangi bir tekerin üzerinde süspansiyon sistemi yoksa bu bisiklet yarım süspansiyonlu olarak adlandırılır.



Şekil 11. Dağ Bisikletleri

Yarış (Yol) Bisikleti

İsminden de kolaylıkla anlaşıldığı gibi yarışlarda kullanılmak için üretilen bu bisiklet türü günlük hayatta da uzun mesafeler kat etmek için insanlar tarafından tercih edilmektedir. Duruş şekli ile hava direncini en aza indiren yarış bisikletleri tekerlekleri ve kadro yapısının inceliği sayesinde yüksek süratlerde uzun süreler yolculuk yapılmasına kolaylık sağlamaktadır.



Şekil 12. Yarış Bisikleri ve Yarışçı

Katlanan Bisikletler

Günlük hayatta küçülen ev boyutlarında saklanması ve başta arabalarla olmak üzere diğer ulaşım araçlarında taşınması çok kolay olan katlanabilir bisikletler son yıllarda talebin üzerinde olduğu türlerin başında gelmektedir.



Şekil 13. Katlanabilir Bisiklet

Tandem Bisikletler

İki yada daha fazla kişinin genelde eğlence amacıyla eşzamanlı pedal hareketleri ile ilerlemeyi sağlayan bisiklet türüdür.



Şekil 14. Tandem Bisiklet

Bisiklet Kadrosunda Malzeme Teknolojisi

Bisiklet kadro imalatında onlarca hatta yüzlerce farklı malzemeler kullanılmaktadır. Bu bölümde başlıca kullanılan malzemeler ve malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken husus hakkında bilgiler verilmektedir.



Şekil 15. Bisiklet Yapısı

Teknolojinin günümüzde ilerlemesi ile birlikte üretim yöntemleri ve malzeme teknolojisi de çeşitlendi ve hem ucuz hem dayanıklı malzemelere öncelikler verildi diğer yandan dayanımdan ödün verilmedi. Son yıllarda teknolojinin ilerlemesiyle al alaşımlarının çok gelişmesi sonucunda hem ucuz hem piyasada bulunması kolay olan al kadrolu bisikletler tercih edilmektedir. En çok tercih edilen alaşımlar ise sert ve nispeten biraz ağır olan 7000 serisi ile 7000'e göre biraz daha yumuşak ve hafif olan 6000 serisidir.



Şekil 16. Al Kadrolu Bisiklet

Kadroların yumuşaklık miktarı artması darbe emme özelliğinin artması anlamına gelmektedir. Ancak yumuşaklık sayeseinde darbe emmesinin yanında paslanma dirençleri düşük olmaktadır, burada kaplamalar ve kullanılan boyalar önem kazanmaktadır.

Al kadro parçalarının birleşiminde genellikle kaynak kullanılır.



Şekil 17. Kadrodaki Kaynak Bağlantıları

Kadro malzemelerinde Al'un yanında titanyum da tercih edilmektedir.Titanyum aluminyuma oranla hafif bir malzeme olduğundan bisiklet kadroları da hafif olmaktadır ancak al kadar sert değildir.Bu nedenle titanyum malzemeler daha çok yarış bisikletlerinde tercih edilmektedir. Aynı zamanda al malzeme titanyum malzemeye oranla çok daha pahalı olduğu için standart bisikletlerde çok fazla tercih edilmemektedir. Titanyum malzemenin ömrü boyunca paslanmama özelliğinin olması iyi bir kullanıcının kullanmasıyla ömür boyu kullanılabilir olduğunun göstergesidir.



Şekil 18. Kadronun Genel Yapısı ve Düğüm Noktası

Kadro malzemesi seçiminde kullanılan diğer bir malzeme türü de çeliktir. Çelik darbe emici özelliği bulunan gerilme direnci çok yüksek olan uzun yıllar paslanmayan bir yapıdadır ancak al ve tit malzemeye oranla ağırdırlar. Ancak çevremizde kullanılan bisikletlerin çoğunda karbon malzemeli bisikletler bulunmazlar bunun nedeni ise darbe emici özelliği konfor ve sürüş keyfi açısından rahat olsa da darbe alan karbon yapılar ömürlerini belli bir düşmeden sonra tamamlayıp kadronun kırılmasına neden olabilirler.



Şekil 19. Pedal ve Dişli Yapısı Detay Görünümü

Bisiklet kadrolarında malzeme seçimi yaparken dikkat edilen parametreleri kısaca yoğunluk, çekme direnci ve elastik modülü olarak sıralayabiliriz. Başlıca malzemeler ise al 6061, 7005, 7020, 7075, skandiyum, titanyum, karbon ve çeliktir. Bu parametler doğrultusanda şekil 20'de yer alan değerleri daha net bir şekilde kıyaslayabiliriz.

Malzeme	Yoğunluk	Çekme Direnci	Elastik Modül
6061 Alüminyum (AlMg1SiCu)	2,7g/cm3	180-270N/mm2	70.000N/mm2
7005 Alüminyum (AlZn4,5Mg1,5Mn)	2,8g/cm3	290-350N/mm2	70.000N/mm2
7020 Alüminyum (AlZn4,5Mg1)	2,8g/cm3	420-490N/mm2	420-490N/mm2
7075 Alüminyum (AlZn5,5MgCu)	2,8g/cm3	500-550N/mm2	72.000N/mm2
Skandiyum	2,8g/cm3	470-490N/mm2	72.000N/mm2
Titanyum	4,5-4,7g/cm3	900-950N/mm2	120.000N/mm2
Karbon	1,7g/cm3	2,5-5kN/mm2	150.000-300.000N/mm2
Çelik	7,6-7,9g/cm3	1-1,4kN/mm2	210.000N/mm2

Şekil 20. Bisiklet Kadrosunda Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Uygun malzemelerin değerlendirilmesinin yapılması için kuvvet değerlerinin analitik el hesabı ve 3 boyutlu analiz programında değerlendirilmesinin yapılması gerekmektedir. Gerekli malzeme seçimleri analiz hesaplarının sonunda çıkacaktır.

BİSİKLET ANALİZİ

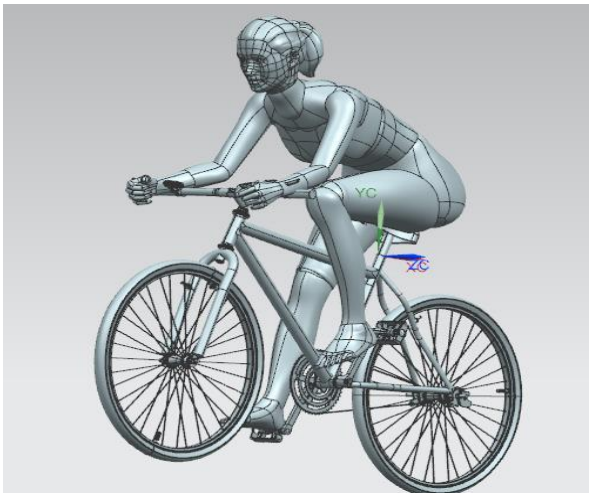
Bisiklet Kadrosu Seçimi

Bisiklet analizi için modeli hazır standart boyutlarda bir bisiklet modeli seçilir ve NX' de açılır.



Şekil 21. Bisikletin 3D Cad Modeli NX Programında

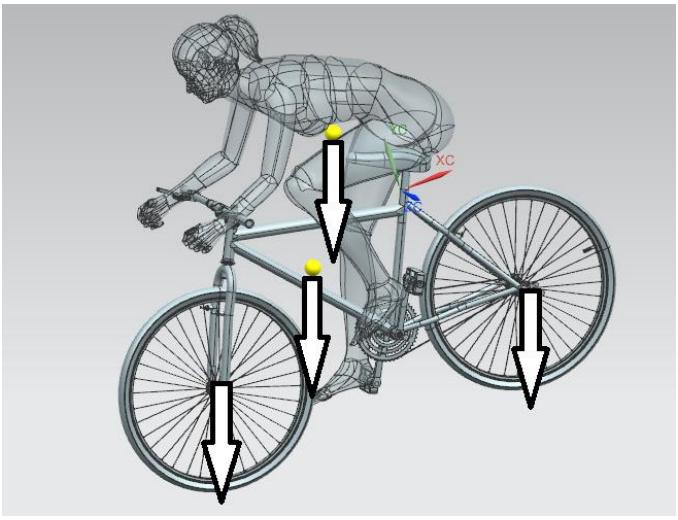
Sürücü Duruşu ve Montajı



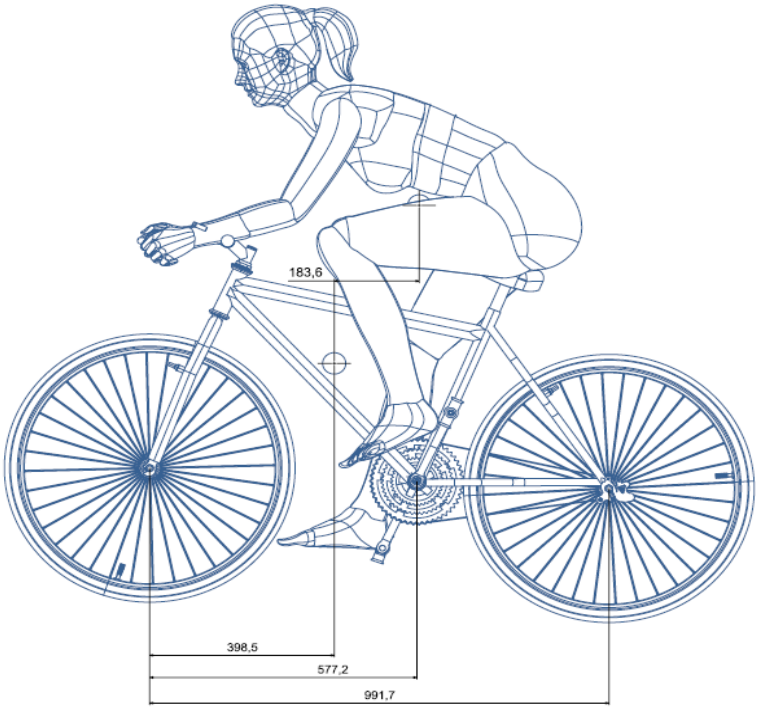
Şekil 22. Sürücü ile Beraber Bisiklet Modeli

Ağırlık Merkezlerinin Belirlenmesi

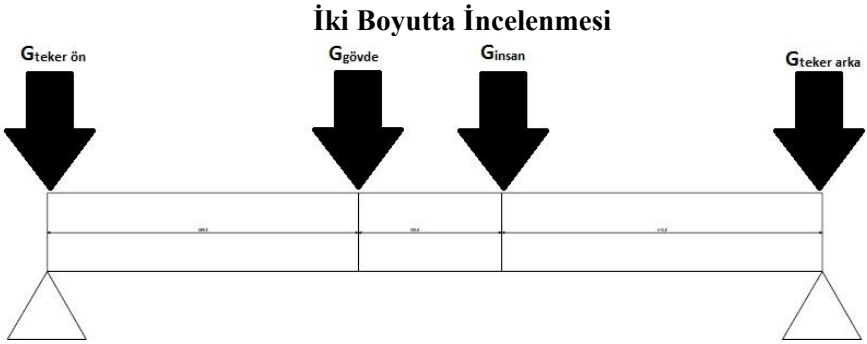
Ağırlık merkezlerinin daha net bir şekilde görülebilmesi için insan modelinin ağırlık ve bisiklet kadrosunun ağırlık merkezine sarı küreler yerleştirilmiştir.



Şekil 23. Bisiklet Üzerindeki Sürücünün Ağırlığının Etkisi



Şekil 24. Ağırlık Merkezinin Teker Merkezlerine Mesafesi



Şekil 25. Ağırlıkların 2 Boyutta İncelenmesi

$V_{gövde}$=946 cm^3

d_{metal}=7,85 g/cm^3

$m_{gövde}$= (d_{metal}) x ($V_{gövde}$)→(7,85 g/cm^3) x (0,946 cm^3)=7,43kg

$G_{gövde}$=($m_{gövde}$) x ($g_{yerçekimi}$)→(7,43 kg) x (9,81 m/sn^2) =72,82 N

V_{jant}=407 cm^3

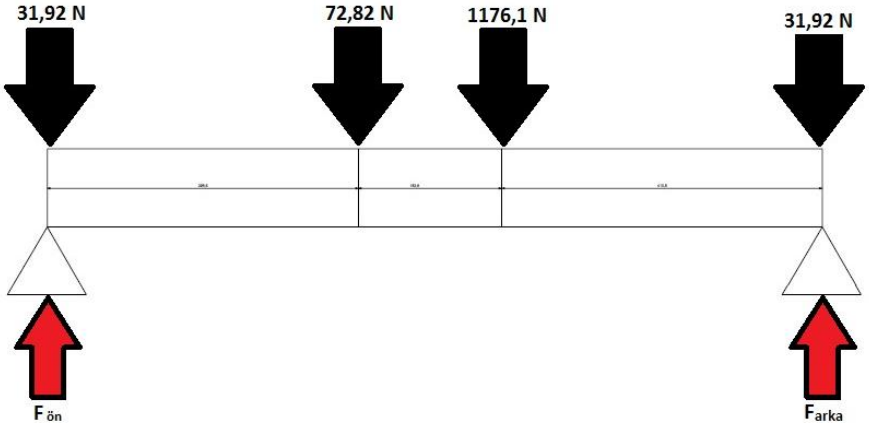
d_{metal}=7,85 g/cm^3

m_{jant}= (d_{metal}) x (V_{jant})→(7,85 g/cm^3) x (0,407 cm^3)=3,2kg

G_{jant}=(m_{jant}) x ($g_{yerçekimi}$)→(3,2 kg) x (9,81 m/sn^2) =31,92 N

m_{insan}=120 kg

G_{insan}=(m_{insan}) x ($g_{yerçekimi}$)→(120 kg) x (9,81 m/sn^2) =1176,1 N



Şekil 26. Tekerleklerin Tepki Kuvvetlerinin Hesaplanması

$F_{ön}$ve F_{arka}'yı bulmak için; ön olarak adlandırılan "Ö" noktasına göre moment alınır.

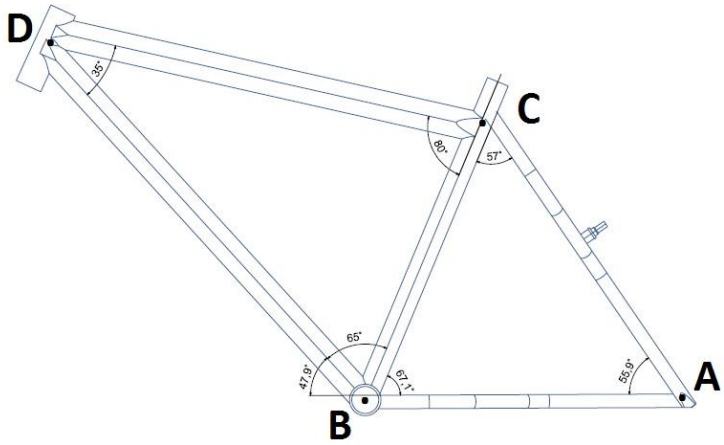
$M_{ö}$= (72,82) x (398,5) + (1176,1) x (183,6+398,5) + (31,92) x (410,6+183,6+398,5) – (F_a) x (992,7) =0

F_a= (745313,4) / (992.7) = 750,8 N

Eksenel olarak uygulanan kuvvetlerin toplamının sıfır olması gerektiğinden;

$\sum F_y$=0 →(31,92) + (72,82) + (1176,1) + (31,92) = F_a + $F_{ö}$ →$F_{ö}$ =561,9 N

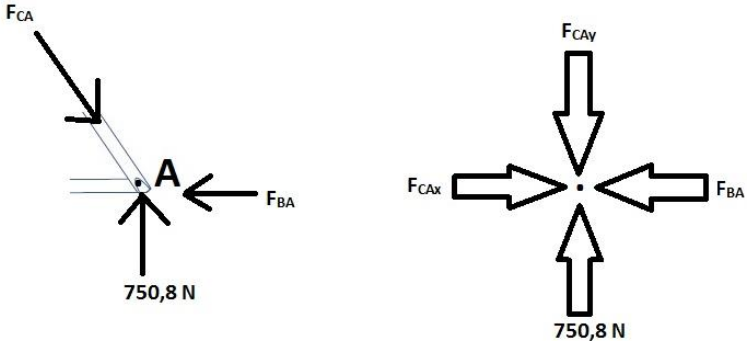
2.5.Düğüm Noktaları Analizi



Şekil 27. Kadro Açılarının Değerleri

Gövde üzerinde statik kuvvetlerden dolayı oluşan gerilmeleri hesaplamak için düğüm noktalarında oluşan kuvvetleri hesaplamak gerekir. Bu kuvvetler yardımıyla kadro üzerindeki gerilmelere geçiş yapılır.

A düğüm noktası;



Şekil 28. A Noktasındaki Kuvvet Dağılımı

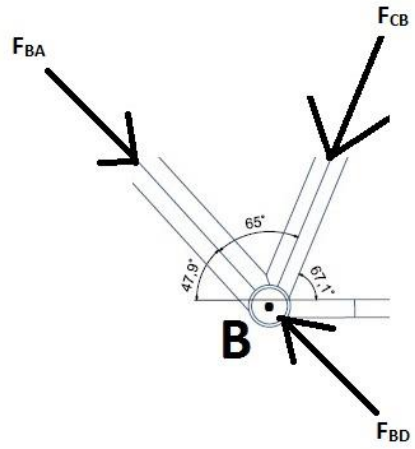
F_{Cay}=750,8 F_{CAx} =F_{BA}

(F_{CA}) x (sin55,9) = F_{CAy}

F_{CA} = (750,8) / (sin55,9) → F_{CA}= 906,7 N

F_{CA} x (cos55,9) = F_{CAx} = 508,3 N = F_{BA}

B düğüm noktası;



Şekil 29. B Noktasındaki Kuvvet Dağılımı

F_{CB} F_{BD} F_{BA}

(F_{CB}) x (sin67,1) = (F_{BD}) x (sin47,9) → F_{CB}=0,805 (F_{BD})

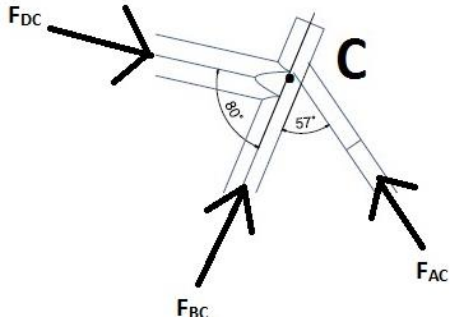
(F_{CB}) x (cos67,1) + (F_{BD}) x (cos47,9) = F_{BA} =508,3 N

(0,389) x (F_{CB}) +0,67(F_{BD}) =508,3 N

(0,389) x 0,805(F_{BD}) +0,67(F_{BD}) =508,3 N

(0,313+0,67) F_{BD}=508,3

0,98F_{BD} =508,3 → F_{BD} =518,67 F_{CB}=417,53 N



Şekil 30. C Noktasındaki Kuvvet Dağılımı

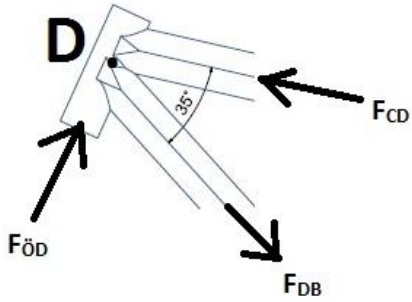
C düğüm noktası;

(F_{BC}) / (sin223) = (F_{DC}) / (sin57) = (F_{AC}) / (sin80)

F_{DC}= (F_{AC}) x (sin57) / (sin80) = (906) x (0,838) / (0,984)

F_{DC}=771,5 N

D düğüm noktası;



Şekil 31. D Noktasındaki Kuvvet Dağılı

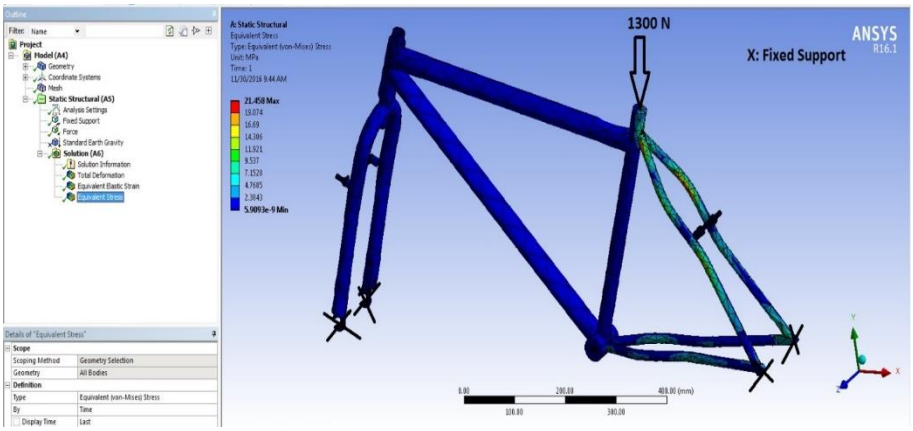
$(F_{CD}) / (\sin 67) = (F_{ÖD}) / (\sin 35)$

$F_{ÖD} = (F_{CD}) \times (\sin 35) / (\sin 67) = (771,5) \times (0,573) / (0,92)$

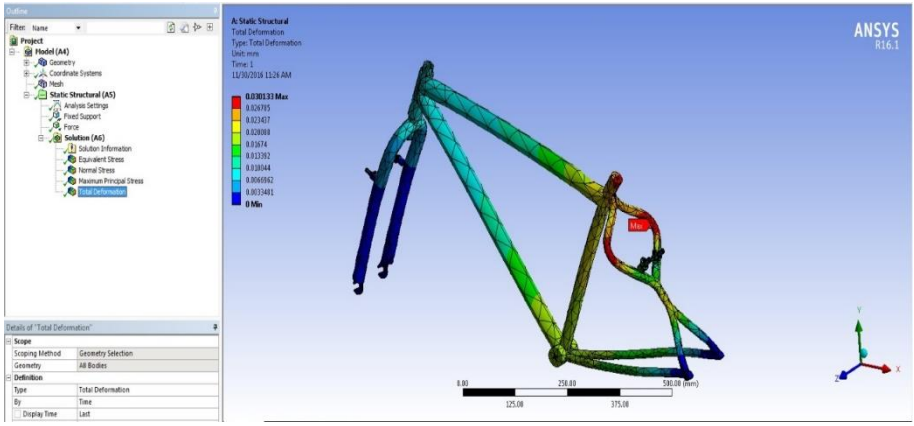
$F_{ÖD} = 480,5$ N

2.6.Uygun Kuvvetlerin Belirlenmesi ve Zayıf Bölgelerin Tespiti

Analitik olarak hesaplanılan bu kuvvetleri ansys üzerinden alabilmek için modeli ansys ile mesnet ve kuvvetler yardımıyla incelemelere başlanır. Bisikletin tekerlek bağlantılarından sabitleyip seleden 1300N'luk kuvvet uygulanır;

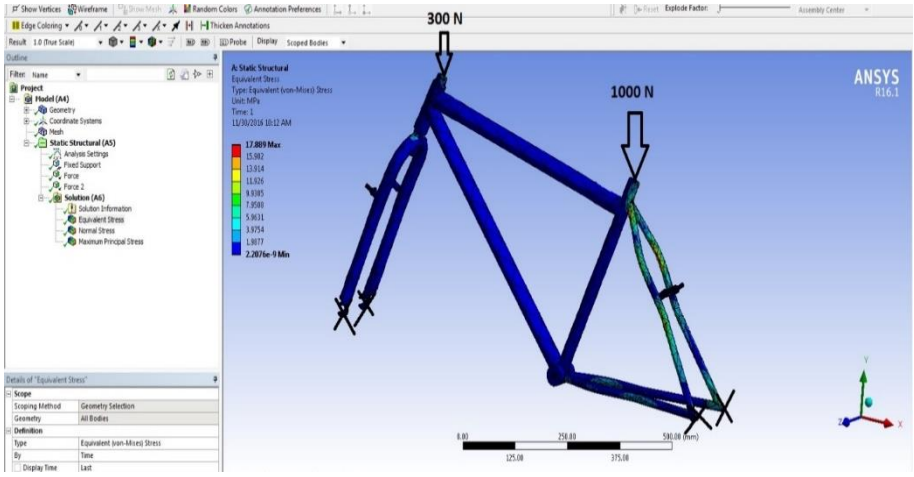


Şekil 32. Sele Üzerinden Uygulanan 1300n'luk Kuvvetin Kadro Üzerindeki Stress Dağılımı

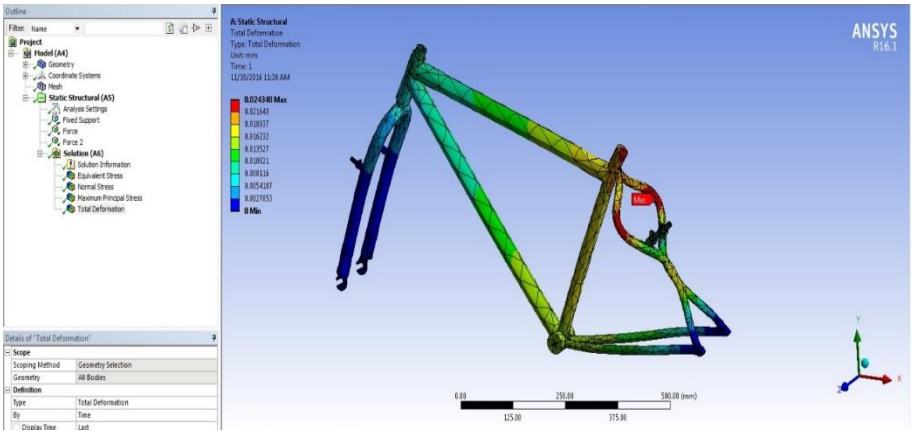


Şekil 33. Sele Üzerinden Uygulanan 1300n'luk Kuvvetin Kadro Üzerindeki Toplam Deplasman Değeri

Bisikletin tekerlek bağlantılarından sabitleyip seleden 1000N ve gidon bölgesinden 300N'luk kuvvet uygulanır;

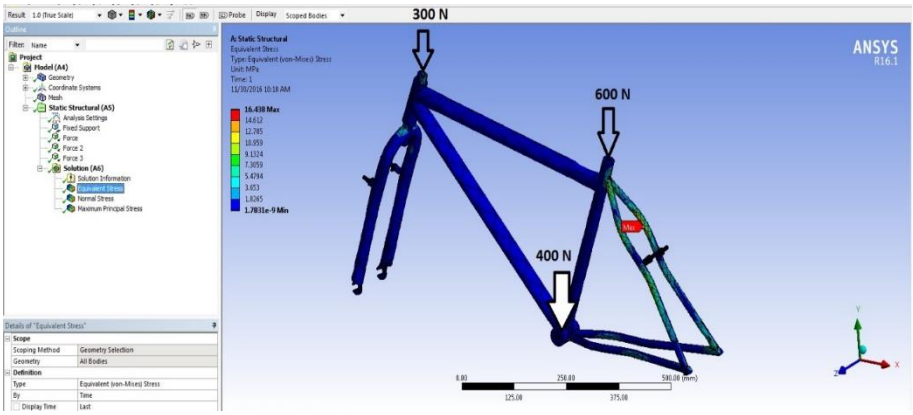


Şekil 34. Sele Üzerinden 1000N Gidondan 300N Uygulanan Kuvvetlerin Kadro Üzerindeki Stress Dağılımı

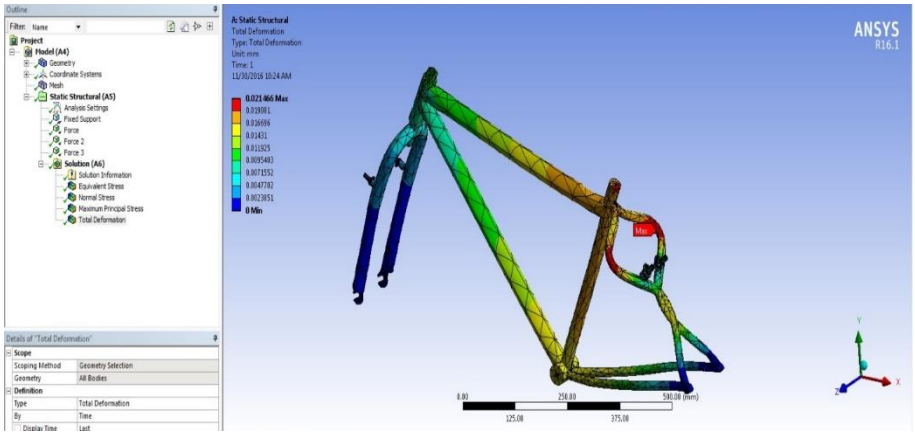


Şekil 35. Şekil 34. Sele Üzerinden 1000N Gidondan 300N Uygulanan Kuvvetlerin Kadro Üzerindeki Toplam Deplasman Değeri

Bisikletin tekerlek bağlantılarından sabitleyip seleden 600N gidon bölgesinden 300N pedal bölgesinden 400N'luk kuvvet uygulanır;

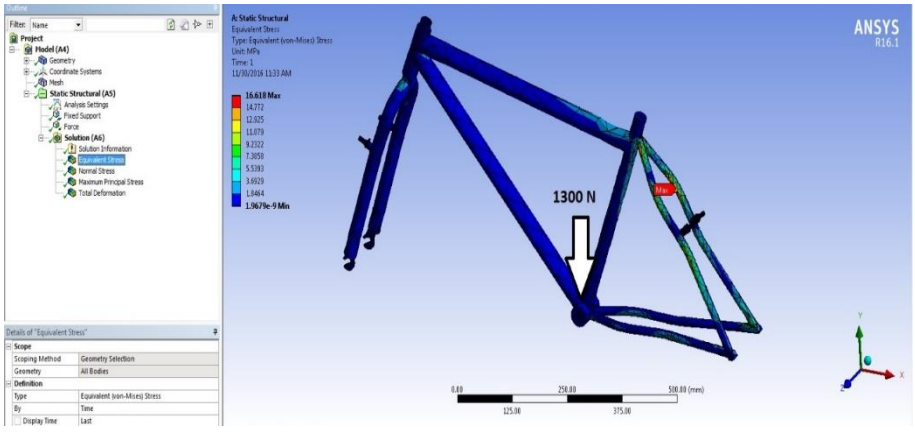


Şekil 36. Sele Üzerinden 600N Gidondan 300N Pedal Bağlantısından 400N Uygulanan Kuvvetlerin Kadro Üzerindeki Stres Dağılımı

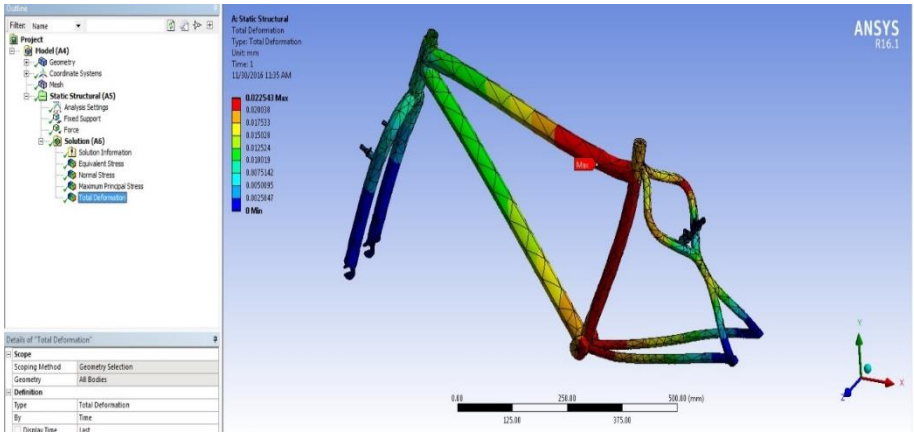


Şekil 37. Sele Üzerinden 600N Gidondan 300N Pedal Bağlantısından 400N Uygulanan Kuvvetlerin Kadro Üzerindeki Stres Dağılımı

Bisikletin tekerlek bağlantılarından sabitleyip pedaldan 1300N luk kuvvet uygulanır;

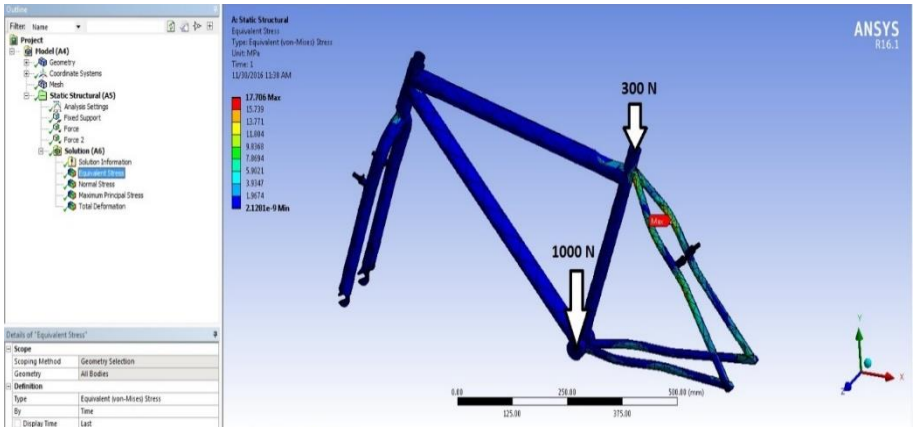


Şekil 38. Pedal Üzerinden Uygulanan 1300n'luk Kuvvetin Kadro Üzerindeki Stress Dağılımı

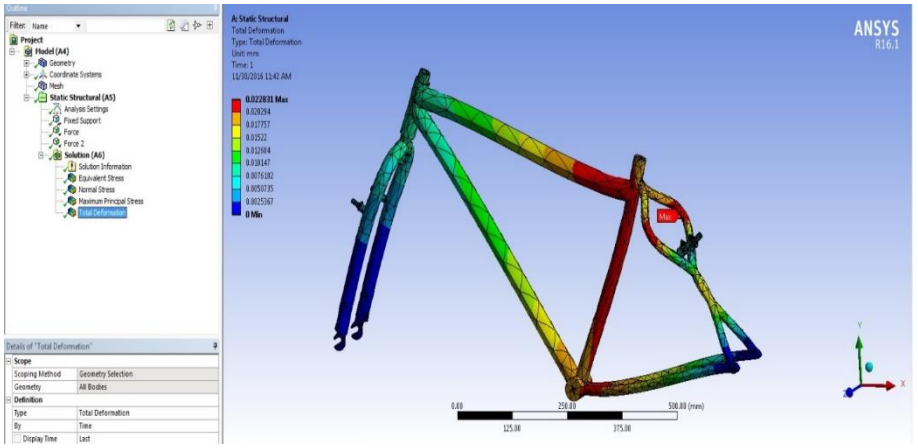


Şekil 39. Sele Üzerinden Uygulanan 1300n'luk Kuvvetin Kadro Üzerindeki Toplam Deplasman Gösterimi

Bisikletin tekerlek bağlantılarından sabitleyip seleden 300N pedal bölgesinden 1000N luk kuvvet uygulanır;

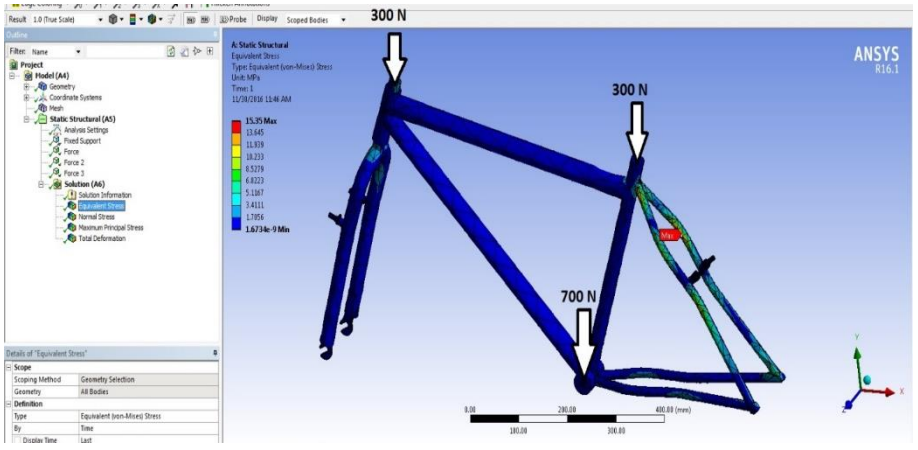


Şekil 40. Sele Üzerinden 300N Gidondan 1000N Uygulanan Kuvvetlerin Kadro Üzerindeki Stress Dağılımı

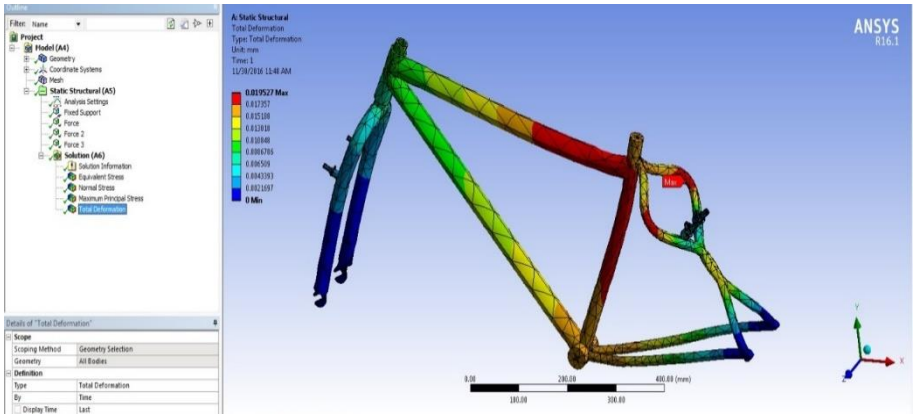


Şekil 41. Sele Üzerinden 1000N Gidondan 300N Uygulanan Kuvvetlerin Kadro Üzerindeki Toplam Deplasman Gösterimi

Bisikletin tekerlek bağlantılarından sabitleyip seleden 300N elle gidon bölgesinden 300N pedal bölgesinden 700N'luk kuvvet uygulanır;

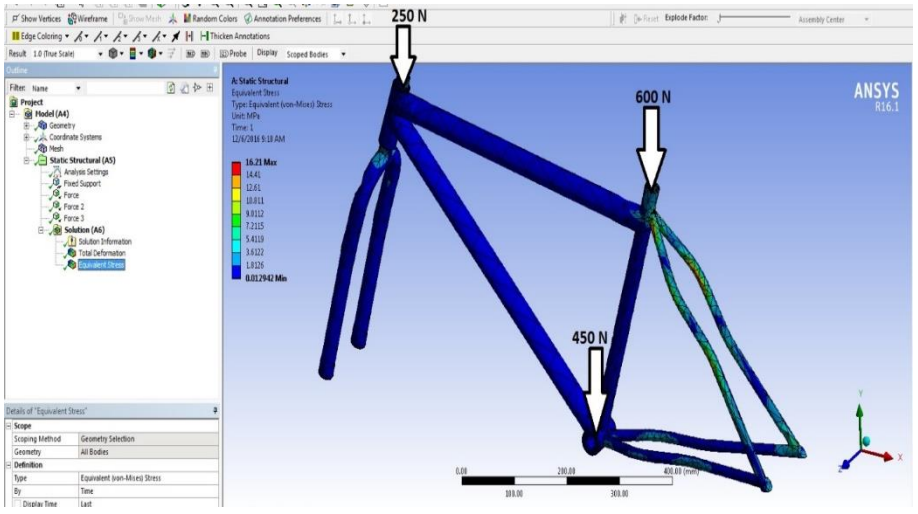


Şekil 42. Sele Üzerinden 300 N Gidondan 300 N Pedal Bağlantısından 700 N Uygulanan Kuvvetlerin Kadro Üzerindeki Stres Dağılımı

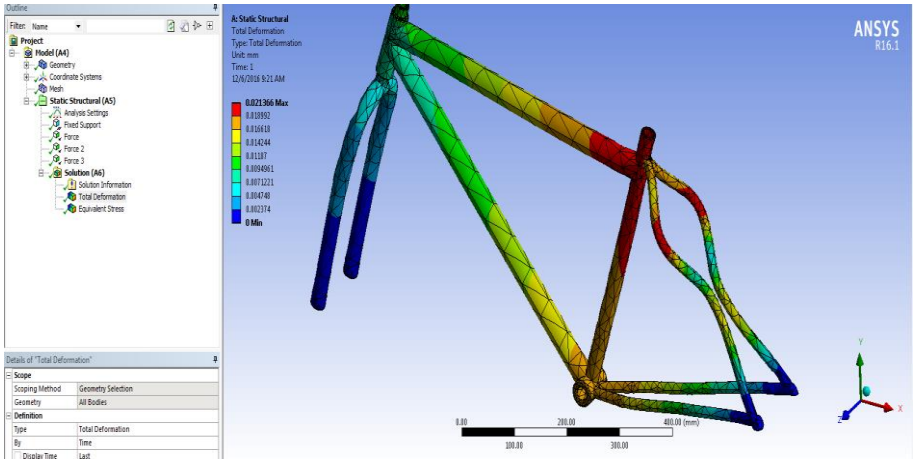


Şekil 43. Sele Üzerinden 300 N Gidondan 300 N Pedal Bağlantısından 700 N Uygulanan Kuvvetlerin Kadro Üzerindeki Toplam Deplasman Gösterimi

El ile yapılan analitik hesaplamalarda yakın gerilim değerlerini 3e bölünmüş kuvvetlerden elde edilir, bu kuvvetlerden gidon bölgesinden uygulanan 250N, sele kısmı 600N ve pedal kısmından ise 450 N kuvvet etkisi altında kalmaktadır.



Şekil 44. Sele Üzerinden 600 N Gidondan 250 N Pedal Bağlantısından 450 N Uygulanan Kuvvetlerin Kadro Üzerindeki Stres Dağılımı



Şekil 45. Sele Üzerinden 600 N Gidondan 250 N Pedal Bağlantısından 450 N Uygulanan Kuvvetlerin Kadro Üzerindeki Toplam Deplasman Gösterimi

Aynı zamanda yapılan denemeler sonucunda maksimum deformasyona uğrayan bölge hep yakın bölgelerde çıkmaktadır, ancak istenilen değerlere total kuvveti 600 N, 450 N ve 250 N olarak bölündüğünde ulaşılır.

Bulunan kuvvet değerleri bulunduğu parçanın alanına uygun birimlerde bölünerek (N/mm^2) o parça üzerindeki ortalama gerilmeler hesaplanır. Sonuçları ansys aracılığıyla bulunan değerler ile karşılaştırıldığında doğru noktalardan kuvvet uygulandığını görülür.

Parça İsimleri	Analitik Kuvvetler (N)	Çaplar (mm)	Analitik Gerilmeler (Mpa)	Ansys Sonuçları (MPa)
AC	906,7	12	16,03	16,21
AB	508,3	12	8,98	7,2 - 9,03
CB	417,5	28,5	0,66	0,012 - 1,023
DC	771,5	28,5	1,22	1,02 - 3,06
DB	518,6	28,5	0,82	0,012 - 1,02

Şekil 46. Analitik Hesaplama ile Elde Edilen Değerler ile Programdan Alınan Sonuçların Karşılaştırılması

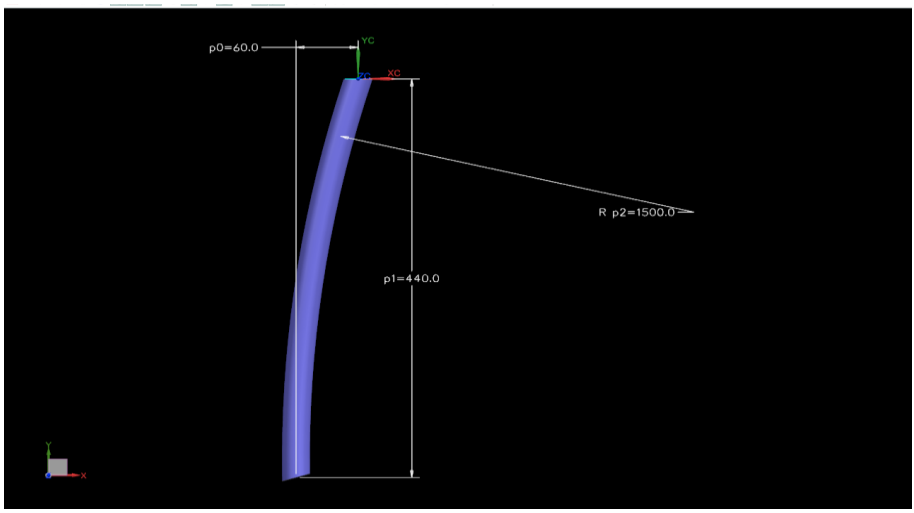
2.7.Yeni Tasarım Yapılması ve Analizlerinin Uygulanması

Gerilmelerin en yüksek çıkan bölgesinde deformasyonunda en yüksek olması o parçadaki çap değerlerinin düşük olmasından kaynaklandığı verisine ulaşılır. O parça için yeni bir tasarım yapılır. Bu yeni 3D tasarım için Siemens NX Unigraphics kullanılır.

Tasarımın modele uygun olması için model üzerindeki ölçülerden yaralanılır, montaj esnasında sıkıntı yaşanılmaması için.

Parçayı uygun şekilde tasarladıktan sonra montajını standart modelden biraz daha farklı yapılır, çünkü daha önceki yapılan analizlerde bu parça üzerinde yüksek miktarda gerilmeler olduğu saptanmıştır nedeni ise parça üzerine gelen dik kuvvetlerdir. Bu dik kuvvetleri bisiklet üzerindeki yere doğru daha dik konumlanan kadro parçasına aktarmak planlanıldı. Bu nedenle selenin hemen altından değilde biraz daha ön tarafa yakın yerden kaynatılarak birleştirilme işlemi uygun görüldü.

Parça tasarımı ve bisiklet üzerine montajı esnasında alınan ekran görüntülerini daha iyi anlaşılması için eklenmiştir.

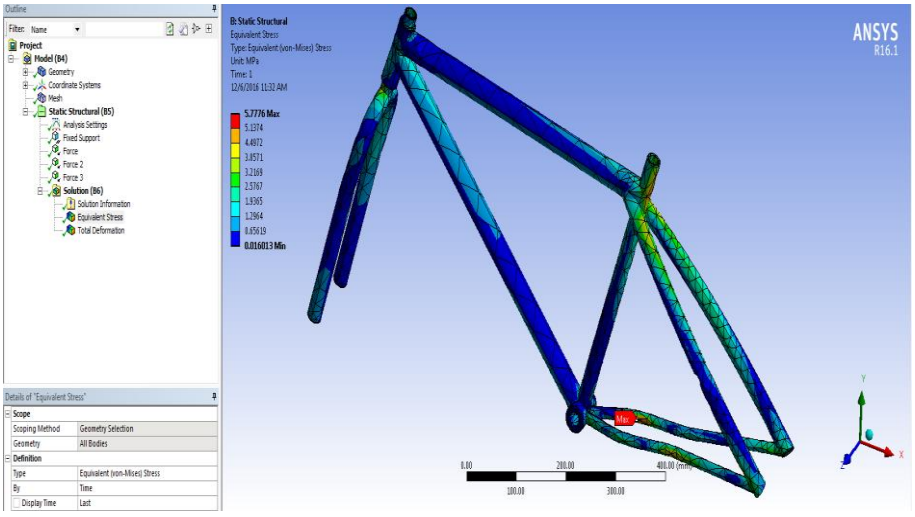


Şekil 47. Tasarımı Yenilenen Kadro Parçasının NX'de 3 Boyutlu Çizimi

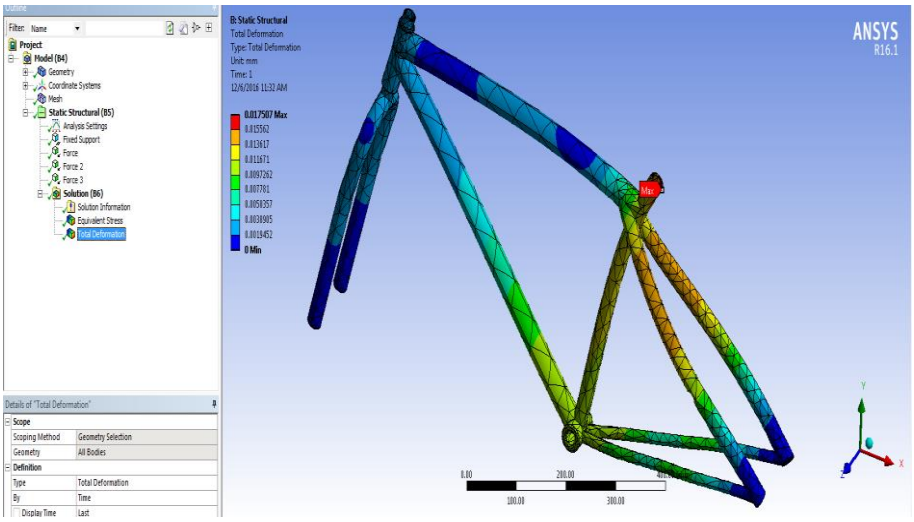


Şekil 48. Yenilenen Kadrosu ile Bisikletin Genel Görünümü

Bu tasarım üzerinde yine aynı yükleri uygulayıp aynı noktalardan sabitlenir ve sonuç tekrar incelenir.



Şekil 49. Yenilenen Kadronun Sele Üzerinden 600 N Gidondan 250 N Pedal Bağlantısından 450N Uygulanan Kuvvetlerin Kadro Üzerindeki Stres Dağılımı

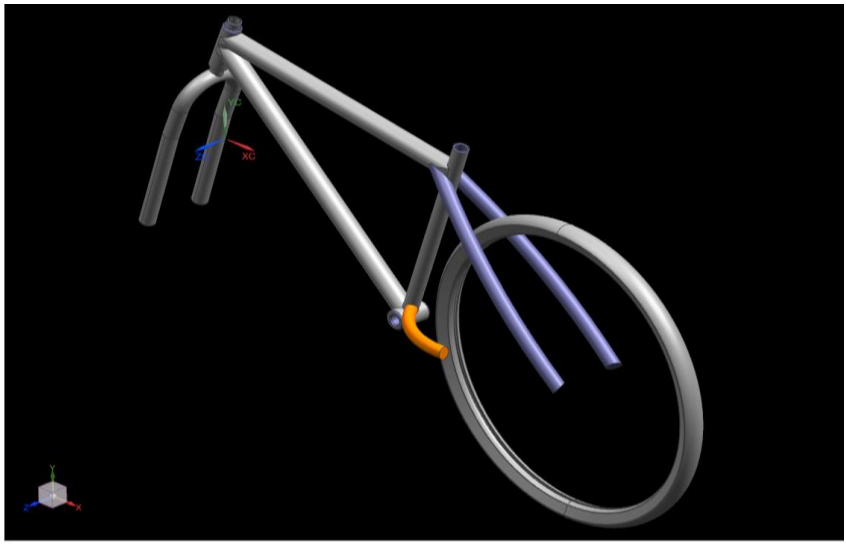


Şekil 50. Yenilenen Kadronun Sele Üzerinden 600 N Gidondan 250 N Pedal Bağlantısından 450N Uygulanan Kuvvetlerin Kadro Üzerindeki Toplam Deplasman Gösterimi

Tasarımı değiştirdikten sonra amaca ulaşılmıştır, maksimum gerilme ve deformasyon olan bölgeler yer değiştirmiş ve maksimum deformasyon miktarı ile maksimum gerilim miktarı da azalmış bu veriler yeni tasarımın daha mukavemetli yani daha dayanıklı olduğunu gösterir.

Bu değerler detaylı olarak incelenildiği zaman ilk denemelerdeki arka çıtada var olan maksimum gerilim miktarı 30 MPa değerinden 6 MPa değerlerine düşmektedir. Yapılan yeni tasarımda gerilim değerleri %80 oranında azaltmaktadır.

Tekrar gerilim ve deformasyon miktarı fazla olan bölgeler tespit edilir ve tasarım değişikliğine gidilir. 3D tasarım esnasında alınmış ekran görüntüsünü aşağıda eklenmiştir..

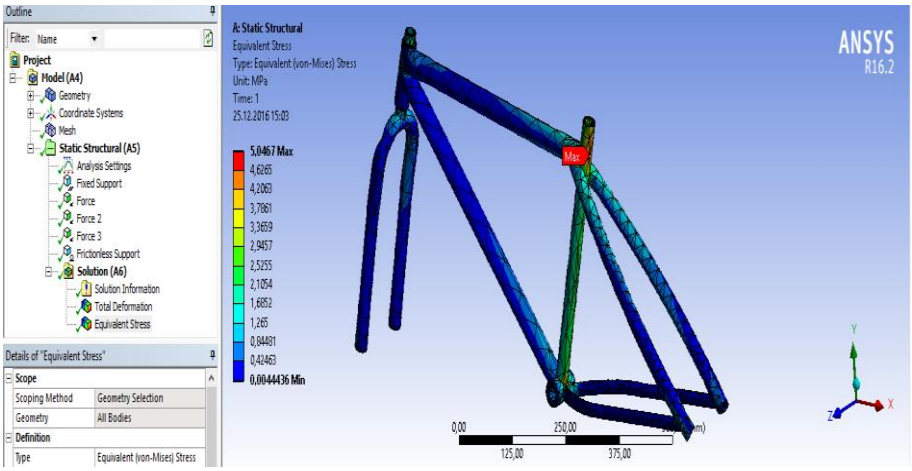


Şekil 51. Gerilimi Düşürmek İçin Tasarım Güncellendiği Kadro Parçası

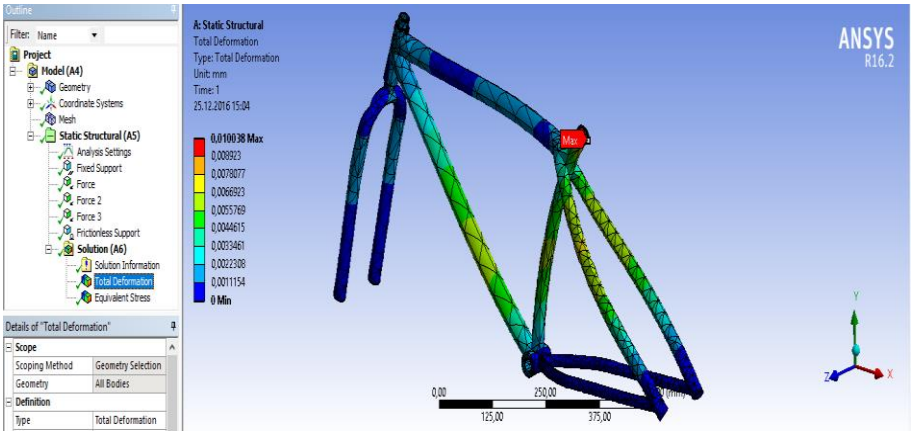


Şekil 52. Tamamlanan Tasarımın Son Görüntüsü

Yeni tasarımın montajı tamamlandıktan sonar tekrar ansys üzerinden kullanılan kuvvet değerleri girilir. Elde edilen sonuç bir önceki tasarım değişikliği kadar efektif olmasa da istenilen doğrultudadır.



Şekil 53. Yenilenen Kadronun Sele Üzerinden 600 N Gidondan 250 N Pedal Bağlantısından 450N Uygulanan Kuvvetlerin Kadro Üzerindeki Stres Dağılımı

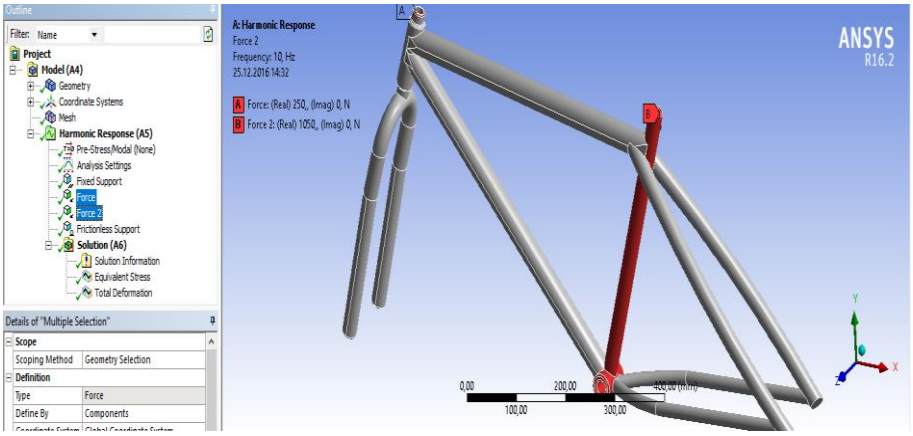


Şekil 54. Yenilenen Kadronun Sele Üzerinden 600 N Gidondan 250 N Pedal Bağlantısından 450N Uygulanan Kuvvetlerin Kadro Üzerindeki Toplam Deplasmanın Gösterimi

Değiştirilen tasarımlar sonunda bisiklet üzerindeki en fazla gerilme değeri 5MPa iken maksimum yer değiştirme miktarı ise 0.01 mm değerindedir. Bu değerler başlangıçta 16MPa ve 0,02mm değerindeydi. Ayrıca son tasarım üzerindeki oluşan bu maksimum değerler başlangıçtaki bisiklet modelinin en sağlam olarak görüldüğü kadronun dikey parçası üzerindedir. Bu da son tasarımın ne kadar dayanıklı olduğunun bir kanıtıdır.

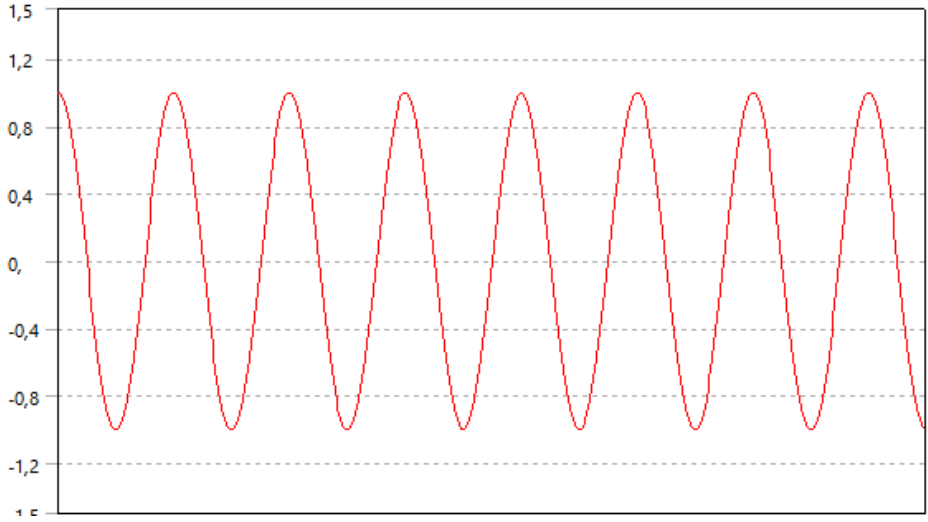
Son olarak yorulma analizi için model üzerindeki uygulanacak olan kuvvet değerlerini ve uygulanacak olan yerler belirlenir.. Daha önce ulaşılan 250N değe-

rindeki gidon bölgesindeki değer sabit tutularak sele ve pedal bölgesinden uygulanan 450 ve 600N değerindeki kuvvetler yerine pedal sele arasındaki dikey kadro parçasına harmonik 1050N'luk yükleme yapılır



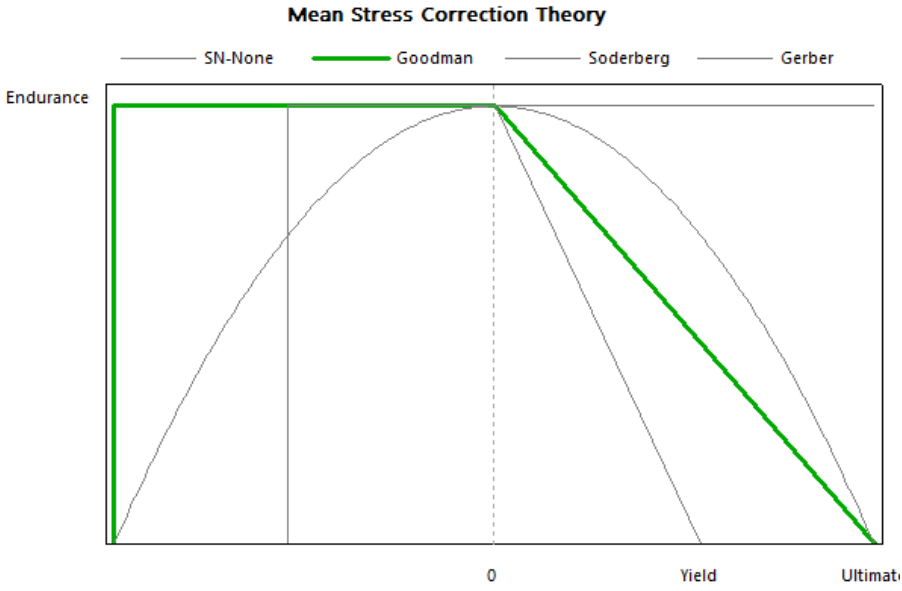
Şekil 55. Yorulma Analizi Yapmak İçin Harmonik 1050 N'luk Kuvvetin Kadro Üzerine Uygulanması

Bu işlem için Ansys Workbench ile Fatique Analiz modu kullanılır. Uygulanacak olan kuvvetin değer değişimi aşağıdaki grafikte verilmiştir.

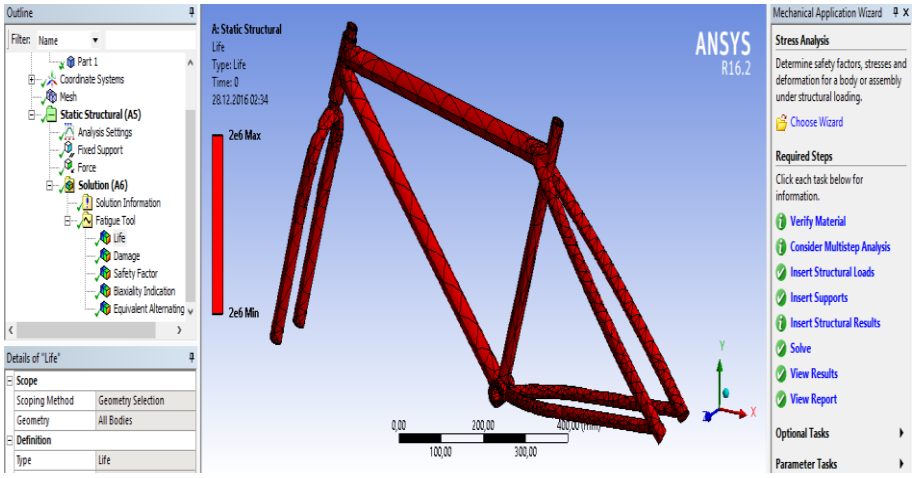


Şekil 56. Harmonik Uygulanan Kuvvetin Değer Değişiminin Grafiği

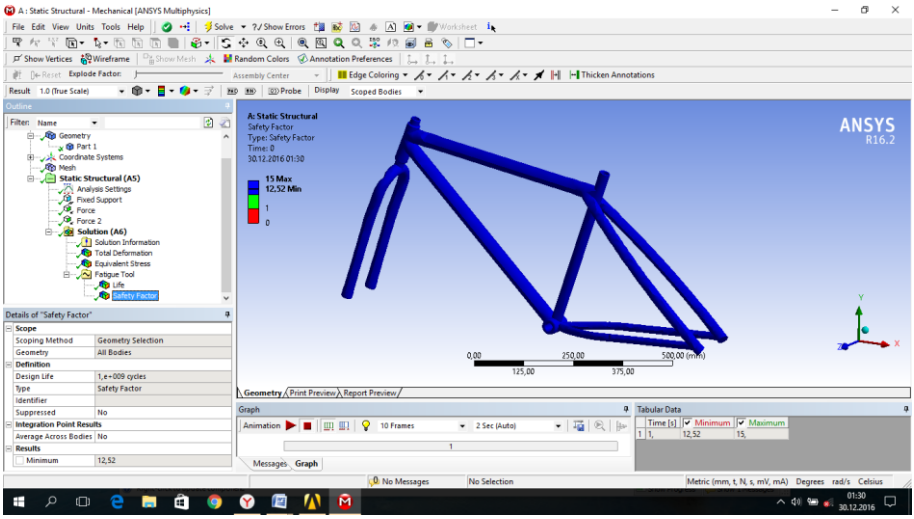
Analiz "Godman" yaklaşımı metodu kullanılarak yapılmıştır. "Godman" tablosu aşağıda verilmiştir.



Şekil 57. Yorulma Analizinde Kullanılan Godman Grafiğinin Gösterimi



Şekil 58. Yorulma Analizi Uygulanan Kadronun Ömür Döngüsünün Değeri



Şekil 59. Yorulma Analizi Sonucunda Safety Faktör Değerinin Bulunması

Elde edilen sonuçlara göre bisikletin yorulma analizinde kadronun bu kuvvetler etkisindeki ömrü 2e6 olarak görülmektedir. Güvenlik faktörü ise 12 değerlerinde çıkmaktadır. Bu değer çelik malzeme için sonsuz kullanım anlamına gelmektedir.

İzlenilen yol itibariyle ilk amacımız kadronun malzemeye bağlı kalmaksızın mukavemetini arttırmaktı. Kadro üzerindeki gerilme değerlerini olabildiğince dikey parçalar üzerinde yoğunlaştırarak yatay parçaların kırılmasının önüne geçmekti çünkü kadro üzerindeki uygulanan kuvvetler yer eksenine dik olan y ekseni üzerindeydi. Bu sayede dikey parçalar üzerine gelen kuvvetleri esneyerek yatay parçaların kırılmasını engelleyecekti ve bunu büyük ölçüde tamamladı. 340mm uzunluğundaki sele pedal arasındaki kadro üzerinde statik ve dinamik analiz sonucunda 5MPa değerinde gerilme çıkmakta bu değerler altında static analiz sonucunda 0.01mm değerinde aşağı yönde ilerleyerek deformasyon görülmekte, dinamik analiz sonucunda ise aynı yönde 0.006mm değerinde bir yer değiştirme görülmektedir. 340mm uzunluğundaki bu parça için bu değerler statik analizde %0.0029 dinamik analizde ise %0.0017 uzamaya eşittir. Bu değerleri karşılayabilecek malzeme değerleri arasında en hafif ve uygun fiyatlı olan malzeme seçilir.

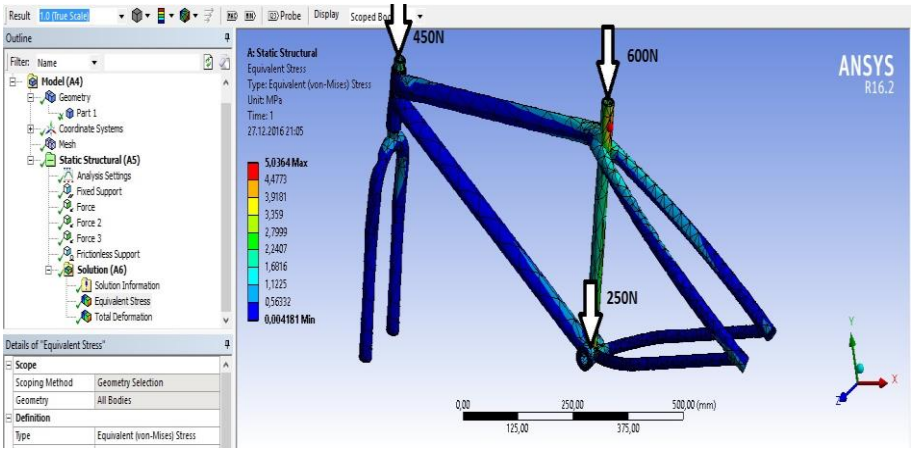
Tasarımın son halinin ağırlığının azaltmak için malzemesini daha hafif olan alüminyum olarak alınır.

$V_{gövde}$=0,946 cm^3

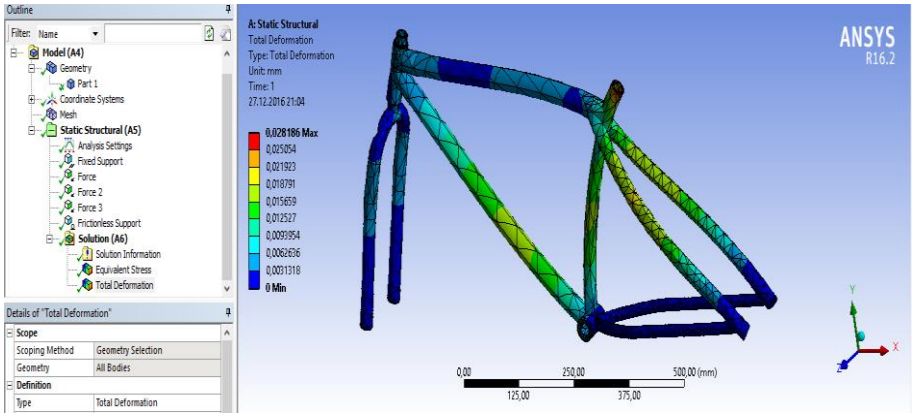
$d_{alüminyum}$=2,78 g/cm^3

$m_{gövde}$= ($d_{alüminyum}$) x ($V_{gövde}$)→(2,78 g/cm^3) x (0,946 cm^3)=2,62 kg

Gövde metal alındığında 7,43 kg gelmişti alüminyum alındığında 2,62 kg' a düşmüştür. Şimdi ise bu alüminyum gövdeye gerekli kuvvetler uygulandığı zaman elde edilen sonuçlar ise aşağıdaki gibidir.



Şekil 60. Yenilenen Kadronun Sele Üzerinden 600N Gidondan 450N Pedal Bağlantısından 250N Uygulanan Kuvvetlerin Kadro Üzerindeki Stres Dağılımı



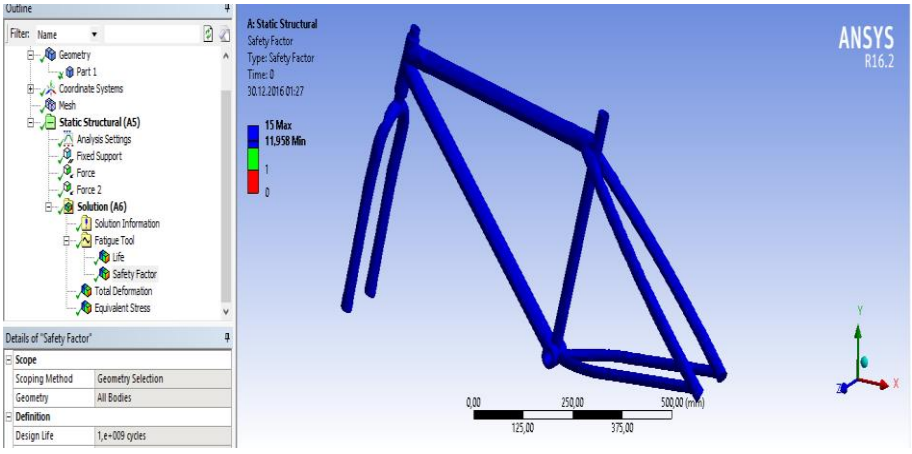
Şekil 61. Yenilenen Kadronun Sele Üzerinden 600N Gidondan 450N Pedal Bağlantısından 250N Uygulanan Kuvvetlerin Kadro Üzerindeki Stres Dağılımı

Uygulanan kuvvetler ile en yüksek gerilme 5MPa değerinde en yüksek deformasyon miktarı ise 0,028mm değerindedir.İlk modelde malzeme olarak metal seçilmesine rağmen 0,021mm olan en yüksek deformasyon miktarı son tasarım ve

alüminyum malzeme ile 0,028mm değerindedir. Bu demek oluyor ki uygun tasarım ve montaj ile daha dayanıksız malzemeler olsa bile yakın mukavemetli ürünler elde edilebilir. Önemli olan parçanın hangi yükler altında ne kadar çalışacağıdır.Sonuç olarak tasarım üzerinde yapılan değişiklikler ve uygun şekilde montajı sonrası bisiklet gövde ağırlığı %64 oranında azaltıldı ve dayanıklılığından sadece %26 kaybetti.Alüminyum kadroya son olarak yorulma analizi yapıldığında ömrü 1e8 çıktığı görülmektedir. Güvenlik faktörü ise 10 değerlerinde çıkmaktadır. Bu sonuçlar alüminyum malzeme için sonsuz kullanım anlamı taşımaktadır.



Şekil 62. Al Malzeme Kadronun Ömür Döngüsünün Gösterimi



Şekil 63. Al Malzemeli Kadro ile Safety Faktor Değerinin Gösterimi

SONUÇ

Projenin içerisinde yapılan tasarım iyileştirmeleriyle ve doğru malzeme seçimiyle bisiklet kadrosu üzerine etki eden kuvvetleri istenilen şekilde dağıtıp daha uzun ömürlü, konforlu ve dayanıklı bisiklet kadroları üretilebilir. Nitekim yapılan analizler sonucunda bisiklet kadrosunun da dayanıklılığı %64 oranında artmıştır ve proje amacına büyük ölçüde ulaşmıştır. Daha önceki yapılan benzer araştırmalarda bisikletin ve sürücünün ağırlık merkezi değiştirmeye odaklı çalışmalar vardır. Bu sayede kadro üzerine etki eden kuvvetleri dağıtmak amaçlanmıştır, ancak bu projede maksimum gerilme değerleri bulunarak kırılması, çatlaması (kullanılamayacak hale gelecek şekle gelmesi durumu) gibi durumlar olma olasılığı en yüksek olan noktaları tespit ederek bu noktalardaki gerilim değerlerini dağıtmak amaçlanmıştır. Bu sayede maksimum gerilme değerleri azaltılmış ve dayanıklılık arttırılmıştır.

KAYNAKÇA

Agarwal, A. Ziemke, D., and Nagel, K. 2019. Bicycle superhighway: An environmentally sustainable policy for urban transport. Transportation Research Part A: Policy and Practice.

Baker J , S Cobley, J Schorer - Talent Identification and Development in Sport: International Perspectives, International Journal of Sports Science & Coaching, 7 (1) : 177- 181, 2012.

Bernabei T.WielingaR.Cowher P. “Bisiklet” Akılçelen Kitaplar Yayınevi,2014,Ankara

Covill, D. et al. 2016. An Assessment of Bicycle Frame Behaviour under Various Load Conditions Using Numerical Simulations. Procedia Engineering, 147, 665-670

Erdem M., Gök K., Tümsek M., Gök A., (2019) “Bir Bisiklet Gövdesinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Statik Analizi” Fen Bilimleri Dergisi DOI: 10.35193

International Congress of Athletic Performance & Health in Sports “Cyclist” s:18-22 24-27 Ekim 2019

Karataş, Ç.A. and Çelik, O.C. 2017. Design, fabrication, and cyclic behavior of aluminum alloy core buckling restrained braces (BRBs). Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 23(6), 659-670.

Kreimer J.C. “Bisiklet.Zen” Atay A. Habitus Kitap Yayınları, 2015, İstanbul s:29

Liu, T.J.-C. and Wu, H.-C. 2010. Fiber direction and stacking sequence design for bicycle frame made of carbon/epoxy composite laminate. Materials & Design, 31(4), 1971-1980.

“Tekerlek İzi” Sayı:6 Mart-Nisan, 2009 Baskısı s:4-8

Tevfik A. “Yüz Yıl Önce Bisikletle Bursa” 1.Baskı, Sentez Yayınları, 2007, Bursa

Xiang, Z.X. et al. 2008. Vibrant comfort-based parameterization for mountain bike rear suspension. Tianjin Daxue Xuebao (Ziran Kexue yu Gongcheng Jishu Ban)/Journal of Tianjin University Science and Technology, 41, 685-689.

İNTERNET KAYNAKÇA

http://hayatbisiklet.com/

http://www.performansbisiklet.com/index.php?dispatch=pages.view&page_id=34

https://pixabay.com/tr/photos/bisiklet-ansiklopedi-ride-693776/

https://tr.wikipedia.org/wiki/Bisiklet

BÖLÜM 20
ÇATI TİPİ KLİMALARDA EKOTASARIM KRİTERLERİ ve SEZONSAL VERİMLİLİK

Doç. Dr. Ayhan ONAT[1], Mehmet Onur OKUDAN[2]
[1]Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İstanbul / TÜRKİYE
[2]Ford Otosan A.Ş., İstanbul / TÜRKİYE

Öz: Küresel ısınmanın Dünya üzerindeki etkileri her geçen gün artmaktadır. Küresel ısınma artışının hızlanmasını önlemek için regülasyonlar yayınlanmakta ve bu regülasyonlarla üretici firmaların ürünlerini geliştirmeleri ve alternatif çözümler bulmaları istenmektedir. Bu regülasyonlarla çevre kirliliğinin azaltılması ve aynı zamanda ürünlerin verimliliklerinin arttırılması hedeflenmektedir. R-410A günümüzde çatı tipi klimalarda en yaygın olarak kullanılan soğutucu akışkandır. Ancak, yüksek GWP değerinden dolayı yakın gelecekte EU 517/2014 Regülasyonu'na göre kullanımı sınırlandırılacaktır. R-452B, R-454B ve R-32, R-410A'nın yerini alma olasılığı en yüksek olan alternatif soğutucu akışkanlardır. Bu bölümde, R-32 soğutucu akışkanının kullanıldığı bir örnek ile beraber Commission Regulation EU 2016/2281 de dikkate alınarak, EN 14825'e göre sezonsal verimliliklerin nasıl hesaplanılacağı anlatılmıştır.

GİRİŞ

Ülkemizde ve Dünya'da iklim değişikliğinin etkileri her geçen gün daha da hissedilmektedir. Bu nedenle sistemlerin verimlilikleri ve doğaya verdikleri tahribat büyük önem arz etmektedir. Çeşitli sivil toplum örgütleri ve hükümetler sistemlerin verimliliklerinin arttırılması ve doğaya verilen tahribatın en aza indirilmesi için çalışmalar yapmaktadır. Bu yönde atılan adımlardan bir tanesi de Avrupa Birliği tarafından 30 Kasım 2016'da yayınlanan 2016/2281 numaralı ekotasarım gereklilikleri regülasyonudur (Commission Regulation (EU) 2016/2281, 2016). Bu regülasyonda birçok ürün grubu için enerji verimliliği kriterine yönelik minumum zorunlu gereklilikler tanımlanmıştır. Bu gereklilikleri sağlamayan ürünlerin belirli bir takvim içerisinde Avrupa'ya girişleri yasaklanmıştır. Çatı tipi klimaların da dahil olduğu ısıtma ve soğutma ürünleri için 1 Ocak 2018 tarihinde

ilk hedef verimlilik değeri yürürlüğe girmiş olmakla birlikte belirtilen ikinci zorunlu hedef verimlilik değeri 1 Ocak 2021 tarihinde geçerli olacaktır. Bu nedenle çatı tipi klima üreticileri cihazlarının verimliliklerini artttırmak için çalışmalar yapmaktadır. Sistem ekipmanlarının verimliliklerini arttırılması ile beraber göz önünde bulundurması gereken bir diğer kriter, EN 517/2014 numaralı F-gaz regülasyonudur (Regulation (EU) No 517/2014, 2014). Regülasyonun amacı küresel ısınmaya yönelik olumsuz etkilerinden dolayı HFC soğutucu akışkanlarının kullanımının azaltılmasıdır. 1 Ocak 2015'te yürürlüğe giren regülasyon ile beraber 2030 yılına kadar HFC kullanımının %79 oranında azaltılması hedeflenmektedir. Dolayısı ile mevcut soğutucu akışkanların yerine geçebilecek yeni soğutucu akışkanlar ile ilgili çalışmalar da yapılmaktadır.

Sistemlerin enerji verimliliği, bir başka deyişle doğaya verdikleri tahribat ve güç tüketimleri uzun yıllar ilgili sistemin tek bir noktadaki (şarttaki) verimliliğine bakılarak değerlendirildi. Fakat teknolojinin gelişmesi ve toplumların bilinçlenmesi ile beraber kullanıcılarda bu enerji tüketim miktarlarını anlık olarak sorgulama ve öğrenme ihtiyacı doğdu. Bugün kullandığımız birçok cihazda olduğu gibi çatı tipi klimalarda da anlık olarak bu değerler ölçülebilmekle beraber kullanıcıya veri transferi yapılabilmektedir.

Yayımlanan 2016/2281 regülasyonu ile beraber daha önce ısıtma sezonu için 7 °C dış ortam sıcaklığına ve soğutma sezonu için 35 °C dış ortam sıcaklığına göre belirlenen cihaz performansları belirten, ısıtma sezonu için COP, soğutma sezonu için ise EER değerleri geçerliliğini kaybetmiştir. Bunların yerine bu sıcaklıkların dışında farklı sıcaklık noktalarında da cihaz performanslarının ölçülerek gerçeğe daha yakın verimlilik değerlerini gösteren ısıtma sezonu için SCOP (Seasonal Coefficient of Performance) ve soğutma sezonu için SEER (Seasonal Energy Efficiency Coefficient) değerlerinin dikkate alınacağını bildirmiştir.

SOĞUTUCU AKIŞKAN ÖZELLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

İnsanlar ihtiyaçlarını karşılamak için her zaman yeni teknolojiler geliştirerek başta yiyecek ve içeceklerini korumak, konforlu yaşamak ve ürünlerini daha sağlıklı muhafaza etmek için soğutma ve iklimlendirme alanında büyük atılımlar yapmışlardır. Bu teknolojik gelişmeler sonucu ortaya çıkan soğutucu akışkanların atmosferin yukarı Strotosfer katmanında oluşan ozon tabakasını deldiği ve küresel

ısınmaya neden olduğu tespit edilmiştir. 1974 yılında Malina Rowland teorisi ortaya atıldıktan sonra ozon tabakasının delinmesi kamuoyunda tartışılmaya başlanmıştır. Maliba Rowland teorisinin ispatlanması kamuoyunu ozon tabakasının delinmesi konusunda daha hassas hale getirmiştir. 1985'de araştırma yapan bir NASA uydusunun gönderdiği veriler, bilim adamlarının tahminlerini doğrulamıştır. Antarktika üzerindeki ozon tabakasında oluşan deliğin varlığını kesin olarak ispatlamak için çeşitli ülkelerden araştırma ekipleri buzullardan ve güneşin zarar verici ültraviyole ışınlarından ölçümler almak üzere Antarktika'ya giderek ozon tabakasındaki deliğin varlığını belirlemişlerdir. Diğer bir ifade ile dünyamızı güneşten gelen zararlı ültraviyole ışınlarından koruyan ozon tabakasının CFC'ler tarafından yok edildiği anlaşılmıştır. Ayrıca soğutucu akışkanlar atmosfer tabakasında küresel ısınma etkisi göstererek dünyanın sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Gelecekte, dünyanın sıcaklığının artması nedeniyle kutuplarda buzulların eriyeceği ve bazı kara parçalarının sular altında kalacağı belirtilmektedir (Onat, İmal, İnan, 2004).

Artan çevresel bilinçle birlikte mevcut soğutucu akışkanların yerlerine alternatiflerinin geleceği şüphesiz bir gerçektir. Daha önceden olduğu gibi şu an kullanılan soğutucu akışkanların kullanımı azaltılacak ve daha sonrasında da üretimleri tamamen durdurulacaktır. Fakat bu soğutucu akışkanların yerlerine yenileri getirilirken dikkat edilmesi gereken parametreler vardır. Bu seçim kriterlerinin hepsini sağlayan bir soğutucu akışkan olmayacağı gibi, seçimler yapılırken uygulamadaki en kritik parametrelere göre tercihler yapılmalıdır.

Alteratif bir soğutucu akışkan belirlenirken öncelikle göz önünde bulundurulması gereken temel parametreler; çevresel etki, performans, sürdürülebilirlik, maliyet, sistem güvenliği, zehirlilik, yanıcılık, bulunabilirlik, nakliye, ekipman uyumu, ekipman çalışma bölgeleri, güvenlik standartlarına uygunluk ve cihaz enerji verimliliği olarak sıralanabilir. Bir sistemin soğutucu akışkanında değişikliğe gidilirken, sistem iyi değerlendirilmeli, hangi amaçla hangi şartlarda çalışacağı iyi bilinmeli ve pazar talepleri iyi anlaşılmalıdır.

Alternatif soğutucu akışkanların çevresel etkilerini değerlendirirken; ODP, GWP, TEWI ve LCCP değerleri dikkate alınmalıdır. Regülasyonlar ve yönetmelikler iyi takip edilmeli, standartlar iyi anlaşılmalıdır. Gelecekte uygunlanması planlanan soğutucu akışkan değişikliklerine üretici firmalar hazırlık yapmalıdır. Alternatif olarak kullanılacak soğutucu akışkanlar seçilirken kendisinden sonra

kullanılabilecek soğutucu akışkanlı sisteme dönüşümünün kolay olması da dikkate alınmalıdır. Mümkün olan en uzun vadeli çözüm ortaya konulmalıdır.

Bir soğutucu akışkana alternatif bir soğutucu akışkan önerirken dikkat edilmesi gereken en önemli parametrelerden biri de maaliyettir. Soğutucu akışkan değişiklikleri; soğutucu akışkanın maaliyetinden, sisteme bu soğutucu akışkanı adapte ederken olası kompanent değişikliklerine, sistem güvenliğini arttırmak için ek ekipmandan, yazılım güncellemesine kadar birçok değişiklik yüklü maaliyetlere yol açabilmektedir. Bir örnek verecek olursak, düşük miktarda atmosfere yayılmasının yanıcılık açısından problem oluşturmayacağı soğutucu akışkanlar, çatı tipi klimalarda kapasitesinin 300 kW'a kadar ulaştığı cihazlarda yüksek miktarlarda kullanılmaktadır. Olası bir kaçak durumunda sistemin kanallarla direkt mahale havayı göndermesinden dolayı yangın veya zehirlenme durumları büyük kazalara yol açabilmektedir. Bunların önüne geçmek için yapılacak adımlardan bazıları olan kaçak tespit cihazları, yazılım güncellemeleri veya geliştirilebilecek ön uyarı sistemleri büyük harcamalar gerektirecektir. Buna rağmen her soğutucu akışkan bu büyük sistemlerde kullanılamamaktadır. Başka bir örnek vermek gerekirse alternatif olarak kullanılacak soğutucu akışkanın termodinamik özellikleri yerine geçeceği soğutucu akışkanın özelliklerine ne kadar yakın olur ise sisteme adaptasyonu sırasında kompresör gibi büyük maaliyetli kompanentlerin değişikliklerine gerek duyulmayabilir (Okudan, Onat, 2020).

Günümüzde maalesef kompresörler için gerekli enerji çoğunlukla fosil yakıtların yanması sonucu karşılanmaktadır. Bu sebeple alternatif soğutucu akışkan ile sistemde yapacağımız bu değişikliğin kompresör gücüne etkisi doğru yorumlanmalıdır. Bu soğutucu akışkan değişikliği cihaz performansını mümkünse iyileştirmeli, en azından cihazın daha önce karşıladığı regülasyon şartlarını koruması sağlamalıdır. Ayrıca cihaz kapasitesinin düşmesi durumunda ise tölerans değerleri dışında kabul edilebilecek bir düşme ise nominal hava debisinde artışa gidilebilir. Fakat bu durumda da fan tarafından tüketilen güç miktarı artacağından, burada kapasite-güç tüketimi dengesinin kurulumuna dikkat edilmelidir. Bu çözümün de yeterli olmadığı durumlarda soğutucu akışkan şarj miktarında artışa gidilebilir, fakat bu da kompresörün güç tüketimini arttıracaktır. Tüm bunların dışında hala istenilen performans sağlanamıyorsa evaporatör ve/veya kondenser tasarımı değişikliğine gidilebilir (Okudan, Onat, 2020).

Yeni tasarımın sürdürülebilir olması bir diğer dikkat edilmesi gereken maddedir. Alternatif soğutucu akışkanın kullanılması beraberinde birçok yatırım ve iş

gücünü getirmektedir. Yapılan bu değişikliğin fizibilitesi doğru yapılmalıdır. Kullanılacak soğutucu akışkanın yasal düzenlemelere göre kaç yıl kullanılabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca sistemde yapılan bu değişikliğin diğer kompanentler üzerinde oluşturubileceği olası deformasyonların sistem ömrüne ne kadar etki edeceği iyi araştırılmalıdır. Örnek vermek gerekirse, bir kompresörün senede ne kadar süre ile maksimum devirde ve hangi basınçlarda çalışacağı sistemin hangi iklim bölgesinde kullanılacağına bağlı olarak değişmektedir. Bu gibi durumlarda kompresör ömrü için gerekli testler yapılmalıdır. Sahaya giden her ürün sorumluluğunu da beraberinde getirmektedir. Yıllar sonra başka bir soğutucu akışkana geçilse bile servis hizmeti verilmesi gerekebilmektedir. Bu gibi durumlar için en kötü senaryoda sistemin ne kadar çalışacağı iyi belirlenmeli, zorlayıcı hava koşullarında, yüksek sıcaklık ve basıncın ekipmanlar üzerindeki etkileri iyi yorumlanmalıdır. Sistemin çalışma ömrü ve yasal düzenlemelere göre kullanılma ömrü karşılaştırılmalıdır.

Her bir ekipmanın belirli çalışma aralıkları vardır. Sistemde bu derece büyük bir değişiklik yaparken tasarım kriterleri göz önünde bulundurularak ekipmanların çalışma bölgelerinde kalıp kalmadıkları kontrol edilmelidir. Yeni soğutucu akışkanın istenilen kapasite ve/veya verimliliği sağlaması için kompresörün devri yükseltilebilir. Ancak ihtiyaç duyulan yüksek basınç miktarının kompresör çalışma aralığında olup olmadığı ve/veya nasıl bir reaksiyon göstereceği önceden kontrol edilmelidir. Aynı şekilde istinilen kapasite ve/veya enerji verimliliğinin sağlanabilmesi için sistemin hava debisi arttırılabilir. Fakat sistemde kullanılan fanın bu hava debisinde sistem tasarım kriterlerinden önemli bir parametre olan hava basıncını sağlayıp sağlayamayacağı kontrol edilmelidir. Benzer kontrollerin genleşme vanası, dış ünite fanı gibi ana komponentlerde de yapılması gerekmektedir. Alternatif soğutucu akışkan seçiminde göz önünde bulundurulması gereken bir diğer parametre nakliyedir. Bu soğutucu akışkanların nereden ne şekilde tedarik edilebilecekleri, olası yasal düzenlemeler, tedarik süreleri ve güvenlik önlemleri gibi maddeler dikkate alınmalıdır. Bir soğutucu akışkanın yerine başka bir soğutucu akışkan konulurken, bulunabilirlik konusunda emin olunulmalıdır. İhtiyaç duyulması muhtemel süre zarfında bu soğutucu akışkanın elde edilmesinde ne gibi zorluklar yaşanabileceği ve kaynakların yeterliliği araştırılmalıdır.

Avrupa Birliği tarafından yayımlanan 2016/2281 ve EN 517/2014 F-gaz regülasyonları birbirlerinden ayrı olarak düşünülmemelidir. Doğaya verilen tahribatı azaltmak için bu regülasyonlarla üretici firmaları zorlayıcı hedefler konulmak

ile beraber sürekli gelişimin sağlanabilmesi adına yeni çalışma alanları yaratmaktadır. Mevcut sistemlerin sadece soğutucu akışkan değişikliği hedeflerin elde edilemeyebileceği bilinmektedir. Batarya (ısı değiştirici) teknolojisi, değişken hızlı kompresörler ile dış ve iç ünite EC fanlar sistemlerin verimliliklerini arttırmak adına gözönünde bulundurulması gereken temel ekipmanlardır (Okudan, Onat, 2020).

Artan müşteri beklentileri ve regülasyonlar ile konulan minumum verimlilik kriterleri ile birçok üretici firma için maliyet-performans dengesini korumakta zorlanmaktadır. Gerekli minumum verimliliklerin karşılanması adına sistem ekipmanlarında zorunlu olarak değişime gidilerek parça fiyatlarında artışa neden olmaktadır. Ayrıca yeni yatırım, test, doğrulama ve kalıp maliyetlerini beraberinde getirmektedir. Kullanılan yeni soğutucu akışkanlar sistem güvenliği açısından tehlike teşkil edebilmektedir. Bu sebeple de sistemlere yeni güvenlik ekipmanları da dahil edilebilecek olunması da göz önünde bulundurulması gereken bir diğer faktördür (Okudan, Onat, 2020).

Soğutucu akışkanlardan çalışma şartlarına ve kullanım amacına göre istenilen özelliklerin değişebileceği bilinmektedir. Soğutucu akışkanlarda istenilen özelliklerin hepsini bir arada yerine getiren akışkan bulmak elbette mümkün değildir. Bir soğutucu akışkandan genel anlamda istenen özellikler aşağıda verilmektedir.

- Çevre ile uyumlu olması,
- Çalıştığı sürece kimyasal kararlılığını devam ettirmesi,
- Sistemde kullanılan diğer malzemeler özellikle yağ ve filtre ile reaksiyon yapmamalı,
- Sistemde kullanılan ile karışım sağlamalı ama reaksiyon yapmamalı,
- Zehirleyici, yanıcı, yakıcı ve patlayıcı olmamalı,
- Donma sıcaklığı düşük olmalı,
- Isı iletim katsayısı yüksek olmalı,
- Buharlaşma ve yoğuşma gizli ısısı yüksek olmalı,
- Nem çözünürlüğü az olmalı,
- Küçük kaçaklarda bile tespit edilmeli,
- Yüksek gerilim olduğu zaman bile elektriği iletmemeli veya çok az iletmeli,
- Buharlaşma sıcaklığı istenilen değerlerde olmalı,

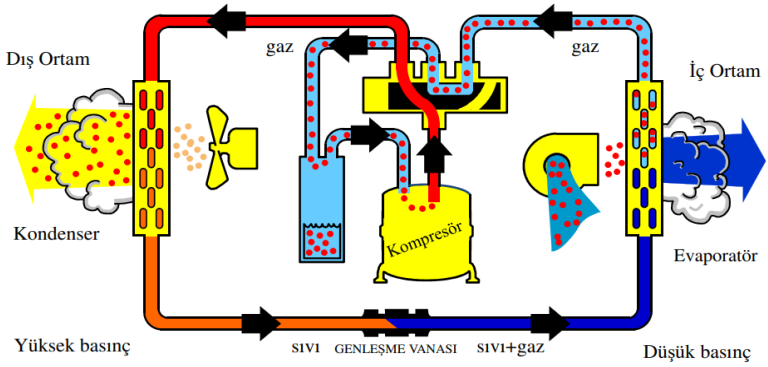
- Ucuz ve kolayca taşınabilmeli, yeniden kullanılmaya elverişli olmalı,
- Çabuk ve kolay temin edilmeli,
- Her yerde kolayca sisteme şarj edilmeli,
- Doma sıcaklığı düşük olmalı ve özgül hacmi küçük olmalıdır.

Bir soğutma sisteminde, uygulamadaki çalışma değerleri, emniyet, güvenilirlilik, çevre, sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği gibi kavramlar göz önüne alınarak akışkan seçimi yapılmalıdır. Soğutucu akışkanların çevresel özellikleri ile ilgili iki temel kavram vardır. Bunlar;

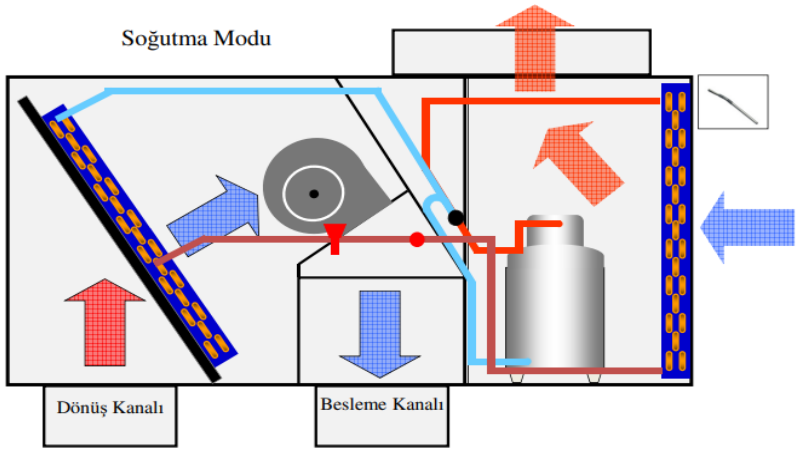
- ODP (Ozon Tüketme Potansiyeli, Ozone Depletion Potential): Bir soğutucu akışkanın ozon tabakasına verebileceği zararı ifade eder ve bağıl bir değer olarak bulunur.
- GWP (Küresel Isınma Etkisi, Globol Warming Potential): CO_2 gazının GWP etkisi 1 kabul edilerek belli bir zaman dilimi içerisinde bir sera gazının çevreye verdiği küresel ısınma etkisini CO_2 gazına bağlı bağıl olarak veren bir değerdir (İsa , Onat , 2012).

ÇATI TİPİ (ROOFTOP) KLİMA CİHAZLARI

Çatı tipi klima cihazları, genellikle alışveriş merkezlerinde, sinemalarda, tiyatrolarda, ofislerde kullanılan paket tipi iklimlendirme cihazlarıdır. Sadece soğutma veya yıl boyu çalışıp hem ısıtma hem de soğutma yapabilen ısı pompası seçenekleri mevcuttur. Piyasada genellikle genellikle 15-350 kW arasında çalışabilen cihazlar bulunmaktadır. İklimlendirmesi yapılan yapının genellikle çatısına konumlandırıldıkları için bu ismi almışlardır. Şekil 1'de görülebileceği gibi direkt genleşmeli soğutma çevrimi prensibi ile çalışırlar.



Şekil 1. Çatı Tipi Klimaların Çalışma Prensibi (Arslan, Akgül, 2016)



Şekil 2. Çatı Tipi Klima Şematik Gösterim (Arslan, Akgül, 2016)

Hastaneler gibi hava kalitesinin ve hızının çok önem kazandığı yerlerde tercih edilmemektedirler. Kurulumu kolay, montajı neredeyse tamamen fabrikada tamamlanmış olan tak-çalıştır cihazdır. Şekil 2'de de görülebileceği gibi şartlandırılan hava, mahallere besleme kanalları yardımı ile dağıtılır ve dönüş kanalları yardımı ile cihaza geri döner. Besleme kanallarına hava, basma fanı adı verilen iç ünite fanı ile gönderildiği gibi; kanallardaki basınç düşüşüne bağlı olarak dönüş kanalı tarafına da bazı projelerde dönüş fanı yereştirilebilir. Şekil 2'de gösterilen çevrim bir soğutma çevrimi olduğu için dış ünite kısmındaki kondenser fanının üzerinden hava geçirilerek soğutucu akışkanın yoğuşması sağlanır. Bunun için de genellikle aksiyel dış ünite fanları kullanılır. Şekil 2'de aynı zamanda defrost kontrolü için kullanılan termokupl şematik olarak gösterilmiştir. Bu termokupl ile batarya üzerindeki sıcaklık anlık olarak ölçülür ve belirlenen sıcaklık değerinin altına düştüğünde kışın cihaz bir süreliğine soğutma modunda çalıştırılır ve batarya üzerinde oluşan buzlanma çözülür.

Genel olarak yapıları iç ünite ve dış ünite olarak ikiye ayrılmıştır. Dış ünitede; dış ünite bataryası ve dış ünite fanı bulunmakla beraber, piyasadaki çoğu modelde burada kompresör de bulunabilmektedir. İç ünitede ise temel olarak iç ünite bataryası, iç ünite fanı ve filtre bulunmaktadır. İsteğe göre dönüş kanalına ek bir dönüş fanı eklenebilir. Soğutma çevriminin yönüne göre iç ve dış ünite bataryaları evaporatör ya da kondenser olarak çalışabilirler. Çatı tipi klimaların başlıca ekipmanları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Kompresör
- Kondenser (Yoğunlaştırıcı)

- Evaporatör (Buharlaştırıcı)
- Genleşme Vanası
- Dört Yollu Vana
- İç ünite Fanı
- Dış Ünite Fanı
- Kurutucu Filtre
- Gözetleme Camı
- Soğutucu Akışkan
- Kontrol paneli ve otomasyon cihazları

Çatı Tipi Klima Cihazları İçin Ekotasarım Kriterleri

Küresel ısınmanın etkilerini azaltmak için yayımlanan F Gaz Regülasyonu (EC 517, 2014) dışında enerji tüketimini de azaltmak için Avrupa Birliği Komisyonu tarafından enerji tüketen tüm cihazlar için ekotasarım regülasyonları yayınlanmaktadır. Bu regülasyonlar üretici firmalara cihaz verimliliklerini arttırmaları yönünde hedefler koymaktadır. Bu kapsamda 30 Kasım 2016 tarihinde Avrupa Parlamentosu ve Konseyi tarafından enerji tüketimi yapan hava ısıtma ürünleri, soğutma ürünleri, yüksek sıcaklık proseslerinde kullanılan chillerler ve fan coil üniteleri için ekotasarım kriterlerini kapsayan 2016/2281 sayılı Komisyon Tüzüğü yayınlanmıştır. Bu regülasyonla birlikte üretici firmalardan ürün fiyatlarında mantıksız bir fiyat artışı olmadan, ürünlerinin çevreye olan olumsuz etkilerini azaltmak adına verimliliklerinin arttırılması hedeflenmektedir.

Çatı tipi klima cihazları da bu regülasyondan etkilenen ürün gruplarındandır. Eskiden sadece tam yükteki verimliliklerine bakılan çatı tipi klima cihazlarında artık tüm sezonu kapsayan sezonsal verimlilik değerleri dikkate alınacaktır. Bu kapsamda sırasıyla 1 Ocak 2018'te yürürlüğe giren Tier 1 ve 1 Ocak 2021'de yürürlüğe girecek olan Tier 2 verimlilik hedefleri belirtilmiştir ve bu değerler Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Çatı Tipi Klimalar İçin Minimum Sezonsal Enerji Verimlilikleri

Verimlilik	Tier 1	Tier 2
$\eta_{s,h}$	115	125
$\eta_{s,c}$	117	138

Enerjilerin birbirleri arasındaki dönüşümleri sırasında bir miktar enerji kayıpları meydana gelmektedir. Sezonsal verimlilik değerleri hesaplanırken bu enerji kayıpları da dikkate alınmalıdır. Enerjinin birbirine dönüşümünü de dikkate alarak elde edilen sezonsal verimlilik değerleri, RS/6/C/007-2019'da da belirtildiği üzere (1) ve (2) numaralı eşitlikler kullanılarak hesaplanır (RS/6/C/007-2019, 2019).

$$\eta_{s,cool} = \frac{SEER\ x\ 100}{CC} - \sum \mathrm{F(i)} \quad (1)$$

$$\eta_{s,heat} = \frac{SCOP\ x\ 100}{CC} - \sum \mathrm{F(i)} \quad (2)$$

Burada belitilen CC (conversion constant), enerji dönüşüm katsayısı olarak tanımlanmıştır. Ekotasarım regülasyonu 2016/2281 sayılı tüzükte, Avrupa genelinde enerji santrallerinde bu dönüşümün ortalama %40 verimlilikte gerçekleştiğini ve CC katsayısının 2,5 alınabileceği belirtilmiştir. Eşitlik 1 ve Eşitlik 2'de belirtilen F(i) fonksiyonu, sıcaklık kontrollü cihazların enerji verimliliğine olan negatif etkisini sembolize etmektedir. Rating Standard for the Certification of Rooftop RS/6/C/007-2019'da bu fonksiyonun çillerler, klimalar, ısı pompaları ve havadan havaya rooftop cihazlar için %3 olarak alınabileceği belirtilmiştir. Elde edilen sezonsal verimlilik değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Çatı Tipi Klimalar İçin Minimum Sezonsal Verimlilik Değerleri

Sezonsal Verimlilik	Tier	Tier
SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio)	2,95	3,2
SCOP (Seasonal Coefficient of Performance)	3	3,53

ÇATI TİPİ KLİMALAR İÇİN EER ve COP HESAPLAMA YÖNTEMİ

EER (Energy Efficient Ratio) ve COP (Coefficient of Performance) yani Enerji Verimlilik Oranı ve Performans Katsayısı sırası ile soğutma ve ısıtma modlarında cihazların tam yükte yani tüm kompresörler %100 devirde çalışırken elde edilen kapasitenin harcanan güce oranlarıdır. Fakat gerçek hayatta cihazların bu

şekilde çalışma süresi yıl içindeki çalışma sürelerine oranla çok çok düşüktür. Dolayısıyla bu değer cihazın gerçek verimliliği konusunda bize doğru verileri vermemektedir. Artık tüketiciler tarafından da bu kavram sorgulanmakta olup, yeni cihazlarda sezonsal verimlilikler dikkate alınmaktadır.

Çatı tipi klima cihazlarda EER ve COP değerleri (3), (4), (5) ve (6) numaralı eşitlikler kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken sistem sınırları olarak sadece soğutucu akışkan devresi kabul edilmemiş, sistem sınırlarına hava tarafı performans verileri de eklenmiştir.

$$EER = \frac{Cihazın\ Net\ Kapasitesi\ [kW]}{Cihazın\ Çektiği\ Toplam\ Güç\ [kW]} \quad (3)$$

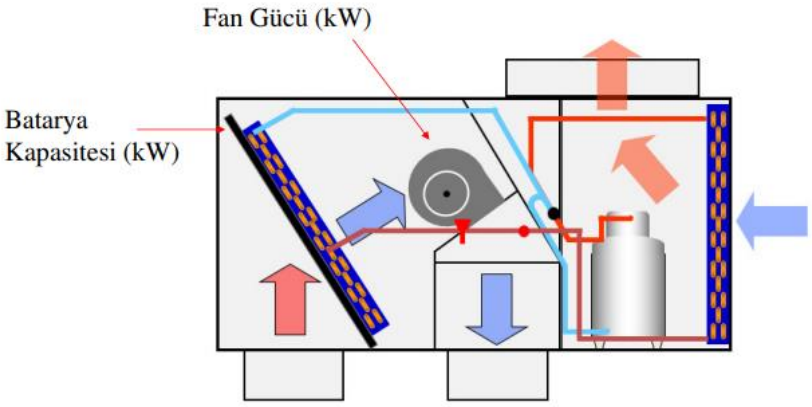
$$EER = \frac{İç\ Ünite\ Bataryası\ [kW] - İç\ Ünite\ Fanı\ [kW]}{İç\ Ünite\ Fanı [kW] + Dış\ Ünite\ Fanı [kW] + Kompresör [kW]} \quad (4)$$

$$COP = \frac{Cihazın\ Net\ Kapasitesi\ [kW]}{Cihazın\ Çektiği\ Toplam\ Güç\ [kW]} \quad (5)$$

$$COP = \frac{İç\ Ünite\ Bataryası\ [kW] + İç\ Ünite\ Fanı\ [kW]}{İç\ Ünite\ Fanı [kW] + Dış\ Ünite\ Fanı [kW] + Kompresör [kW]} \quad (6)$$

İç ünite fanı Şekil 3'te gösterildiği gibi ısıtma prosesinde pozitif, soğutma prosesinde ise negatif iş yapmaktadır. Hava şartları (3), (4), (5) ve (6) numaralı eşitlikler hesaplanırken ısıtma modu için dış ortam sıcaklığı 7 °C KT/6 °C YT, iç ortam 20 °C KT ve maksimum 15 °C YT, soğutma modu için dış ortam sıcaklığı 35 °C KT/-24 °C YT, iç ortam sıcaklığı 27 °C KT/19 ° C YT olarak belirlenmiştir.

Belirtilen ortam şartlarına göre (3) ve (4) numaralı eşiflikler kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen soğutma modu için EER değerleri Tablo 3'te gösterilen değer aralıklarına göre çatı tipi klimanının tam yükteki soğutma verimlilik sınıfları belirlenir.



Net Soğutma Kapasitesi: Batarya Kapasitesi - Fan Gücü

Net Isıtma Kapasitesi: Batarya Kapasitesi + Fan Gücü

Tablo 3. Havadan Havaya Çatı Tipi Klimaların EER Sınıfları

Enerji Verimlilik Sınıfı	Verimlilik Değeri
A	$3.00 \leq EER$
B	$3.00 \geq EER \geq 2.80$
C	$2.80 \geq EER \geq 2.60$
D	$2.60 \geq EER \geq 2.40$
E	$2.40 \geq EER$

Isıtma modu için de belirtilen ortam şartlarına göre (5) ve (6) numaralı eşitlikler kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen COP değerleri Tablo 4'te gösterilen değer aralıklarına göre çatı tipi klimanının tam yükteki ısıtma verimlilik sınıfları belirlenir.

Tablo 4. Havadan Havaya Çatı Tipi Klimarın COP Sınıfları

Enerji Verimlilik Sınıfı	Verimlilik Değeri
A	$3.40 \leq COP$
B	$3.40 \geq COP \geq 3.20$
C	$3.20 \geq COP \geq 3.00$
D	$3.00 \geq COP \geq 2.60$
E	$2.60 \geq COP$

Eskiden sadece tam yükteki verimliliklerine bakılan cihazlar için günümüzde bu veri önemini giderek kaybetmektedir. Yine de bazı ülkelerde regülasyonlarının gerektirdiği üzere tam yükteki verimliliğe bakılmaya devam edilmektedir. Ancak ilerleyen bölümlerde görülebileceği gibi tam yükteki verimliliğin hesaplandığı bu hava şartarında, cihazların yıllık çalışma saatleri tüm sezona oranla çok düşüktür.

SEER Kavramı ve Zorunlu Test Sıcaklıkları

SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio), soğutma modunda bir cihazın tüm sezon boyunca toplam verimliliğini ifade etmektedir. Eurovent bu sezonsal verimliliğin hesaplanabilmesi için *European standard EN 14825 Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance* standardını yayınlamıştır. Soğutma cihazları için 16 °C'nin üzerindeki mahallerden ısı çekilebileceği kabul edilmiştir. Eurovent 16 °C ve cihazın tam yük kapasitesinin kabul edildiği 35 °C arasında 4 farklı noktadan üretici firmaların Eurovent Sertifikası alabilmeleri için uygun laboratuvarlarda test edilmesini şart koşmuştur. Bu noktalarda olması gereken hava şartları Tablo 5'te gösterilmiştir. $T_{dizaync}$ sıcaklığı EN 14825'te soğutma modu için dış ortam sıcaklığı 35 °C KT ve 24 °C YT olarak belirtilmiştir. Bu dizayn sıcaklığına karşılık gelen kısmi yük oranları Kismi Yük Oranı sütunundaki formülle hesaplanarak, Kısmi Yük Oranı [%] sütununda belirtilmişlerdir. Tablo 5'in başlığında belirtilen $SEER_{on}$ aktif soğutma modunda zorunlu koşullarda test edilip hesaplanan sezonsal verimliliği ifade eder. Enerji tüketimi olarak sadece aktif durumdaki tüketimi dikkate alır. Kapalı termostat durumunda, bekleme modu veya karter ısıtıcının tükettiği enerjileri bu hesaplamanın dışında tutar. Birimi kWh/kWh'dir.

Tablo 5. "A" = Avarage (Ortalama) İklim Bölgesi-SEER ve $Seer_{on}$ Hesaplamaları İçin Kısmi Yük Oranları

	Kısmi Yük Oranı	Kısmi Yük Oranı [%]	Dış Ortam TKT [°C]
A	(35-16)/($T_{dizaync}$-16)	100	35
B	(30-16)/($T_{dizaync}$-16)	74	30
C	(25-16)/($T_{dizaync}$-16)	47	25
D	(20-16)/($T_{dizaync}$-16)	21	20

SCOP Kavramı ve Zorunlu Test Sıcaklıkları

SCOP (Seasonal Coefficient of Performance), ısıtma modunda bir cihazın tüm sezon boyunca toplam verimliliğini ifade etmektedir. Eurovent bu sezonsal verimliliğin hesaplanabilmesi için *European standard EN 14825 Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance* standardını yayınlamıştır. Isıttma cihazları için 16 °C 'nin altındaki sıcaklıklarda mahallerin ısı yükü ihtiyacı olacağı kabul edilmiştir. Soğutma modundan farklı olarak Eurovent Avrupa iklim bölgelerini 3 gruba ayırmıştır. Sıcak, Soğuk ve Ortalama olarak ayrılan bu bölgelerden herhangi biri için Eurovent, verimlilik hesaplamalarını kabul etmekte ve sertifika vermektedir. Tablo 6'da Avrupa ortalama sıcaklıktaki iklim bölgesi için referans değerler verilmiştir.

Tablo 6. "A" = Avarage (Ortalama) İklim Bölgesi-SCOP, $Scop_{on}$ ve $Scop_{net}$ Hesaplamaları İçin Kısmi Yük Oranları

	Kısmi Yük Oranı	Kısmi Yük Oranı [%]	Dış Ortam KT(YT) [°C]	İç Ortam KT
A	(-7-16)/($T_{dizavnh}$-16)	88	-7(-8)	20
B	(+2-16)/($T_{dizavnh}$-16)	54	2(1)	20
C	(+7-16)/($T_{dizavnh}$-16)	35	7(6)	20
D	(+12-16)/($T_{dizavnh}$-16)	15	12(11)	20
E	(TOL-16)/($T_{dizavnh}$-16)	-	TOL	20
F	($T_{bivalent}$-16)/$T_{dizavnh}$-16)	-	$T_{bivalent}$	20

Tablo 7'de ise Avrupa sıcak iklim bölgesi için belirlenen zorunlu test sıcaklık noktaları ve kısmi yük oranları gösterilmiştir.

Tablo 7. "W" = Warmer (Sıcak) İklim Bölgesi-SCOP, $Scop_{on}$ ve $Scop_{net}$ Hesaplamaları İçin Kısmi Yük Oranları

	Kısmi Yük Oranı	Kısmi Yük Oranı	Dış Ortam KT(YT) [°C]	İç Ortam KT
B	$(+2-16)/(T_{dizavnh}-16)$	100	-7(-8)	20
C	$(+7-16)/(T_{dizavnh}-16)$	64	2(1)	20
D	$(+12-16)/(T_{dizavnh}-16)$	29	7(6)	20
E	$(TOL-16)/(T_{dizavnh}-16)$	-	TOL	20
F	$(T_{bivalent}-16)/(T_{dizavnh}-16)$	-	$T_{bivalent}$	20

Tablo 8'de ise Avrupa soğuk iklim bölgesi için belirlenen zorunlu test sıcaklık noktaları ve kısmi yük oranları gösterilmiştir.

Tablo 8. "C" = Colder (Soğuk) İklim Bölgesi-SCOP, $Scop_{on}$ ve $Scop_{net}$ Hesaplamaları İçin Kısmi Yük Oranları

	Kısmi Yük Oranı	Kısmi Yük Oranı [%]	Dış Ortam KT(YT) [°C]	İç Ortam KT [°C]
A	$(-7-16)/(T_{dizaynh}-16)$	61	-7(-8)	20
B	$(+2-16)/(T_{dizaynh}-16)$	37	2(1)	20
C	$(+7-16)/(T_{dizaynh}-16)$	24	7(6)	20
D	$(+12-16)/(T_{dizaynh}-16)$	11	12(11)	20
E	$(TOL-16)/(T_{dizaynh}-16)$	-	TOL	20
F	$(T_{bivalent}-16)/(T_{dizaynh}-16)$	-	$T_{bivalent}$	20

$SCOP_{on}$, aktif soğutma modunda zorunlu hava şartlarında test edilip hesaplanan sezonsal verimliliği ifade eder. Enerji tüketimi olarak sadece aktif durumdaki tüketimi dikkate alır. Kapalı termostat durumunda, bekleme modu veya karter ısıtıcının tükettiği enerjileri bu hesaplamanın dışında tutar. Kısmi yük şartlarında ise

beyan edilen kapasitenin ısıtma ihtiyacının altında olduğu durumlarda sitemde ek bir elektrikli ısıtıcı varmış gibi elektrikli ısıtıcının tüketeceği enerji miktarı toplam enerji tüketim miktarına eklenir. Birimi kWh/kWh'dir. İklimsel olarak 3 farklı iklim bölgesine ayrılan Avrupa'da kabul edilen $T_{dizaynh}$ sıcaklıkları Tablo 9'da verilmiştir. Bu dizayn sıcaklığında belirtilen değerler tablolarda gösterilen Kısmi Yük Oranı sütunundaki formüllerde yerlerine konularak Kısmi Yük Oranı [%] sütununda gösterilen değerler bulunur.

Operasyon Limit Sıcaklığı (TOL), cihazın üretici firma tarafından beyan edilen çalışabileceği en düşük operasyon sıcaklığı olarak tanımlanır.

Tablo 9. Havadan Havaya Çatı Tipi Klima Cihazlarının Isıtma Sezonu $T_{dizaynh}$ Sıcaklıkları

	Dış Ortam KT(YT)	İç Ortam KT
$T_{dizaynh}$ "average" (Orta-	-10(-11)	20
$T_{dizaynh}$ "colder" (Soğuk)	-22(-23)	20
$T_{dizaynh}$ "warmer" (Sıcak)	2(1)	20

Bivalent Sıcaklığı ($T_{bivalent}$), cihazın gerek duyulan ısı yükünü ek elektrikli ısıtıcıya ihtiyaç duymadan kendi başına karşılayabildiği en düşük sıcaklık olarak tanımlanır. Bivalent sıcaklığına Eurovent tarafından EN 14825 ile iklim bölgelerine göre sınırlar getirilmiştir.

- Ortalama iklim bölgesinde $T_{bivalent} \leq +2$ C
- Soğuk iklim bölgesinde $T_{bivalent} \leq -7$ C
- Sıcak iklim bölgesinde $T_{bivalent} \leq +7$ C

Bivalent sıcaklık belirtilen sınır değerleri içerisinde seçilip, sistem dizaynları ve hesaplamaları bu değere göre yapılmalıdır.

SEER ve $SEER_{on}$ Hesaplama Yöntemi

Sezonsal Enerji Verimlilik Oranı (SEER), EN 14825'e göre yıllık soğutma ihtiyacının yıllık enerji tüketimine bölümü ile elde edilir. *Bu yıllık enerji tüketimi; cihazın aktif konumdaki, kapalı termostat durumundaki, bekleme modundaki, kapalı durumdaki ve karter ısıtıcının çalışır konumdaki* tükettiği enerji miktarlarını

kapsamaktadır. Çatı tipi klimanın soğutma sezonunda açık ve kapalı konumda tükettiği toplam enerji miktarı dikkate alınarak verimliliği (7) numaralı eşitlikle hesaplanabilir.

$$SEER = \frac{Qc}{\frac{Qc}{SEER_{on}} + H_{to}\ x\ P_{to} + H_{sb}\ x\ P_{sb} + H_{ck}\ x\ P_{ck} + H_{off}\ x\ P_{off}} \quad (7)$$

- Q_c : Yıllık soğutma ihtiyacı, [kWh]
- H_{to}, H_{sb}, H_{ck}, H_{off} : Sırasıyla kapalı termostat modunda, bekleme modunda, karter ısıtıcısı açıkken ve cihazın kapalı durumda operasyon saatleri, [h]
- P_{to}, P_{sb}, P_{ck}, P_{off} : Sırası ile kapalı termostat modunda, bekleme modunda, karter ısıtıcısı açıkken ve cihazın kapalı durumda enerji tüketim miktarları, [kW]

Referans yıllık soğutma ihtiyacı (Q_c) hesaplanırken tam yükteki kapasite, eşdeğer soğutma saati (H_{CE}) ile çarpılarak (8) numaralı eşitlikte gösterildiği gibi hesaplanır.

$$Q_c = P_{dizaync}\ x\ H_{ce} \quad (8)$$

Referans $SEER_{on}$ değeri (9) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$SEER_{on} = \frac{\sum_{j=1}^{n} hj\ x\ Pc\ (Tj)}{\sum_{j=1}^{n} hj\ x\ (\frac{Pc(Tj)}{EER_{PL}\ (Tj)})} \quad (9)$$

Tablo 5'te gösterilen A, B, C, D koşullarınında ölçülen EER değerleri kullanılarak ara değerlerde interpolasyon yapılır ve bu noktalardaki EER değerleri hesaplanır. A hava koşulunun üstündeki sıcaklıklarda EER değeri A hava koşulundaki EER değeri kabul edilir. D hava koşulunun altındaki sıcaklıklardaki EER değeri de D hava koşulundaki EER değeri kabul edilir. Tablo 10'da soğutma sezonu için SEER hesaplaması yaparken cihazların sıcaklık bazında yıllık operasyon saatleri belirtilmiştir.

Tablo 10. Soğutma Sezonu Yıllık Çalışma Saati–Sıcaklık Değerleri

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
T °C	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
H h	205	227	225	225	216	215	218	197	178	159	127	100	88	62	29	21	24	17	12	9	4	2	1	0

Şekil 4'de verilen soğutma sezonu sıcaklık frekansları grafiğine bakıldığında yoğun çalışma sıcaklık frekans aralığının 16 °C ile 25 °C arasında olduğu görülmektedir**.** Tablo 5'te gösterilen A hava şartlarında (tam yükte) elde edilen cihaz kapasitesi dizayn soğutma yüküne ($P_{dizaync}$) eşit olarak kabul edilir. B, C ve D şartlarında ise iki olasılık vardır:



Şekil 1. Soğutma Sezonu Sıcaklık Frekansları (Arslan, 2017)

1. Eğer beyan edilen cihaz kapasitesi gerekli soğutma yüküne eşit veya düşük ise, karşılık gelen EER_{DC} değeri kullanılır.

2. Eğer beyan edilen cihaz kapasitesi gerekli soğutma yükünden fazla ise, bu cihazın kısa sürelerle açılıp kapanacağı anlamına gelmektedir. Bu durumda düzeltme yapılarak EE_{PL} değeri (10) numaralı formülü ile hesaplanır.

$$EER_{PL(B,C,D)} = EER_{DC}\, x\, [1 - Cd\, x\, (1 - CR)] \quad (10)$$

- EER_{DC} : B, C ve D şartlarında beyan edilen kapasiteye karşılık gelen EER değeri
- Cd : Düzeltme katsayısı
- CR : Kapasite oranı

Test ile hesaplanmayan Cd değerleri, 0,25 olarak alınabilir. Test ile hesaplanmayan Cd değerleri, 0.25 olarak alınabilir (NF EN 14825, 2012). Kapasite oranı

(CR), aynı hava şartlarında talep edilen soğutma yükünün (Pc) beyan edilen cihaz kapasitesine oranıdır.

SCOP ve $SCOP_{on}$ Hesaplama Yöntemi

Sezonsal Performans Katsayısı (SCOP), EN 14825'e göre yıllık ısıtma ihtiyacının yıllık enerji tüketimine bölümü ile elde edilir. Bu yıllık enerji tüketimi, cihazın aktif moddaki, kapalı termostat durumundaki, bekleme modundaki, kapalı durumdaki ve karter ısıtıcının çalışır konumdaki toplam tükettiği enerji miktarlarını kapsamaktadır. Isıtma sezonsal verimliliği hesaplamak için (11) numaralı eşitlik kullanılır.

$$SCOP = \frac{Q_h}{\frac{Q_h}{SCOP_{on}} + H_{to}\ x\ P_{to} + H_{sb}\ x\ P_{sb} + H_{ck}\ x\ P_{ck} + H_{off}\ x\ P_{off}} \qquad (11)$$

- Q_h : Referans yıllık ısıtma ihtiyacı, [kWh]
- H_{to}, H_{sb}, H_{ck}, H_{off} : Sırasıyla kapalı termostat modunda, bekleme modunda, karter ısıtıcısı açıkken ve cihazın kapalı durumda operasyon saatleri, [h]
- P_{to}, P_{sb}, P_{ck}, P_{off} : Sırası ile kapalı termostat modunda, bekleme modunda, karter ısıtıcısı açıkken ve cihazın kapalı durumda enerji tüketim miktarları, [kW]

Referans yıllık ısıtma ihtiyacı, Q_h, (12) numaralı eşitlikle hesaplanabilir.

$$Q_h = P_{dizayn,h}\ x\ H_{he} \qquad (12)$$

Ek elektrikli ısıtıcının verimi dikkate alınarak (13) numaralı eşitlik ile Referans $SCOP_{on}$ ve ek elektrikli ısıtıcının verimi dikkate alınmadan da $SCOP_{net}$ değeri (14) numaralı eşitlik ile hesaplanır.

$$SCOP_{on} = \frac{\sum_{j=1}^{n} hj\ x\ Ph\ (Tj)}{\sum_{j=1}^{n} hj\ x\ (\frac{Ph(Tj) - elbu(Tj)}{COP_{PL}\ (Tj)} + elbu(Tj))} \qquad (13)$$

$$SCOP_{net} = \frac{\sum_{j=1}^{n} hj\ x\ (Ph\ (Tj) - elbu(Tj))}{\sum_{j=1}^{n} hj\ x\ (\frac{Pc(Tj) - elbu(Tj)}{COP_{PL}\ (Tj)})} \qquad (14)$$

elbu(T_j) : T_j sıcaklığına karşılık ihtiyaç kapasiteyi sağlamak için ek elektrikli ısıtıcının kapasitesi, [kW] Sıcak (W), Ortalama (A) ve Soğuk (C) iklim bölgelerine

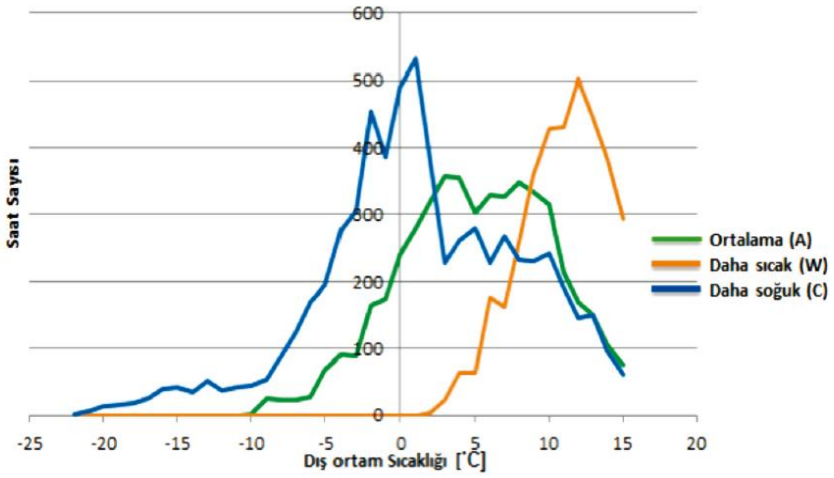
göre dış ortam sıcaklıklarına karşılık gelen yıllık operasyon saatleri Şekil 5'te gösterilmiştir.

j # 	T_j °C 	Warmer (W) hjW h	Average (A) hjA h	Colder (C) hjC h
1 to 8	-30 to -23	0	0	0
9	-22	0	0	1
10	-21	0	0	6
11	-20	0	0	13
12	-19	0	0	17
13	-18	0	0	19
14	-17	0	0	26
15	-16	0	0	39
16	-15	0	0	41
17	-14	0	0	35
18	-13	0	0	52
19	-12	0	0	37
20	-11	0	0	41
21	-10	0	1	43
22	-9	0	25	54
23	-8	0	23	90
24	-7	0	24	125
25	-6	0	27	169
26	-5	0	68	195
27	-4	0	91	278
28	-3	0	89	306
29	-2	0	165	454
30	-1	0	173	385
31	0	0	240	490
32	1	0	280	533
33	2	3	320	380
34	3	22	357	228
35	4	63	356	261
36	5	63	303	279
37	6	175	330	229
38	7	162	326	269
39	8	259	348	233
40	9	360	335	230
41	10	428	315	243
42	11	430	215	191
43	12	503	169	146
44	13	444	151	150
45	14	384	105	97
46	15	294	74	61
	total	3 590	4 910	6 446

Şekil 2. Isıtma Sezonu İklim Bölgelerine Göre Sıcaklık-Yıllık Operasyon Saatleri Değerleri (RS/6/C/007-2019, 2019)

Şekil 6'da ise ısıtma sezonu sıcaklık frekansları üç farklı iklim bölgesine göre grafiksel olarak gösterilmiştir. Tablo 6, Tablo 7 ve Tablo 8'de gösterilen hava koşulu "D"nin üzerindeki kısmi yük şartlarında COP_{PL} ve kapasite değerleri C ve D şartlarındaki değerler kullanılarak ekstrapolasyon yöntemi ile bulunur. Bazı soğuk iklimlerde eğer TOL (operasyon limiti) -20 °C sıcaklığın altında ise -15 °C sıcaklığında ekstra performans hesaplama noktası eklenir. Eğer cihaz kapasitesi gerekli ısı yükünden (P_h (T_j)) daha düşükse olsun ya da olmasın COP değeri 1'e eşit bir

elektrikli ısıtıcının sitemde olduğu varsayılır. Operasyon sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda cihaz çalışmaz. Cihazın kapasitesi operasyon sıcaklığının altındaki dış hava koşullarında 0 kW'tır. Kısmi yük koşulları olan A, B, C ve D noktarında iki ihtimal vardır.



Şekil 3. Isıtma Sezonu Sıcaklık Frekansları

Eğer beyan edilen cihaz kapasitesi gerekli ısı yüküne eşit veya küçükse karşılık gelen COP_{DC} değeri kullanılabilir. Eğer beyan eden cihaz kapasitesi ihtiyaç duyulan ısı yükünden fazla ise cihazın kapasite kontrolüne dayanarak COP_{PL} değeri (15) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$COP_{PL}(A,B,C,D) = COP_{DC}\, x\, [1 - Cd\, x\, (1 - CR)] \quad (15)$$

- COP_{DC}: A, B, C, D, hava şartları ile aynı koşularda beyan edilen kapasiteye karşılık gelen COP değeridir.
- Cd : Düzeltme faktörü
- CR : Kapasite oranı

Test ile hesaplanmayan Cd değerleri, 0,25 olarak kabul edilebilir (NF EN 14825, 2012).

Yıllık Operasyon Saatleri

2016/2281 numaralı ekotasarım kriterlerinde verilen çatı tipi klima cihazlarını da kapsayan iklimlendirme cihazları için iklim bölgelerine göre ısıtma ve soğutma sezonlarında cihazın sadece ısıtma, soğutma veya hem ısıtma hem soğutma yapmasına göre çalışma süreleri Tablo 11'de gösterilmiştir.

Tablo 10. Yıllık Operasyon Saatleri

Sezon		**Operasyon Saatleri**				
		Açık Konum	Termostat Kapalı Konum	Bekleme Konumu	Kapalı Konum	Karter Isıtıcı Konumu
		H_{CE} (soğutma); H_{HE} (ısıtma)	*H_{TO}*	*H_{SB}*	*H_{OFF}*	*H_{CK}*
Soğutma	Average	600	659	1 377	0	2 036
	Colder	300	436	828	0	1 264
	Warmer	900	767	1 647	0	2 414
Sadece Isıtma	Average	1 400	179	0	3 672	3 851
	Colder	2 100	131	0	2 189	2 320
	Warmer	1 400	755	0	4 345	5 100
Isıtma	Average	1 400	179	0	0	179
	Colder	2 100	131	0	0	131
	Warmer	1 400	755	0	0	755

ÖRNEK UYGULAMA

R-32 Soğutucu Akışkan Özellikleri

R-32, R-410A ile karşılaştırıldığında çevreye daha az zarar vermektedir. Günümüzde çatı tipi klima cihazlarında kullanılan R-410 A yerine kullanılması ön gürülen soğutucu akışkan R-32'dir. Bu nedenle örnek çözümlemesinde R-32 soğutucu akışkanı kullanılmıştır. R-32 soğutucu akışkanın genel özellikleri aşağıda sıralanmıştır (Yakut, 2013).

1. Ozon tabakasına zarar vermez. R-410A soğutucu akışkanı ile karşılaştırıldığında daha düşük küresel ısınma etkisine sahiptir.

2. Enerji verimliliği açısından R-410A soğutucu akışkanından daha verimlidir.

3. Yanıcılık özelliği düşük olduğu için birçok uygulamada talimatlara uyulması durumunda güvenli bir şekilde kullanılabilir.

4. Geri dönüşümü ve yeniden kullanılabilirliği kolaydır.

5. R-32 soğutucu akışkanının kritik sıcaklığının %8 daha büyük olmasından dolayı yüksek sıcaklıktaki ortam şartlarında R-410A'ya göre daha iyi performans göstermesi beklenmektedir.

6. R-32 soğutucu akışkanın sahip olduğu sıvı yoğunluğu R-410A ile karşılaştırıldığında %9 daha az olmasından dolayı sistem için gerekli soğutucu akışkan miktarı daha azdır. Tablo 12'de R-410A, R-32 ve diğer alternatif LGWP'a sahip soğutucu akışkanlardan R-452B ve R-454B'nin genel karşılaştırılması gösterilmektedir.

Tablo 12. R-410A ve Alternatiflerinin Karşılaştırılması

Özellikler	**R-410A**	**R-32**	**R-452B**	**R-454B**
Kategori	HFC	HFC	HFO	HFO
Karışım Oranları	R-32 %50 R-125 %50	-	R-32 %67 R-1234yf %26 R-125 %7	R-1234yf %65 R-32 %35
Kimyasal Formülü	CH_2F_2 CHF_2CF_3	CH_2F_2	CH_2F_2 $C_3H_2F_4$ CHF_2CF_3	$C_3H_2F_4$ CH_2F_2
Zehirlilik	Yok	Yok	Yok	Yok
Güvenlik Sınıfı	A1	A2L	A2L	A2L
GWP	1924	677	676	466
ODP	0	0	0	0
Kaynama Noktası (1 atm) [° C]	-51,44	- 51,65	- 50,67	-50,49
Kritik Sıcaklık [° C]	71,34	78,1	77,1	78,1
Kritik Basınç [kPa]	4790	5787	5267	5220
LFL [%]	-	14	12	11,25

R-32 Soğutucu Akışkanlı Sistemin SEER Değerinin Hesaplanması

SEER hesaplamsının daha net anlaşılabilmesi için örnek olarak Tablo 13'de A, B, C ve D hava şartlarında R-32 soğutucu akışkanlı bir çatı tipi klima cihazının performans verileri gösterilmiştir.

Tablo 13. R-32 için SEER Zorunlu Test Noktaları Performans Verileri

Zorunlu Test Noktaları	Dış Ortam Sıcaklığı [°C]	Kapasite [kW]	Güç Tüketimi [kW]	Belirtilen Kapasite EER_{DC}
A	35	79,13	23,22	3,41
B	30	64,03	16,15	3,97
		46,7	11,09	4,21
C	25	48,62	10,33	4,7
		23	5,15	4,47
D	20	23,41	3,87	6,05

Tablo 14'de ise bu kismi yük değerleri ve interpolasyon ile elde edilen kapasite ve güç değeleri ile beraber CR değerleri hesaplanmış ve D noktasında EER_{PL} değeri (10) numaralı formül kullanılarak elde edilmiştir. D noktasında bu düzeltme ile beraber EER değeri 6,05'ten 5,61'e düşmüştür.

Tablo 14. R-32 için Kısmi Yükte EER Hesaplama Tablosu

Zorunlu Test Noktaları	Dış Ortam Sıcaklığı [°C]	Kısmi Yük Oranı [%]	Talep Edilen Kapasite Miktarı [kW]	İnterpole Kapasite [kW]	İnterpole Güç Tüketimi [kW]	Cd	CR	Kısmi Yükteki EER (EER_{PL})
A	35	100	79,13	79,13	23,22	0,25	1	3,41
B	30	74	58,31	58,31	14,48	0,25	1	4,03
C	25	47	37,48	37,48	8,08	0,25	1	4,64
D	20	21	16,66	23,41	3,87	0,25	0,7	5,61

Tablo 15'te üst ve alt sıcaklık değerleri için ekstrapolasyon ve ara sıcaklık değerleri için interpolasyon yöntemleri ile tüm çalışma sıcaklıklarına karşılık gelen kapasite ve EER_{PL} değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen kapasite değerleri sı-

caklık değerlerine bağlı yıllık operasyon saatleri ile çarpılarak yıllık soğutma ihtiyaçları belirlenmiş ve daha sonrasında EER_{PL} değerlerine bölünerek yıllık enerji tüketim miktarları bulunmuştur. Yıllık sıcaklık frekanslarına göre çalışma saatleri dikkate alınarak cihaz açık konumdayken soğutma sezonsal verimlilik değeri (9) numaralı $SEER_{on}$ hesaplama eşitliği kullanılarak $SEER_{on}$ değeri R-32 soğutucu akışkanlı sistemde 4,57 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 15. R-32 için $SEER_{on}$ Hesaplama Tablosu

	Dış Ortam Sıcaklığı [°C]	Yıllık Çalışma Süresi [h]	Zorunlu Test Noktaları	Soğutma Yükü [kW]	EER_{PL}	Yıllık Soğutma İhtiyacı [kWh]	Yıllık Enerji Tüketimi [kWh]
1	17	205		4,16	5,61	854	152
2	18	227		8,33	5,61	1891	337
3	19	225		12,49	5,61	2811	501
4	**20**	**225**	**D**	**16,66**	**5,61**	3748	668
5	21	216		20,82	5,42	4498	830
6	22	215		24,99	5,22	5373	1029
7	23	218		29,15	5,03	6356	1264
8	24	197		33,32	4,83	6564	1358
9	**25**	**178**	**C**	**37,48**	**4,64**	6672	1438
10	26	158		41,65	4,52	6581	1457
11	27	137		45,81	4,39	6277	1428
12	28	109		49,98	4,27	5448	1275
13	29	88		54,14	4,15	4765	1148
14	**30**	**63**	**B**	**58,31**	**4,03**	3673	912
15	31	39		62,47	3,9	2436	624
16	32	31		66,64	3,78	2066	547
17	33	24		70,8	3,66	1699	465

18	34	17		74,97	3,53	1274	361
19	**35**	**13**	**A**	**79,13**	**3,41**	1029	302
20	36	9		83,3	3,41	750	220
21	37	4		87,46	3,41	350	103
22	38	3		91,63	3,41	275	81
23	39	1		95,79	3,41	96	28
24	40	0		99,96	3,41	0	0
				$SEER_{on}$	**4,57**	**75486**	**16528**

R-32 soğutucu akışkanlı sistemin ek güç tüketim miktarı hesaplaması Tablo 16'da verilmiştir. Yıllık operasyon saatleri Tablo 11'den alınanarak termostat kapalı konumdayken, bekleme modundayken ve karter ısıtıcı çalışırkenki enerji tüketim miktarları ile çarpılmış ve yıllık tüketim miktarları kWh cinsinden hesaplanmıştır.

Tablo 16. R-32 için Ek Güç Tüketimleri Tablosu

	Güç [kW]	**Yıllık Saat [h]**	**Yıllık Tüketim [kWh]**
P_{to}	0,34	659	225,38
P_{sb}	0,17	1377	234,09
P_{ck}	0,20	2036	407,20
P_{off}	-	0	0

Daha sonra SEER değeri hesaplamak için bilinmesi gereken bir başka değer olan yıllık soğutma ihtiyacı miktarı, Q_c, Tablo 11'den bulunan yıllık soğutma saati olan H_{ce} değeri ile R-32 soğutucu akışkanlı çatı tipi klimanın dizayn kapasitesi, $Pdizayn_c$, (8) numaralı eşitlikte yerlerine konularak 47480 kWh olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan Q_c, $SEER_{on}$ ve yıllık ek enerji tüketim değerleri (7) numaralı SEER hesaplama eşitliğinde yerlerine konularak, R-32 soğutucu akışkanlı çatı tipi klima sisteminin EN 14825 standardına göre sezonsal soğutma verimlilik değeri hesaplandığında SEER değeri 4,216 olarak bulunur.

$$P_{dizayn,c} = 79{,}13\ kW$$

$$H_{ce} = 600\ saat$$

$$Q_c = 47480\ kWh$$

$$SEER_{R32} = 4{,}216$$

R-32 Soğutucu Akışkanlı Sistemin SCOP Değerinin Hesaplanması

Örnek olarak verilen sistemde ısıtma sezonu için zorunlu tetst sıcaklıklarında testlerden elde edilen performans verileri Tablo 17'de gösterilmiştir. $T_{bivalent}$ sıcaklığı -4 °C olarak kabul edilen bu örnek için, bu sıcaklıktaki performans verileri de tabloya eklenmiştir. Ayrıca TOL sıcaklık değeri de $T_{dizaynh}$ sıcaklığına eşit kabul edilmiştir.

Tablo 17. R-32 için SCOP Zorunlu Test Noktaları Performans Verileri

Zorunlu Test Noktaları	Dış Ortam Sıcaklığı [°C]	Kapasite [kW]	Güç Tüketimi [kW]	Belirtilen Kapasite COP_{DC}
TOL=$T_{dizaynh}$	-10	53,90	20,60	2,62
A	-7	58,23	21,11	2,76
$T_{bivalent}$	-4	63,44	21,59	2,94
		47,58	16,19	2,94
B	2	57,01	17,16	3,32
		39,17	11,53	3,40
C	7	43,42	8,91	4,87
		21,55	4,85	4,44
D	12	24,74	5,03	4,92

Kısmi yük oranlarına karşılık gelen kapasite miktarları Tablo 18'de gösterilmekle birlikte interpolasyonla elde edilmiş kapasite ve güç verileri de hesaplanmıştır. Ayrıca CR oranlarına bağlı olarak COP_{PL} değerleri de (15) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve yine Tablo 18'de bu veriler gösterilmiştir.

Tablo 18. R-32 için Kısmi Yükte COP Değerleri

Zorunlu Test Noktaları	Dış Ortam Sıcaklığı [°C]	Kısmi Yük Oranı [%]	Talep Edilen Kapasite Miktarı [kW]	İnterpole Kapasite [kW]	İnterpole Güç Tüketimi [kW]	Cd	CR	COP_{PL}
TOL= $T_{dizaynh}$	-10	100	82,39	53,90	20,60	0,25	1,53	2.62
A	-7	88	72,88	58,23	21,11	0,25	1,25	2,76
$T_{bivalent}$	-4	77	63,38	63,38	21,57	0,25	1,00	2,94
B	2	54	44,36	44,36	13,17	0,25	1,00	3,37
C	7	35	28,52	28,52	6,14	0,25	1,00	4,64
D	12	15	12,68	24,74	5,03	0,25	0,51	4,32

Isıtma modunda cihazın açık konumda ek elektrikli ısıtıcının performansa etkisi dikkate alınarak hesaplanan $SCOP_{on}$ değeri ve ek elektrikli sıtıcının cihaz performansına etkisinin dikkate alınmadığı $SCOP_{net}$ değerlerinin hesaplanması iki tablo halinde gösterilmiştir. Tablo 19'da kısmi yük oranlarına bağlı ısı yükü ihtiyacı, interpolasyon ve ekstrapolasyonlarla cihazın bu gerekli ısı yükünü karşılayan kapasiteleri ve COP değerleri gösterilmiştir.

Tablo 19. R-32 için $SCOP_{on}$ ve $SCOP_{net}$ Değerleri

Zorunlu Test Noktaları	j	Dış Ortam Sıcaklığı °C	Operasyon Saati hj [h]	Kısmi Yük Oranı [%]	Isı Yükü İhtiyacı [kW]	Cihaz Kapasitesi [kW]	COP (Tj)
TOL	21	-10	1	100,00	82,39	53,90	2,62
	22	-9	25	96,15	79,22	55,34	2,66
	23	-8	23	92,31	76,05	56,79	2,71

A	24	-7	24	88,46	72,88	58,23	2,76
	25	-6	27	84,62	69,71	59,94	2,82
	26	-5	68	80,77	66,55	61,66	2,88
Tbiv	27	-4	91	76,92	63,38	63,38	2,94
	28	-3	89	73,08	60,21	60,21	3,01
	29	-2	165	69,23	57,04	57,04	3,08
	30	-1	173	65,38	53,87	53,87	3,15
	31	0	240	61,54	50,70	50,70	3,23
	32	1	280	57,69	47,53	47,53	3,30
B	33	2	320	53,85	44,36	44,36	3,37
	34	3	357	50,00	41,19	41,19	3,62
	35	4	356	46,15	38,03	38,03	3,88
	36	5	303	42,31	34,86	34,86	4,13
	37	6	330	38,46	31,69	31,69	4,39
C	38	7	326	34,62	28,52	28,52	4,64
	39	8	348	30,77	25,35	27,76	4,58
	40	9	335	26,92	22,18	27,01	4,51
	41	10	315	23,08	19,01	26,25	4,45
	42	11	215	19,23	15,84	25,50	4,38
D	43	12	169	15,38	12,68	24,74	4,32
	44	13	151	11,54	9,51	23,99	4,26
	45	14	105	7,69	6,34	23,23	4,19
	46	15	74	3,85	3,17	22,47	4,13
			4910				

Tablo 20’de elektrikli ısıtıcı ile karşılanan ısı miktarları ile cihaz ve elektrikli ısıtıcı kapasiteleri sıcaklığa bağlı yıllık kullanım saatleri ile çarpılarak yıllık ısıtma ihtiyacına olan katkıları elde edilmiştir. Güç tüketimleri de elektrikli ısıtıcılı ve elektrikli ısıtıcısız olarak elde edildikten sonra (13) ve (14) numaralı eşitlikler kullanılarak $SCOP_{on}$ ve $SCOP_{net}$ değerleri elde edilmiştir.

Tablo 20. R-32 için $SCOP_{on}$ ve $SCOP_{net}$ Değerleri

Zorunlu Test Nok-taları	Ek El-ektrikli Isıtıcı	Yıllık Isıtma İhtiyacı	Yıllık Elektrikli Isıtıcılı Güç Tüketimi	Yıllık Isıtma İhtiyacı	Yıllık Elektrikli Isıtıcısız Güç Tüketimi
	[kW]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
TOL	28,49	82	49	54	21
	23,88	1981	1116	1384	519
	19,27	1749	925	1306	482
A	14,66	1749	858	1397	507
	9,77	1882	838	1618	574
	4,89	4525	1789	4193	1457
Tbiv	0,00	5767	1963	5767	1963
	0,00	5358	1780	5358	1780
	0,00	9411	3054	9411	3054
	0,00	9320	2955	9320	2955
	0,00	12168	3772	12168	3772
	0,00	13309	4036	13309	4036
B	0,00	14196	4213	14196	4213
	0,00	14707	4058	14707	4058
	0,00	13537	3490	13537	3490
	0,00	10562	2555	10562	2555
	0,00	10457	2383	10457	2383
C	0,00	9297	2003	9297	2003
	0,00	8822	1927	8822	1927
	0,00	7431	1646	7431	1646
	0,00	5989	1346	5989	1346
	0,00	3406	777	3406	777
D	0,00	2142	496	2142	496
	0,00	1435	337	1435	337

	0,00	665	159	665	159
	0,00	234	57	234	57
Toplam		170185	48585	168169	46569
	$SCOP_{on}$	3,503		$SCOP_{net}$	3,611

Tablo 21'de verilen ortalama iklim bölgesi için ısıtma sezonunda termostat kapalı konumdaki, bekleme modundaki, karter ısıtıcı çalışırkenki toplam yıllık operasyon saatleri ve güç tüketim değerleri çarpılarak yıllık ek güç tüketim miktarları kWh cinsinden hesaplanmıştır.

Tablo 21. R-32 için Isıtma Ek Güç Tüketimleri

	Güç [W]	**Yıllık Saat [h]**	**Yıllık Tüketim [kWh]**
$\mathbf{P_{to}}$	0,72	179	129,60
$\mathbf{P_{sb}}$	0,17	0	0
$\mathbf{P_{ck}}$	0,32	179	57,28
$\mathbf{P_{off}}$	-	0	0

Cihaz dizayn kapasitesi daha önce 82.39 kW olarak belirtilen yük, ortalama iklim bölgesi ısıtma sezonu için yıllık çalışma saati değeri ile birlikte (12) numaralı eşitlikte yerlerine konularak yıllık ısıtma yükü 115345 kWh olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan Q_h, $SCOP_{on}$ ve yıllık ek enerji tüketim değerleri (11) numaralı SCOP hesaplama eşitliği kullanılarak R-32 soğutucu akışkanlı çatı tipi klima sisteminin EN 14825 standardına göre yıllık ısıtma verimlilik değeri hesaplandığında SCOP değeri 3.483 olarak hesaplanmıştır.

$$P_{dizayn,h} = 82{,}39\ kW$$

$$H_{he} = 1400\ saat$$

$$Q_h = 115345\ kWh$$

$$SCOP_{R32} = 3{,}483$$

KAYNAKÇA

Arslan V. (2017). Çatı Tipi Klimalarda Sezonsal Verimlilik Hesaplama Yöntemi, 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi İzmir.

Arslan V., Akgül B., (2016) "Çatı Tipi Klimalar Semineri", TTMD, Adana, https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/statik_sayfa_ekleri/%C3%87ATI%20T%C4%B0P%C4%B0%20K%C4%B0L%C4%B0MALAR.pdf. (ET: 5.10.2020)

Commission Regulation (EU) 2016/2281 (2016). Implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for setting of ecodesign requirements for energy-related products, with regard to ecodesign requirements for air heating products, cooling products, high temperature process chiller and fan coil units.

İsa K., Onat A. (2012), İklimlendirme ve Soğutma Sistemlerinde Enerji Verimliliği, 1. Baskı.

NF EN 14825 (2012). Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance.

Okudan M. O., Onat A. (2020). Çatı Tipi Klimalarda Kullanılan R410A ve Alternatifi Olan Soğutucu Akışkanların Analizi, Dergipark Cilt:32, Sayı:4, ss:507-520.

Okudan M. O., Onat A. (2020). Çatı Tipi Klimalarda R-410A Alternatifi Soğutucu Akışkanların Kullamının analizi, MÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Onat A., İmal M., İnan A.T. (2004). "Soğutucu Akışkanların Ozon Tabakası Üzerine Etkilerinin Araştırılması ve Alternatif Soğutucu Akışkanlar" KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi 7(1).

Regulation (EU) No 517/2014 of The European Parliament And of The Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2016.

RS/6/C/007-2019, Rating Standard for the Certification of Rooftop.

Yakut, A. (2013). Yeni Nesil Soğutucu Akışkan: R32, Intergovernmental Panel on Climate Change, Fourth Assessment Report.

BÖLÜM 21
ÇÖP ŞUTU SİSTEMİNİN KULLANIMI VE GÜNCEL TASARIMI

Kürşat TANRIVER[1], Dr. Öğr. Üyesi. Senai YALÇINKAYA[2]
[1]Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, İstanbul / TÜRKİYE
[2]Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, İstanbul / TÜRKİYE

Öz: Kentleşme artışına bağlı olarak oluşan fazla miktardaki atık, bazı gazları meydana getirmekte bu da sera etkisinin artmasına ve küresel ısınmaya neden olmaktadır. Şartların çevresel olarak daha da kötü hale gelmemesi için atıkların geri kazanımına ihtiyaç giderek artmakta ve buna bağlı olarak atık türlerine göre ayrıştırılması gibi temel tedbirlerin ortaya konulduğu çeşitli proses çözümleri zorunlu hale gelmektedir. Bu sistemleri daha kolaylaştırmak ve temiz geri dönüştürülebilir atık eldesi için atıkları en başta yani henüz kaynakta iken ayırmak gerekmektedir. Bu da binalarda her katta toplama odasının ve çöp atma kapaklarının bulunduğu çöp şutu sistemleri ile sağlanmaktadır. Aynı zamanda çöp şutlarınının, atıkların çevreye ve insan sağlığına verdiği zararı en aza indirmede faydalı bir sistem olduğu bilinmektedir. Buna ilave olarak pandemi sürecinde ise binalarda evsel atıkları toplamak ve olabildiğince zararsız bir şekilde biribirinden ayırma işlemi daha da önem kazanmaktadır. Çünkü mevcut çöp şutlarının temiz tutulmaması ve atıkların binalarda biriktirilmesinden dolayı salgın yayınımı riski olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Böylelikle evsel atıkların bertaraf edilmesi, geri kazanım ve çevre sağlığını korumada önemli bir yeri olan çöp şutu sistemlerinin, covid-19 pandemisi döneminde enfeksiyon yayılımını önlemek amacıyla geliştirilmesinin gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada sektörün önde gelen firmalarının tasarımları incelenmiş temel olarak buradaki çalışma prensiplerinden yola çıkılmıştır. Atık hacim ve statik gövde hesabının yanında pandemi sürecinde sistemin temizlenmesi için ek tasarımlar ilave edilerek çöp şutu revize edilmiş ve yeni bir tasarım geliştirilmiştir. Ayrıca sistemin çalışma şekli ve tanımlamaları yapılarak ekipman özellikleri paylaşılmıştır. Böylelikle, atıkların yaşam mahalinden emniyetli bir şekilde bertaraf edilmesi, insanların sosyal etkileşimlerini en aza

indirerek virüs kaynaklı enfeksiyon yayınımı asgari düzeye indirme indirmek amaçlanmıştır.

GİRİŞ ve AMAÇ

Katı atıklar, oluştukları yere göre yedi bölümde sınıflandırılmaktadırlar. Bunlar; evsel katı atıklar, endüstriyel atıklar, tehlikeli atıklar, özel atıklar, tıbbi atıklar, tarımsal ve bahçe atıkları, inşaat artığı ve moloz atıkları olarak belirtilmektedir (Gündüzalp, Güven, 2016). Evsel katı atıklar ise belediye hizmeti ile toplanıp taşınan, çöp depolama tesislerinde ayırma yolu ile geri kazanılabilen, kompost yapılabilen veya yakılabilen evsel ve endüstri kökenli atıklardır. Mutfak çöpleri, ambalaj atıkları, ofis çöpleri vb. atıklar bunlardandır (Sayar, 2012).

Fazla miktarda atık, bazı gazların oluşumu ile sera etkisinin artmasına ve küresel ısınmaya neden olmaktadır. Atık çevre açısından her zamankinden daha tehlikeli olduğu için, atıkların toplanması gerekmektedir. Bu durumun daha da kötüye gitmesini önlemek için atıkların ayrıştırılması gibi temel önlemler zorunludur.

Böylelikle atık yönetimi kavramı birçok idare tarafından geliştirilmiştir (Taherzadeh, Bolton, Wong, Pandey, 2019). Atık yönetimi, atıkların çevre kirliliğini en aza indirmek için toplanması, taşınması, işlenmesi, geri kazanılması, bertarafı ve denetlenmesi faaliyetleri olarak tanımlanmaktadır (Kayakutlu, Daim, Kunt, Altay ve Suharto, 2017). Bu tür atıklar geri dönüştürme fabrikalarında toplanmakta ve ayrıştırılarak geri dönüşüm süreçleri tamamlanmaktadır (Al-Salem, Lettieri, Baeyens, 2009).

Kişi başına üretilen atık miktarı küresel olarak artmaktadır (Jouhara ve diğ, 2017). Yeni atıklardaki yüksek metal konsantrasyonu, atık kaynağı ve yeni hurda oluşumunun devamlılığı yeni atıkların avantajları arasındadır (Zhang, Ding, Liu, Chang, 2017).

Geri dönüştürme işlemi hem çevre sağlığı açısından hem de yeniden üretim yapmaya göre maliyet anlamında fayda sağlamaktadır. Örneğin önemli bir küresel ticaret ürünü olan geri dönüştürülmüş kağıt, kağıt ve karton endüstrisi için en önemli hammadde olarak hacimce kullanılmaktadır (Ervasti, Miranda, Kauranen, 2016). Geri dönüştürülmüş kağıt, kağıt üretiminin ayrılmaz bir parçasıdır ve Avrupa'da önümüzdeki yıllarda bu geri dönüşüm için % 20' lik bir artış beklenmektedir (Pivnenko, Eriksson, Astrup, 2015).

Bahsi geçen atıkların işlenerek geri kazanılması öncesinde farklı yöntemlerle toplanarak bir çeşitli mekatronik sistemler vasıtasıyla türlerine ayrılmaktadır. Türlerine ayrılan bu atıklar ilgili geri dönüştürme fabrikalara gönderilerek oradaki işlemlerinin sonunda geri dönüşüm süreçleri tamamlanmaktadırlar. Atıklar geri dönüşüme gönderilmeden önce binalarda yani kaynağında toplanması gerekmektedir. Atıklar bina önlerinde çöp konteynerlerinden toplanıldığı gibi kurulan çöp şutu sistemleriyle de toplanabilmektedir. Çöp şutu sisteminin kullanılması daha temiz ve dolayısıyla daha kaliteli dönüştürülmüş atık eldesi anlamına gelmektedir.

KLASİK ÇÖP ŞUTU SİSTEMİ ve BÖLÜMLERİ

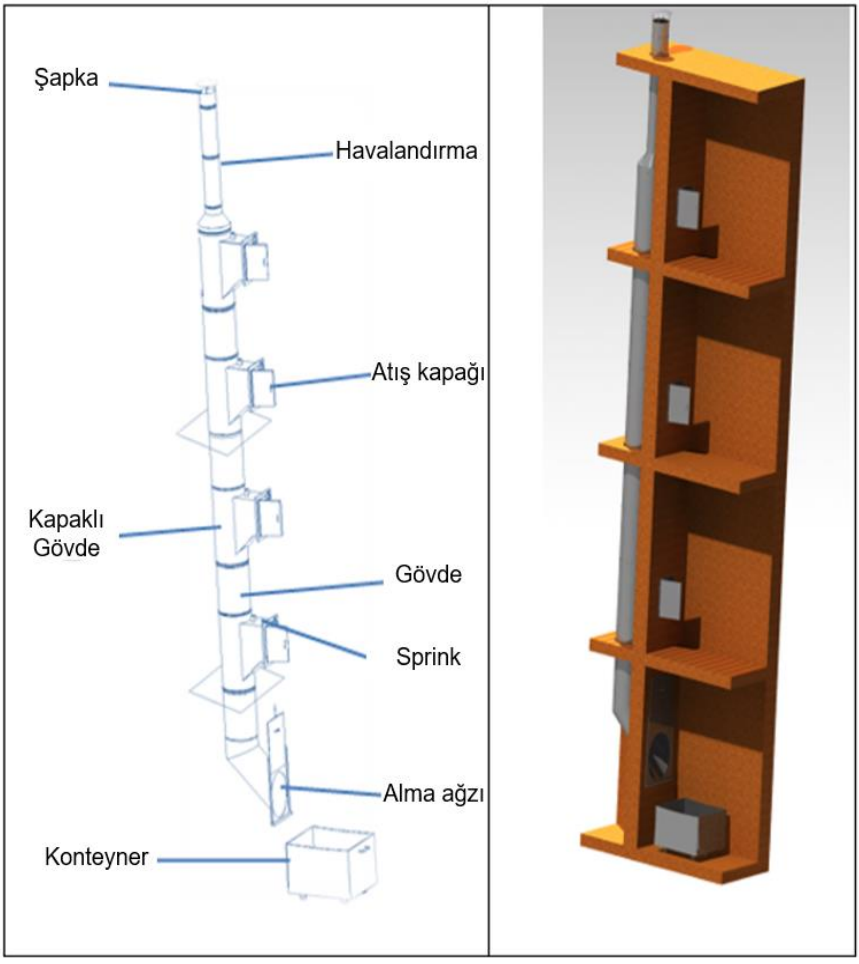
Atık ayırma baca sistemi de denilen çöp şutuları, katlarda veya bağımsız bölümlerde biriken atıkların alt katta bir kaba kolayca atılmasını sağlayan baca sistemleridir. Binanın uygun yerlerine düşey olarak yerleştirilen çöp şutları, bir binada kattan kata uzanan, bağımsız bölümlere birer boşaltma bölmesiyle bağlantılı açıklıkları olan ve havalandırmalı bir sistemdir (TSE K 569, 2019).

Atıkların diğer atıklarla birlikte geri dönüşümü ve atık biriktirme sahalarında toplanması, birbirinden ayrılmayı zorlaştırmaktadır. Bu ayırma işlemi için çeşitli teknolojik işlemlerden geçmek gerekir. Temiz olmayan atıklar, düşük maliyet ve yüksek kalitede geri dönüşüme engel olmaktadır. Kaliteli geri dönüşüm için, kaynakta ayırmayı daha iyi yönetmekten geçmektedir (Idumah, Nwuzor, 2019).

Bu işlemler için atıkların toplanması ve gerektiğinde atığın henüz kaynakta iken ayrılmasının gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Bu da binalarda çöp şutu sistemleriyle sağlanmaktadır.

Konutların yanısıra otellerde, hastanelerde, ticaret merkezlerinde kullanılan bu sitemlerin dünyada birçok örnekleri bulunmaktadır. Çok katlı binalarda kullanılması için çöp şutunun önemli hale gelmesi muhtemel bu sistemin yapılırken atıkların farklı türde ayrıştırıldığı çoklu ayıklayıcılı olarak atıkların ekonomiye daha net kazandırılması bakımından önerilmektedir.

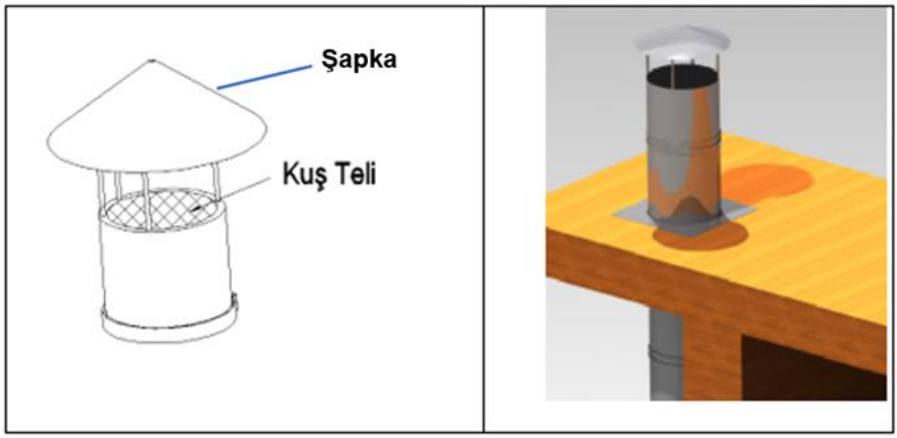
Çöp şutu; havalandırma şapkası, havalandırma bacası, atış kapağı, gövde, temizleme sistemi, alma ağzı ve konteyner bölümlerinden oluşmaktadır. İstenildiğinde çöp şutu sistemine ses ve ısı izolasyonu yapaılabilmektedir. Ayrıca yüksek yapıda bir binada kurulacak bir sistem ise atığın hızını kesmek ve daha yavaş konteynere inmesi için stop dirsekler kullanılabilmektdir. Çöp şutu sistemi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çöp Şutu Bölümleri

Çöp Şutu Havalandırma Şapkası ve Kuş Teli Tasarımı

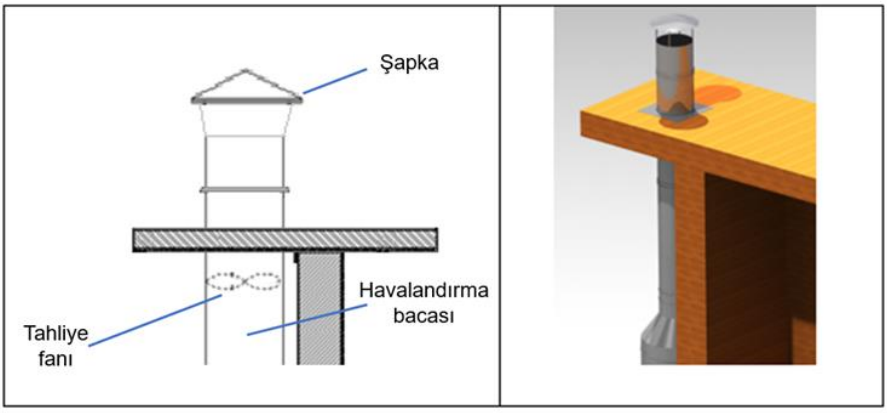
Havalandırma şapkası ve kuş teli sistemin en üst kısmına gelecek şekilde montajı yapılır. Dışarıdan gelecek yağmur suyunu engelleyen bir şapka şeklindedir. Bu şapkanın içine ayrıca ince örgülü elek tel konularak kuş, haşere vb canlıların içeri girmesi engellenmiştir. Çöp şutu havalandırma şapkası ve kuş teli Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Çöp Şutu Havalandırma Şapkası ve Kuş Teli

Havalandırma Bacası ve Tahliye Fanı

Çöp şutu sistemine havalandırma bacası ve tahliye fanı konulmuştur. Bu şekilde kullanıcı kapakları açıldığında fan çalışarak kullanıcının koku ve enfekte etkisine maruz kalmaması için tahliye fanı kullanılmıştır. Havalandırma bacası ve tahliye fanı Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Havalandırma Bacası ve Tahliye Fanı

Çöp Şutu Atış kapağı Tasarımı

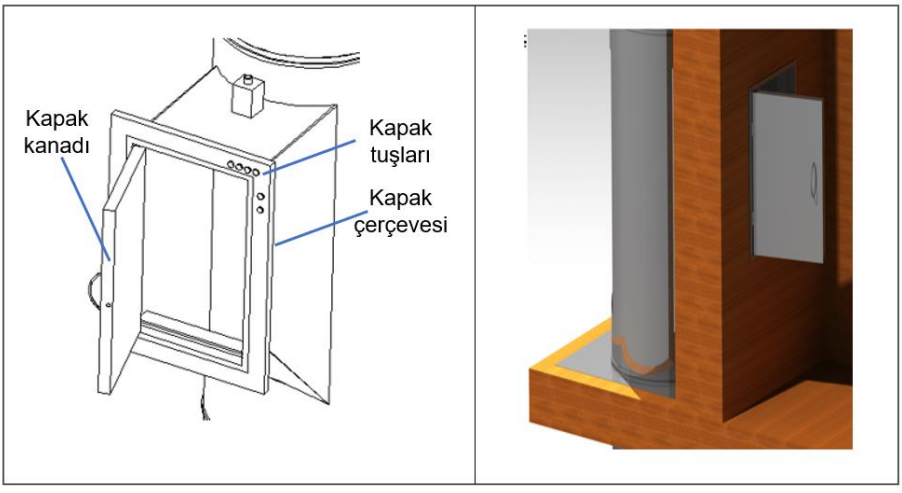
Çöp şutu atış kapağı, her kat için ayrı bir şekilde konularak tasarım gerçekleştirilmektedir. Tasarımda uygulanan kapakların tamamı otomatik olarak veya manuel olarak çalışabilmektedir. Bu tasarımda master key dediğimiz tek bir anahtarla çalışabilen bir sistem ön görülmüştür. Çalışma için anahtar bina görevlisinde bulunacak tüm katlardaki kapakları açabilecektir. Bu şekilde emniyetli çalışma ve

kullanım güvenliği amaçlanmıştır. Ayrıca talep edilirse, otomatik kilit kontrol sistemi kullanılarak tüm kapaklar bir PLC ünitesi ile kontrol edilebilmektedir. Bu şekilde herhangi bir kapak açıldığında diğer kapaklar kilitli kalması sağlanabilmektedir.

Kapaklar, otomatik kollar, mil, menteşe ile sağa veya sola ya da aşağıya doğru açılabilecektir. Kapakların yangın esnasında ilgili standardın gerektirdiği ölçütler çerçevesinde 1-1,5 saat yangına dayanıklı olması sağlanmıştır.

Görüldüğü gibi kapakların tasarımı oldukça önemlidir. Atıkları bertaraf etme amacı taşıyan bu sistemin başka felaketlere yol açmaması açısından oldukça iyi tasarlanması gerekmektedir.

Kapak tasarımı, ülkemizde ve Dünyada bazı standartlarda belirtilen testlere uygun olması gerekmektedir. Bunlar; BS 476 -BS5588 yangın ve duman sızdırmazlık testleri, TS EN 1634 yangın dayanım testi, UL yangın dayanım testi olarak karşımıza çıkmaktadır. Tasarım çalışmasında standartlarda belirtilen kriterler dikkate alınmıştır. Çöp şutu atış kapağı tasarımı ve uygulaması Şekil 4'te gösterilmiştir.



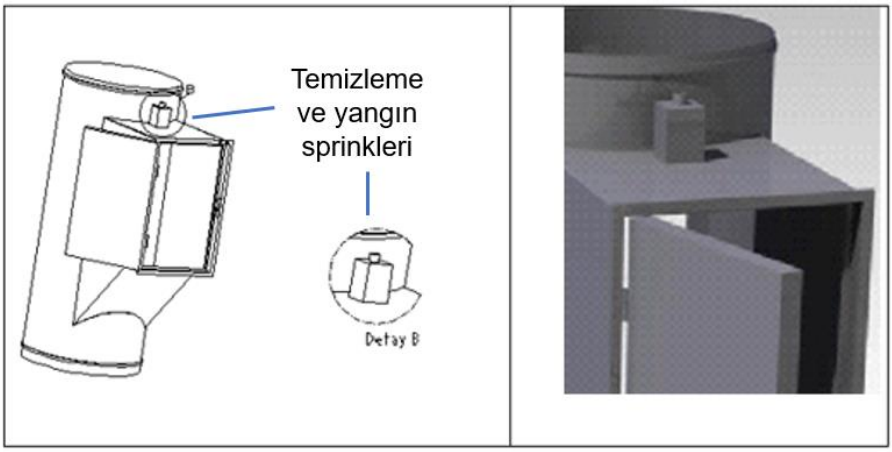
Şekil 4. Çöp Şutu Atış Kapağı Tasarımı ve Uygulaması

Gövde Tasarımı

Gövde kalınlığı ve yüksekliğine göre sistemin taşıyıcı statik hesabı yapılarak tasarlanmaktadır. Ayrıca atıklardaklardan korozif etkilere dayanıklı malzemeler kullanılmaktadır.

Sistem Temizleme ve Yangın Sprinkler

Sistem belirli periyotlarla temizlenmesi için kapakların üzerine sprink konulmuştur. Ayrıca bu sprinkler binanın yangın kontakt sistemine bağlanarak yangın esnasında su ile püskürtme yapılarak yangının söndürülmesi sağlanabilir. Sistem temizleme ve yangın sprinkleri tasarımı Şekil 5' te gösterilmiştir.

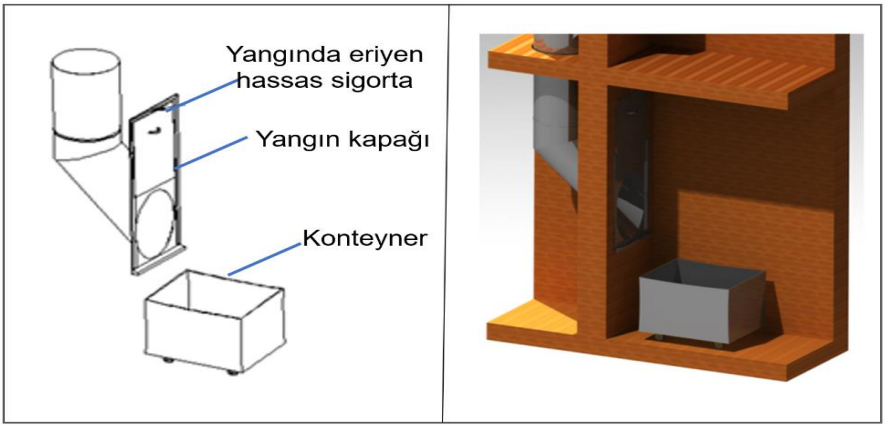


Şekil 5. Sistem Temizleme ve Yangın Sprinkleri Tasarımı

Çöp Şutu Alma Ağzı Tasarımı

Tasarımda alma ağzı istemin en alt kısmında bulumaktadır. Çöp şutu içerisinden atılan atıkları buradan taşıma konteynerine yönlendirmektedir. Çarpmanın etkisiyle deforma olacağı için takviye sacı tasarımı yapılması önerilmektedir. Yapılan tasarımda bu kriterlere uyularak hızla aşağıya inen atık kullanılan dirseğin alt bölümününde deformasyonlara sebep olmaması için ilave takviye sacı kullanılabilmektedir.

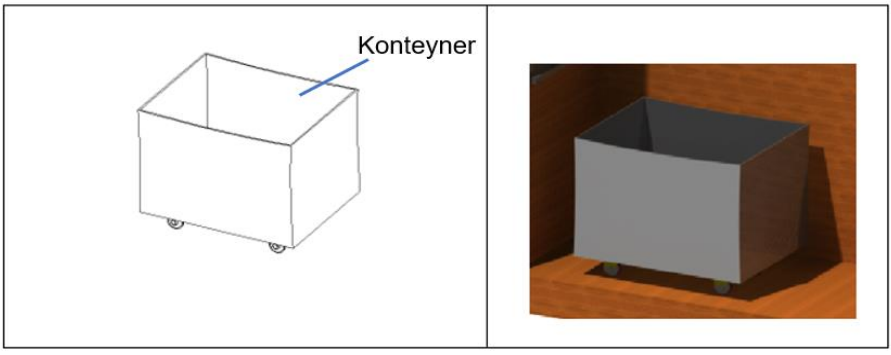
Bu sistemdeki kapakta atış kapakları bölümünde bahsedildiği gibi ilgili standardın gerektirdiği yangın ve duvar dayanımına uygun bir şekilde sağlanmalıdır. Yangından önce 65-70 ^{o}C sıcaklıklarında kapağın aşağıya inerek kapalı durum geçmesi sağlanmaktadır. Böylece duman tehlike anında (yangın durumunda) ve yangını istenen süre içerisinde engellemesi sağlanmıştır. Çöp şutu alma ağzı bölümü tasarımı Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Çöp Şutu Alma Ağzı Bölümü Tasarımı

Atık Taşıma Konteyneri

Çöp şutundan aşağıya atılan atıkların toplanması ve kolay taşınması için konteyner konulmuştur. İstenilen ebatlarda kullanım koşullarına göre üretici katoluğundan seçim yapılarak hazır ürün olarak bu konteynerler sipariş edilebilmektedir. Şekil 7'de gösterilen atık taşıma konteyneri bu tasarımda kullanılacak konteynerin hangi kriterlere göre sipariş edileceği yapılan tasarımla belirlenmiştir.

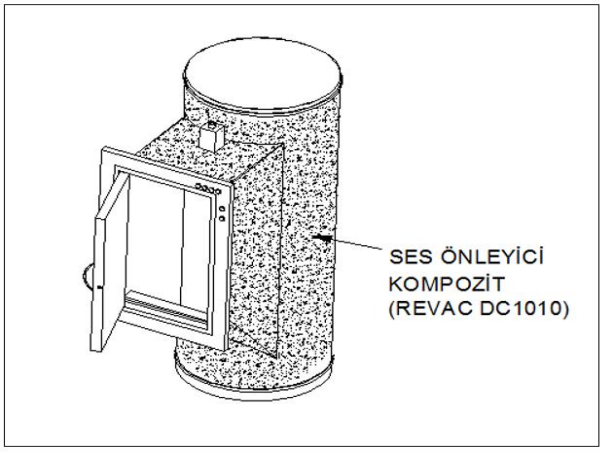


Şekil 7. Atık Taşıma Konteyneri

Çöp Şutu Tasarımı için Ses ve Isı İzolasyonu

Çöp şutlarında isteğe bağlı olarak izolasyon kullanılabilmektedir. Atılan atıkların gövde iç yüzeyine çarpmaları sonucu meydana gelecek titreşimin etkisiyle rahatsız edici düzeyde gürültüler meydana gelebilmektedir. Ses yalıtımı amacıyla gövdenin dış yüzeyine uygulanmış olan taşyünü, kompozit vb kaplama, yankılanan titreşim tarafından üretilen gürültü seviyesini önemli ölçüde azaltır. Bu yalıtım aynı zamanda yangın oluşumunda gövde yüzeyine gelen sıcaklıklığı azaltarak

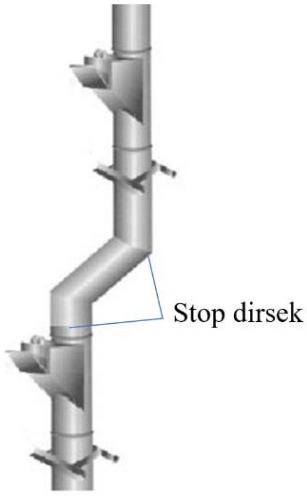
emniyetli çalışmayı sağlamaktadır. Şekil 8'de Hardall International Limited (2020) şirketinin ses önleyici kompozit (Revac DC 1010) malzeme ile kaplama yapılmış bir uygulaması görülmektedir.



Şekil 8. Ses İzolasyonu Yapılmış Örnek Tasarım

Çöp Şutu Hız Kesici Stop Dirsekler

Yüksek binalarda atıkların hızlarını azalmak ve çarpma etkisini asgariye indirmek için 15-20 metrede bir olmak üzere bir stop dirsek kullanılabilir. Hız kesme dirseklerinin yatayla açı 45 dereceden yaptığı az olmamalıdır. Böylelikle çöp atık malzemeleri konteynere daha yavaş bir şekilde darbesiz daha az görültü ve akma hızı ile yönlendirilmektedir. Hız kesici stop dirsekların tasarımı Şekil 9'da gösterilmiştir.

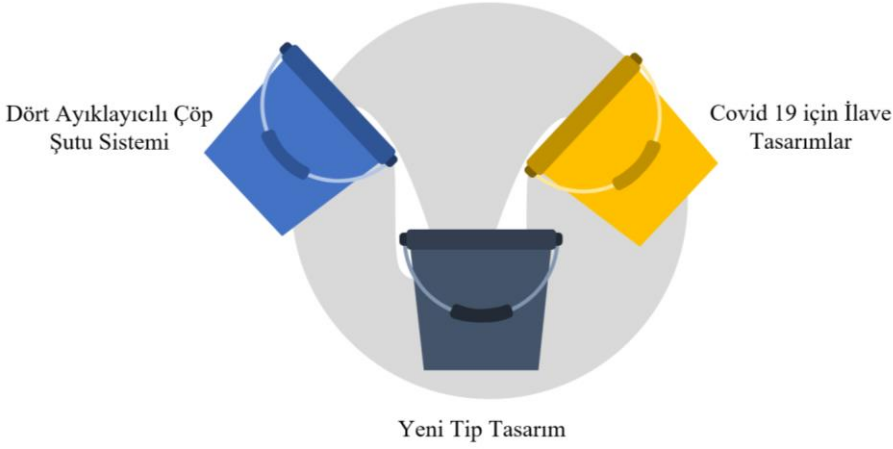


Şekil 9. Hız Kesici Stop Dirseklerin Tasarımı

ÇOKLU ATIK TOPLAMA & AYRIŞTIRMA SİSTEMİ İÇİN MATERYAL ve METOD

Bu sistemin uygulamasında sektörün önde gelen firmalarının tasarımları incelenmiş temel olarak buradaki çalışma prensiplerinden yola çıkılmıştır. Yapılan literatür ve piyasa araştırmaları sonrasında, atık ayrıştırma sistemi olarak kullanılan atık bacalarının genel anlamda bir ayıklayıcılı, iki ayıklayıcılı ve üç ayıklayıcılı olduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca bu çalışmada üzerinde atık hacim ve statik gövde hesabının yanında pandemi sürecinde sistemin temizlenmesi için ek tasarımlar ilave edilerek çöp şutu revize edilerek yeni bir tasarım geliştirilmiştir. Yeni tasarımın yapılma aşamaları Şekil 10' da gösterilmiştir.

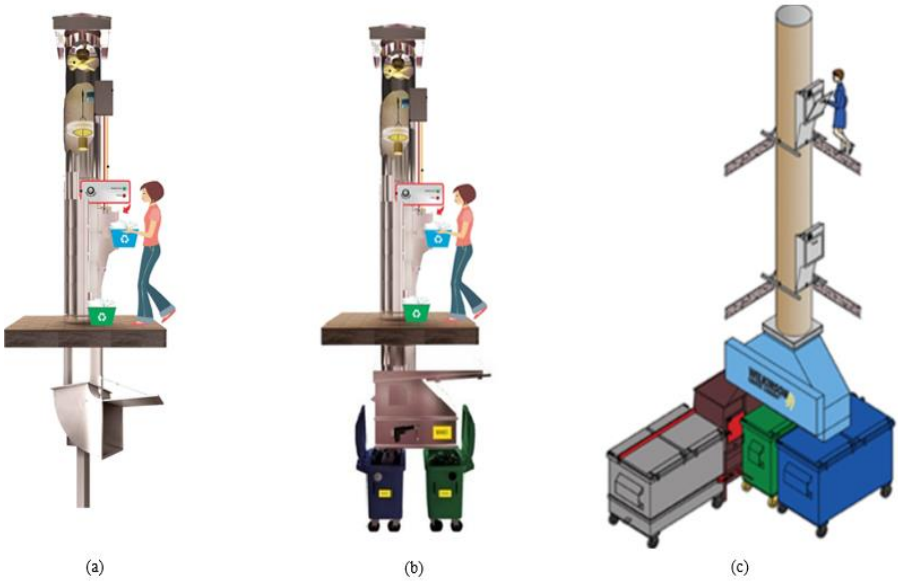


Şekil 10. Yeni Tip Tasarım

Ayrıştırma Sistemleri

Yapılan literatür ve piyasa araştırmaları sonrasında, atık ayrıştırma sistemi olarak kullanılan atık bacalarının genel anlamda bir ayıklayıcılı (Sangirplastics, 2020, iki ayıklayıcılı (Wilkinsonchutes 4, 2020) ve üç ayıklayıcılı (Wilkinsonchutes, 2020) olduğu tespit edilmiştir. Sistemler Şekil 11'deki tamımlanmıştır.

Çoklu atık ayrıştırıcısı, ayrıştırma sistemi ile atıkların geri kazanılması ve tekrar kullanması yoluyla ekonomiye kazandırılabileceği görülmektedir. Ayrıca yapılan literatür taramasında görülen çalışmalar atıkların çoklu ayıklayıcılı atık ayrıştırma sistemleri kullanılarak ilgili atık türüne göre ayrıştırıldığı görülmüştür (Hardall Ltd, 2020).

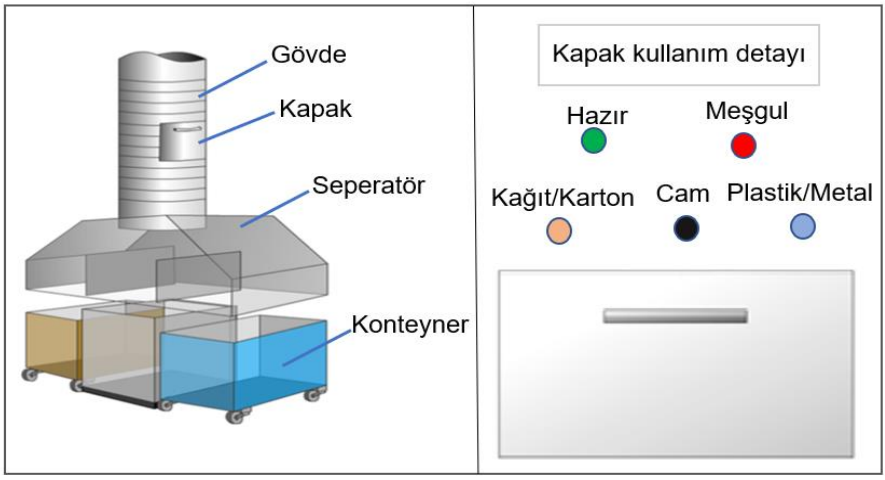


Şekil 11. **Atık Toplama Ve Ayrıştırma Sistemi Türleri A) Bir Ayıklayıcılı (Sangirplastics, 2020) B) İki Ayıklayıcılı (Wilkinsonchutes, 2020) C) Üç Ayıklayıcılı (Wilkinsonchutes 4, 2020)**

Çoklu ayıklayıcılı atık ayrıştırma sistemi tekli sistemlere göre daha elverişlidir. İsteğe bağlı olarak atık sisteminde çoklu ayıklayıcı sistem kullanılabilir.

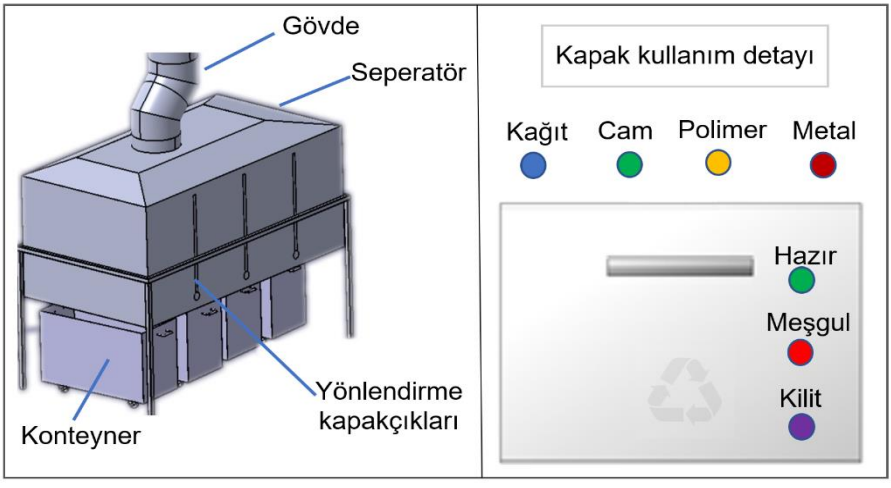
Böylece atıklar bu şekilde kaynağında ayrı ayrı toplanılarak daha temiz geri dönüştürebilir Sektörün önde gelen firmalarından Hardall International Limited (2020) ve Wilkinson Chutes'ın (2020) yapmış olduğu üç ayıklayıcılı atık ayrıştırma sistemi piyasada kullanılmaktadır.

Atıklar bu sistemde; kâğıt/karton, genel çöp ve plastik /teneke olarak ayrılmaktadır. Çöp şutu kâğıt/karton-cam-plastık/metal atık toplama-ayrıştırma sistemi tasarımı Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 12. Çöp Şutu (Kağıt-Karton-Cam-Plastık/Metal) Atık Toplama-Ayrıştırma Sistemi Tasarımı

Ayrıca Ulus Endüstriyel Ltd' nin dört ayıklayıcılı çöp şutu sistem tasarımı bulunmaktadır. Buna bağlı bir çalışmada ise Tanrıver (2018) 'in tasarladığı dört ayıklayıcılı sistem vasıtasıyla kâğıt, cam, polimerik ve metal malzemeler olarak ayrı ayrı toplanabilmektedir. Çöp şutu tasarımı Şekil 13' te gösterilmiştir.



Şekil 13. Çöp Şutu Kağıt, Cam, Polimer, Metal, Atık Toplama-Ayrıştırma Sistemi Tasarımı

Çöp Şutu Tasarımının Covid 19 Pandemesine Düzenlenmesi ve Sistem Hesapları

Yapılacak statik ve diğer hacim hesaplarına göre kalınlık ve çap ölçüsü düşürülerek maliyetler belli oranda aşağıya çekilebilir. Bu sistemin yaygınlaştırılması çevre sağlığını koruma ve enfeksiyon yayılmasını önlemede katma değer

katacaktır. Dolayısı ile konut ve işletmelerde tüm iştirakçilerin ve her hanenin kullanımına sunulması için maliyetlerinin daha uygun hale getirilmesi gerekmektedir.

Bu sistemin uygulamasından piyasada atık bacaları diye de tabir edilen çöp şutu çalışma prensiplerinden faydalanılmış, bu sistemin geliştirilerek yeni nesil olarak tabir ettiğimiz salgınlara uygun bir şekilde tasarımı yapılmıştır.

Çöp şutları genellikle dört ve üzeri çok katlı binalarda atık ayırma amaçlı baca sistemleri yapılsa da bu çalışmada deneysel amaçlı olarak iki kat üzerinde çalışma yapılmıştır.

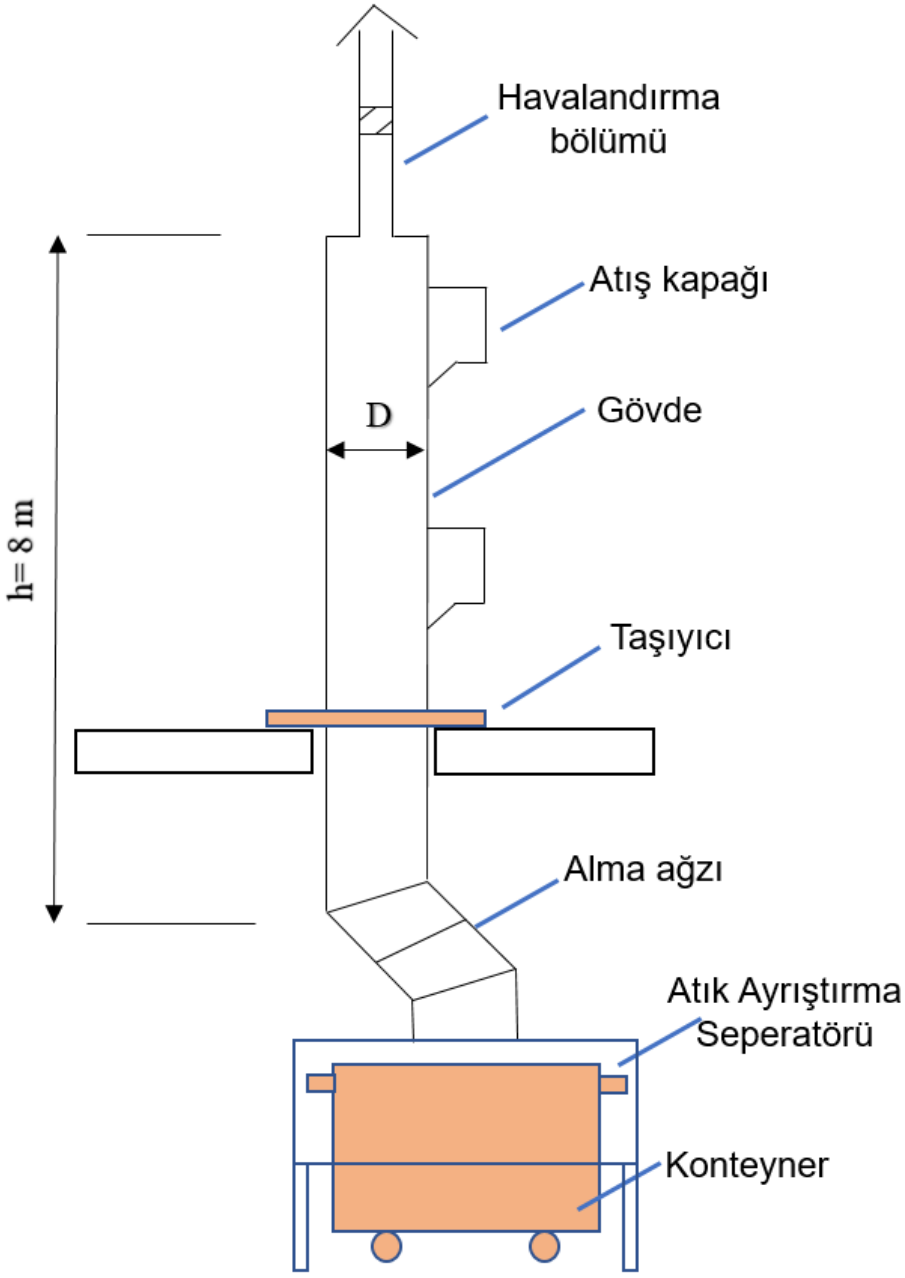
Bu çalışmada çöplerin özel torbalarda muhafaza edilerek, gövde ve kapaklarının sızdırmaz dizayn edileceği çöp şutları vasıtasıyla sistemin en altında bulunan korunaklı çöp odalarına atılması önerilmektedir.

Böylece kullanıcıların birebir enfeksiyon riski taşıyan evsel atıklarla aynı alanda bulunmasının engellemesi amaçlanmaktadır. Belirli zamanlarda çöp odalarında biriken atıkların bu konuda görevlendirilmiş belediye çalışanlarıyla toplanması veya güvenli bir şekilde götürülmesi sağlanacaktır.

Atıklar bu şekilde kaynağında ayrı ayrı toplanırsa, daha temiz geri dönüştürebilir atık geri kazanımı ve tekrar kullanım yoluyla ekonomiye kazandırılabileceği düşünülmektedir.

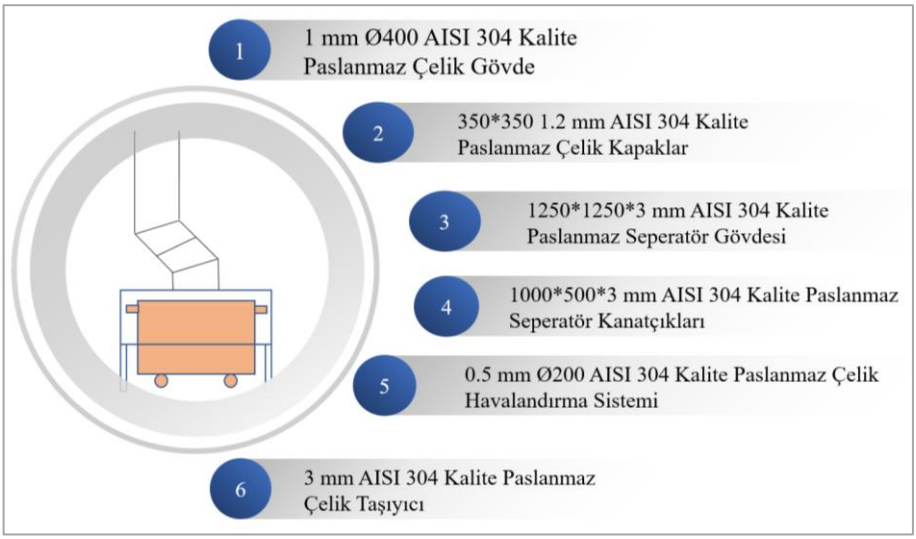
Tasarımı yapılan çöp şutu şekil 14 ’te gösterilmiştir. Çöp şutu iki katlı bir bina için çap Ø 400 yüksekliği 8 m olarak tasarlanmıştır. Sistem allta dörtlü separatör, gövde, havalandırma kısmı, iki adet çöp atma kapağı ve temizleme sisteminden oluşmaktadır.

Tasarlanan yeni sistemin tasarımı parametre seçimleri yapılarak mukavemet hesapları kontrol edilmiştir. Bunun için atılan çöpün ağırlık ve hızından dolayı oluşan kuvvet ve çöp şutunun statik ağırlığı hesaplanarak sistemin taşıcısının bilgisayar destekli programlar vasıtasıyla sonlu elemanlar analizi yapılmıştır.



Şekil 14. Deneysel Çalışma Gövde ve Taşıyıcı Tasarımı

Gerçek boyutlu tasarımda sisteme etki eden kuvvetler ve korozyon direnci gibi parametreler dikkate alınarak malzeme özellik ve et kalınlıkları ön görülmüştür. Şekil 15' te gösterildiği gibi malzeme seçimi ve mekanik tasarımı yapılmıştır. Bu malzemelerin amaca uygunluğunun anlaşılması için mukavamet hesapları ve malzeme araştırmaları yapılmıştır.



Şekil 15. Malzeme Özellikleri

Gövde malzemesi evsel atığın oluşturduğu korozyon ve asidik özelliklere karşı dirençli olması için AISI 304 kalite paslanmaz çelik sac kullanılmıştır. AISI 304 malzeme korozyona dayanıklı olduğu bilinmektedir. Sistem izolasyonsuz tekli katman olarak imal edilmiştir. Korozyan ve mekanik dayanımı artırmak için isteğe bağlı AISI 316 ve dubleks paslanmaz çelik kullanılabilir. Yalnız bu malzemeler AISI 304 paslanmaza göre maliyeti yüksek ve daha pahalıdır.

Bu tasarımın ortalama maliyeti işçilik ve montaj dâhil 6500 $ olarak bulunmuştur. Bu sistemin yaygınlaştırılmasının katma değer katacağı bilindiğinden dolayı her hanenin kullanımına sunulması için fiyatının daha uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Ayrılacak atık çeşidi azaltılarak veya yapılacak statik, hacim hesaplarına göre kalınlık ve çap ölçüsü düşürülerek maliyetler belli oranda aşağıya çekilebilir. İlk yatırım olarak bu sistemin pahalı olduğu düşünülebilir, yalnız geri dönüşüm ve yeniden kullanımın ekonomiye kazandırıldığı düşünüldüğünde bu fiyatın kısa zamanda çıkarılacağı görülecektir. Bu sistemin katma değerinin anlaşılması ile parelel olarak devlet desteği alınabilir. Teşfik veya hibe maliyet yükleri de hafifleticeğinden sistemin yaygınlaştırılması sağlanabilir.

Çöp şutunun hızı ve ağırlığından kaynaklı çarpma kuvvetlerini bulmak üzere serbest düşme ve momentim korunumu denklemlerinden faydalanılmıştır.

Atığın serbest düşmesi Denklem (1) ve Denklem (2)' deki gibi olacaktır.

$$h = \frac{1}{2}\, g\, {t_1}^2 \qquad (1)$$

$$v_ç = g\, t_1 \qquad (2)$$

(h; atığın serbest düşme yüksekliği (m), g; yer çekimi ivmesi (m/s^2), t_1; serbest düşme zamanı(sn), $v_ç$=atığın serbest düşme hızı/çarpma hızı (m/s))

Buradan h=8 m, g=9,81 m/sn^2 olmak üzere; t=1,27 s ve $v_ç$=12,45 m/s bulunmaktadır.

Momentum korunumu Denklem (3)' te verilmiştir.

$$I = \Delta P \;\rightarrow\; f_ç \Delta t = m_a\, \Delta v \rightarrow f_ç \Delta t = m_a\, (v_ç - v_s) \qquad (3)$$

($f_ç$; atığın alt dirsek noktasına uyguladığı kuvvet (N), Δt; çapma anındaki zaman farkı(s), m_a; atık ağırlığı (kg), vç; atığın serbest düşme hızı (m/s), v_s=atığın çapmadan sonraki hızı(m/s))

Buradan Δt =0,5 s (kabul), m_a= 50 kg, $v_ç$=12,45 m/s, v_s=0 m/s olmak üzere;

$f_ç$= 1245 N bulunmaktadır.

Ayrıca stop dirseğin ağırlığından oluşan yer çekimi kuvveti ile beraber taşıyıcıya uygulanan gerçek kuvvet Denklem (4) ve Denklem (5)' teki gibi olacaktır.

$$f_s = m_s\, g \qquad (4)$$

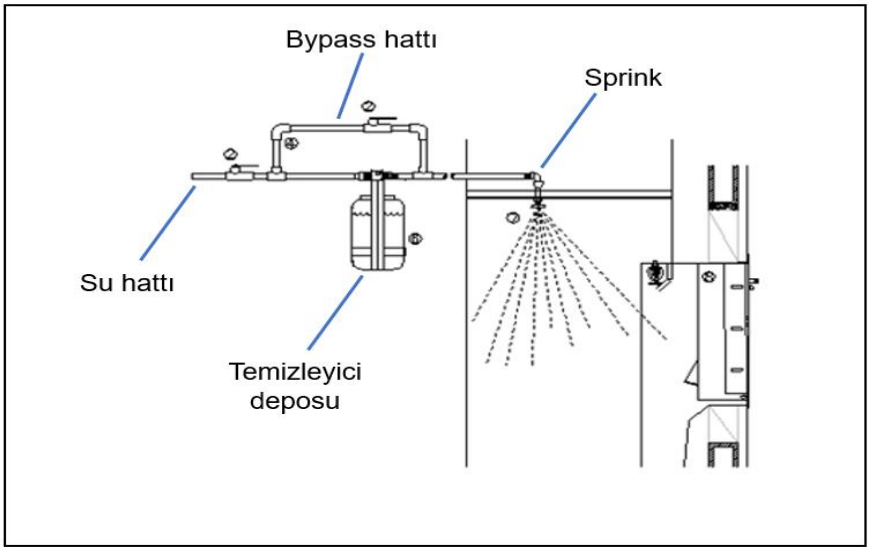
$$f_r = f_ç + f_s \qquad (5)$$

(f_s; stop dirsek malzeme ağırlığından kaynaklı yer çekimi kuvveti (N), m_s; stop dirsek malzeme ağırlığı (kg), g; yer çekimi ivmesi (m/s^2), $f_ç$; Atığın alt dirsek noktasına uyguladığı kuvvet (N), f_r; atığın alt dirsek noktasına uyguladığı gerçek kuvvet (N))

Buradan m_s= 30 kg, g=9,81 m/s^2, $f_ç$= 1245 N olmak üzere f_s=294,3 N ve f_r=1539,3 N bulunmaktadır.

Bu atıklar dezenfekte edildiklerinde sıfır atık anlayışına bir adam daha yaklaşılmış olacaktır. Bu durum ve enfeksiyon riski gözönüne alındığında üzerinde çalıştığımız sistemin gerekliliğini artırmaktadır. Ayrıca bu sistem geri dönüştürme maliyeti açısından tekli sistemlere göre daha elverişli olacaktır.

Çöp şutu Sistemi tasarımına ilave olarak üzerinde bir dezenfekte tertibatı konulmuştur. Dezenfektan sıvısı veya sisteme sabunlu su verilmesiyle enfeksiyon yayınım riskine karşı daha temiz hale getirilmiştir. Yalnız yeni tip korono virüs (Covid-19) ve diğer koronovirüs çeşitlerinin paslanmaz yüzeylerde ortaya çıkardığı risklerin değerlendirilmesi, bu yüzeylerde belirli şartlarda canlı kaldıkları gibi kanıtlanan etkenlerin gözönüne alınması gereklidir. Çöp şutu tasarımında enfeksiyon yayılımını önlemek için tasarlanan dezenfektan sistemi uygulaması Şekil 16' da gösterilmiştir.



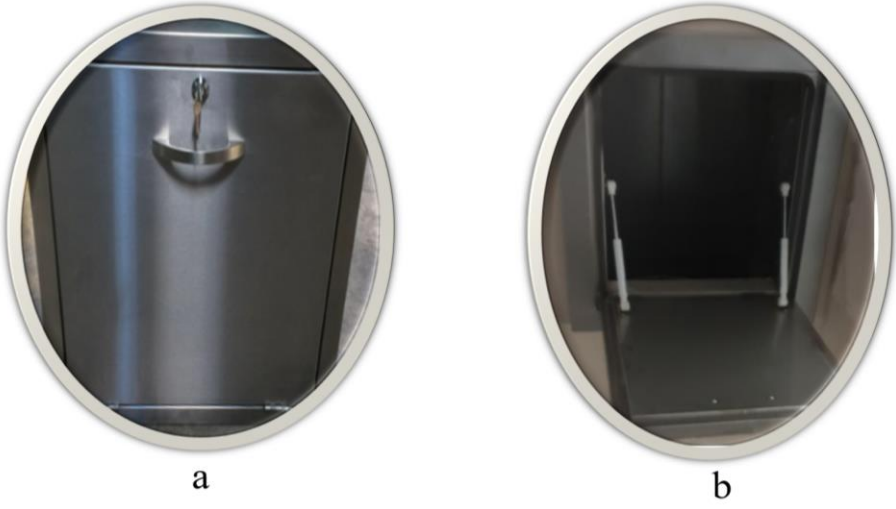
Şekil 16. Çöp Şutu Tasarımında Enfeksiyon Yayılımını Önlemek için Dezenfektan Sistemi Uygulaması

Koronavirüslerin paslanmaz çelik üzerindeki hayatta kalması üzerindeki etkilerini belirlemek için virüsün bulaşıcılığı ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda 4°C, 20°C ve 40°C' de belirli bağıl nem üzerinde sıcaklıklar arttıkça bu koronavirüslerin daha etkisiz hale geldiğini ve daha az sürede hayatta kalabildiklerini ortaya koyulmuştur (Yuwen, Tianlun, Xin, Gaosi, 2020)

Bunlar gözönüne alındığında çöp şutunun üzerine konulacak sistem su ile çalışacak ise 40 °C' den fazla sabunlu su olmasına dikkat edilmelidir. Aksi halde

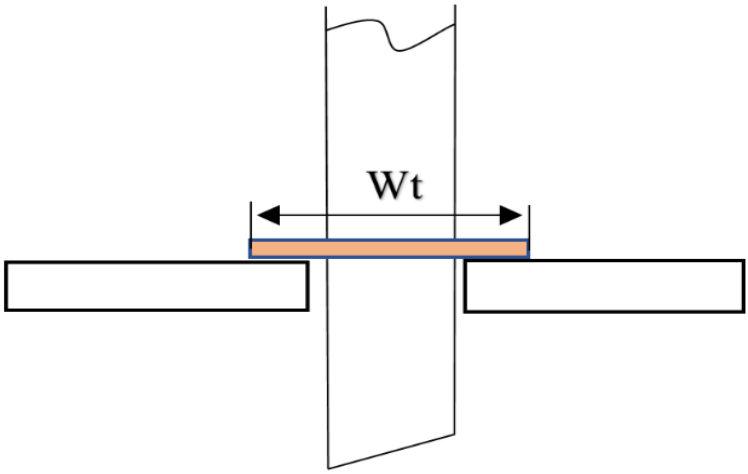
temizlendiğini düşündüğümüz paslanmaz yüzey gövde temizlenmemiş ve çöp şutundan kullanıcılara tekrar enfeksiyon yayma riski doğuracaktır. Eğer bu iş için geliştirilmiş sıvı dezenfektanlar kullanılırsa suya gerek kalmayabilir. Su ayrıca sprinklerden sıkılarak sistemin durulanması için kullanılabilir, böylece ilave önlem alınmış olabilir.

Ayrıca kapakların yangın esnasında ilgili standardın gerektirdiği şekilde yangına dayanıklı olmasının yanısıra ve ilave olarak şut içinde oluşabilecek dumana ve enfeksiyona karşı sızdırmaz olması sağlanmıştır. Kapaklarda kullanılan fitiller yardımıyla enfeksiyon sızıntısı önlenmektedir. Ayrıca bu fitiller ısı ile etkileşime geçtiğinde şişmekte ve duman sızıntısını asgariye indirmektedir. Böylelikle sistemin altında herhangi bir nedenle yangın çıktığında katlardan içeriye girmesi engellenerek olası bir can kaybının da önüne geçilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca binada çöp şutu kapaklarının içinde olduğu kapalı odacıklar ile ekstra önlem alınarak risk asgari düzeye indirilebilir. Yapılan yeni kapak tasarımı Şekil 17' de gösterilmektedir.



Şekil 17. Çöp Şutu Kapak Tasarımı a) Ön Görünüş b) Kapağın Açık Pozizyonu

Detayı Şekil 18' de verilen sistemin taşıyıcına gelen gövde kuvveti ve toplam kuvvet Denklem (6) ve Denklem (7)' de verilmiştir.



Şekil 18. Sistem Taşıyıcısı Kesit Görünümü

$$f_g = m_g\ g \quad (6)$$

$$f_t = f_g + f_ç \quad (7)$$

(fg; gövde yer çekimi kuvveti (N), mg; gövde ağırlığı (kg), g; yer çekimi ivmesi (m/sn2 ft; taşıyıcıya uygulanan toplam kuvvet (N), fç; atığın alt dirsek noktasına uyguladığı gerçek kuvvet (N))

Buradan mg= 400 kg, g=9,81 m/sn2 ve fr=1539,3 N olmak üzere fg=3924 N ve ft=5463,3 N bulunmaktadır.

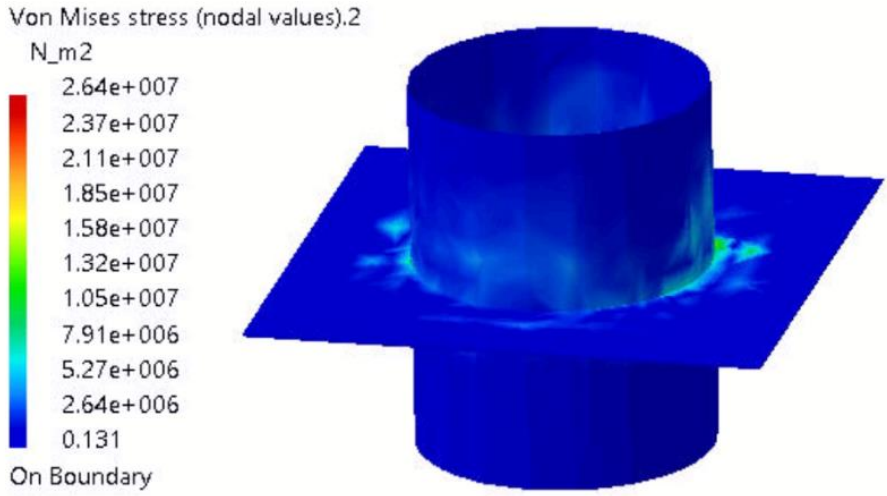
Catia V5 Student Edition Generative Structural Analysis modülü ile yapısal analizlerde kullanılmak üzere hazırlanan taşıyıcı tasarımın genel görünüşleri Şekil 47'de gösterilmiştir. Taşıyıcı sacının binanın beton zeminine sabitletlenmesinden ötürü rijit biçimde olduğu varsayılmıştır. AISI 304 kalite malzemesinin mekanik özellikleri Tablo 1' e göre programa girilerek tanımlamarı yapılmıştır (Aran, Temel, 2004).

Wt=700x700 mm olmak üzere 1539,3 N toplam kuvveti taşıcıyıa uygulanmıştır. Analizde 2293 eleman ve 4775 düğum noktası ile kullanılmıştır.

Tablo 13. Malzeme Özellikleri

Malzeme	Elastite Modülü	Akma Dayanımı	Poison Oranı
1.4401 –AISI 304	193Gpa	205 Mpa	0.29

Maksimum Von Mises gerilme dağılımı Şekil 49'da gösterilmiştir. Burada maksimum gerilme olduğu noktalarda olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 19. Sonlu Elemanlar Analizi

Maksimum Von Mises gerilimi 26, 4 Mpa ve uzama miktarı 0, 0135 mm olarak gözlenmemiştir. AISI 304 kalite malzemenin akma sınırının Tablo 1' e göre 205 Mpa bilindiğine göre tasarlanan bu taşıyıcı 7, 76 kat emniyetli olduğu ortaya çıkmaktadır.

Otomasyon için proseslerin zaman analizi; mekatronik sisitemde gereksinimlere göre amaca yönelik sensör eyleyici ve kontrolcü önerilerinde bulunmak üzere yapılmıştır. Tasarımda kullanılan konteyner hacmi hesabı Denklem (8) ve haftalık kullanılan atık miktarının konteyner hacmine oranı Denklem (9)'da verilmiştir.

$$V_k = l.w.h \quad (8)$$

$$v_o;\ \frac{v_h}{v_k} \quad (9)$$

(vk; Konteyner hacmi (m3), l; uzunluk (m), w; genişlik (m), h; yükseklik (m), vh; haftalık kullanılan atık miktarı (m3), v0; Hacimsel oran)

Burada tasarımda kullanılan konteyner ölçüleri l = 0,7 m, w =1 m, h=1 m

olmak üzere konteyner hacmi Denklem (8)'den vk=0,7 m3 bulunmaktadır.

Tablo 2' den yararlanılarak 2 katlı bina için haftalık atık miktarı vh=0,6 m3 olarak bulunmaktadır (Hardall Ltd, 2020). Kritik durum için tüm atıkların aynı konteyner üzerinde yoğunlaştığı varsayılarak hacimsel oran Denklem (9)'dan vo=1,16 bulunmaktadır. Atıkların haftalık toplandığı düşünülerek her atık türü için en az bir adet yedek konteyner bulundurmak gerekli olduğu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca yedek konteynerler, mevcut konteynerler dolduğunda sistemin çalışmaya devam etmesi, bakım ve değiştirme işlemi için gereklidir. Anahtar vasıtasıyla manuel olarak veya optik sensörler kullanılarak otomasyon ile herhangi bir konteyner bakım için yerinden alındığında sistemin kapatılması sağlanmalıdır. Ayrıca, konteynerlar dolduğunda optik sensörler kullanılarak, sistemin bakımı esnasında ise anahtar ile manuel olarak sistemin kapatılması öngörülmüştür.

Tablo 14. Haftalık Atık Miktarı (Hardall Ltd, 2020)

Kullanım yeri	Değerlendirme	Haftalık atık miktarı
Ev-konut	Ev başına/kat başına	0.3 m^3

Kullanıcının atış sayısı ve sayılar arasındaki bekleme süresine bağlı oluşan süre Denklem (10)' da gösterilmiştir.

$$t_4 = n.(t_2+t_3) \quad (10)$$

(t4; atış sayısı ve sayılar arasındaki bekleme süresine bağlı oluşan süre(s), t3; atış miktarları arasındaki bekleme süresi (s), n; atış ayısı, t2;toplam serbest düşme zamanı (s))

n=10 kabulü ile t2=1,27 s olmak üzere;

Burada atıklar ardarda atıldığında (t3=0 s), t4=12,7 s;

Burada atıklar üçer saniye ara ile atıldığında (t3=3 s), t4=42,7 s;

Burada atıklar beşer saniye ara ile atıldığında (t3=5 s), t4=62,7 s bulunmaktadır.

Başka bir kullanıcı, aynı türde atığın atışını yapmak istese dahi mevcut kullanıcının atışını beklemesi gerekmektedir. En yüksek noktadan konteynera olan atış süresi t2=1,27 s bulunmuştu. Bu süre dahi eyleyicilerin seperatör kapak-

larının konumlandırmasına yeterli olmayacağından, eyleyicilerin için yeterli zamanın oluşturulması gerekmektedir. Kullanıcı ilgili atık türüne bastığında zaman rölelerine tanımlanmış süre kadar kapağı açamayacaktır. Bu süre model ölçekli tasarımda güvenlik faktörü de eklenerek 7 saniye olarak tanımlanmıştır. Toplam süre Denlem (11)' de gösterilmiştir.

$$t_{top} = t_r + t_{4max} \quad (11)$$

(ttop; toplam süre (s), tr; mekanizmaların konumlaması için tanımlanan süre (s), t4max; atış sayısı ve sayılar arasındaki bekleme süresine bağlı oluşan azami süre (s))

tr= 7 s, t4max=62,7 s olmak üzere; ttop= 69,7 s bulunmaktadır.

Görüldüğü üzere en iyimser şekilde bir kullanıcının, diğer bir kullanıcıyı toplam bekleme süresi ttop= 69,7 s bulunmuştur. Bu bekleme zamanının kullanıcıları yormaması için kapakların birbiri ile irtibatlı olması gereksinimi ortaya çıkmıştır. Elektronik olarak irtibatının yapılarak kapaklar kapandığında kullanıcılara kapaklar üzerinde bulunan sinyal lambasıyla uyarı verilebilir. Böyleyece sistemin başında beklenerek oluşan gereksiz zaman kayıplarının önüne geçilmiş olacak ve aynı zamanda kullanıcıların emiyetini sağlanmış olacaktır.

Kullanıcılar kapak üzerindeki atış yapmak istedikleri atık türlerinin ışıklı butonuna basarak, eyleyiciler yardımıyla ilgili atık koyteynerına seperatör kapaklarını yönlendirerek atıkları türlerine göre ayrıştırma yapmış olmaktadırlar. Fakat bazı durumlarda kullanıcılar; atık toplama ve ayrıştırma sisteminde ilgili atık konteynerına doğru atık türününü tanıtmama, atmama durumları olabilir. Kullanıcılara eğitimler verilerek, gerekli talimatların gözüken yerlere asılması sağlanalararak veya sistemin atık atış kapak anahtarlarının yetkili tek bir kişiye verilmesi suretiyle sistemin kontrolü sağlanabilir. Ayrıca bu istenmeyen durum daha düzgün ve temiz ayrıştırma yapılması için kapasitif, indüktif vb sensör ilaveleriyle atıkların henüz konyenera düşmeden durdurularak ilgili konteynere yönlendirilmesi de bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır.

Atıkların en düşük, orta ve yüksek ağırlık seçeneklerine göre ardarda yapılan atış sayısına bağlı toplam kütle Denklem (12)' de gösterilmiştir

$$m_t = m_a \,.\, n \quad (12)$$

(mt; konteynere ulaşan atık ağırlığı (kg), ma; Atılan atıkların ağırlığı (kg), n; atış ayısı)

n=10 kabulü ile;

ma=1 kg olduğunda mt=10 kg;

ma=25 kg olduğunda mt=250 kg;

ma=50 kg olduğunda mt=500 kg bulunmaktadır.

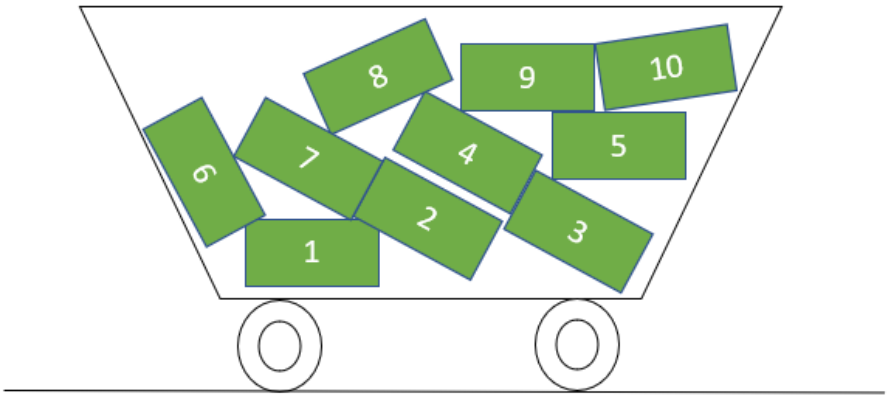
Burada stop dirseğin ilk darbeleri emdiği ve bundan ötürü konteynere düşen çarpma kuvveti ihmal edildiğinde konteynera gelen kuvvet Denklem (13)' te gösterilmiştir.

$$f_k = m_t\, g \qquad (13)$$

(fk; konteynere uygulanan yer çekimi kuvveti (N), mt; ardarda "n" atış tekrarındaki toplam atık ağırlığı (kg), g; yer çekimi ivmesi (m/sn2))

Buradan mt= 500 kg, g=9,81 m/sn2 olmak üzere fg=4905 N bulunmaktadır.

Konteynerler; Şekil 10'daki gibi en yoğun durumda aralarında t2=1,27 s düşmesi süresi olan ardarda n=10 atış tekrarı sonunda 4905 N kuvvete maruz kalabilmektedirler. Konteyner sipariş seçiminde veya tasarımında bu nokta dikkate alınmalıdır. Konteynerlar dolduğunda optik sensörler kullanılarak hacimsel konrolü yapılacak olan sistemin, ileri tasarımlarda ağırlık kontrolü yapılarak sisteme bilgi verilmesi sağlanabilir.



Şekil 20. Atık Konteyneri Taşıma Kapasitesi

SONUÇ ve ÖNERİLER

Geri dönüşüm süreci, kaynakların tükenmesini ve çevre kirliliğini önlemek için çok önemlidir. Toplama ve ayırma sürecinde kaynakların geri kazanılması için çeşitli prosesler kullanılmaktadır. Bu proseslerin daha verimli çalışabilmesi için atıkların toplanması ve gerektiğinde atığın henüz kaynakta iken ayrılmasının gerekliliğini ortaya çıkmaktadır. Bu da binalarda çöp şutu sistemleriyle sağlanmaktadır. Çöp şutları binalarda atık toplama çeşitlerine göre bir, iki, üç veya dört

ayıklayıcılı olarak tasarlanabilmektedir. Bu sistemlerin gövdeleri atıklardan oluşan korozyona dayanıklı olması açısından paslanmaz çelik malzeden imal edilmektedir.

Yalnız yeni tip koronovirüs (Covid-19) ve diğer koronovirüs çeşitlerinin paslanmaz yüzeylerde ortaya çıkardığı risklerin değerlendirilmesi, bu yüzeylerde belirli şartlarda canlı kaldıklarını göseren çalışmalarda kanıtlanan etkenlerin gözönüne alınması gereklidir. Yuwen, Tianlun, Xin, Gaosi, (2020) koronavirüslerin paslanmaz çelik üzerindeki hayatta kalması üzerindeki etkilerini belirlemek için virüsün bulaşıcılığı ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda 4, 20, 40 °C' de belirli bağıl nem üzerinde sıcaklık arttıkça bu koronavirüslerin daha etkisiz hale geldiğini ve daha az sürede hayatta kalabildiklerini ortaya koymuşlardır.

Bunlar etkenler gözönüne alındığında çöp şutunun sisteminde bazı revize yapılması gerektiği görülmüş ve bir tasarım ortaya konulmuştur. Çöp şutu sistemi; atık hacim ve statik gövde hesabının yanında pandemi sürecinde sistemin temizlenmesi için ek tasarımlar ilave edilerek yeni sistemin tanımlaması yapılmıştır. Atıkların yaşam mahalinden emniyetli bir şekilde bertaraf edimesi, insaların insanların sosyal etkileşimlerini en aza indirerek virüs kaynaklı enfeksiyon yayınımı asgari düzeye indirme indirmek amaçlanmıştır.

Çöp şutunun üzerine konulanan temizleme sistemin 40 °C' den fazla sabunlu su olmasına dikkat edilmiştir. Aksi halde temizlendiğini düşündüğümüz çöp şutu gövdesinde kullanılan paslanmaz malzeme yüzey gövde temizlenmemiş ve çöp şutundan kullanıcılara tekrar salgın yayma riski doğuracaktır. Eğer bu iş için geliştirilmiş sıvı dezenfektanlar kullanılırsa suya gerek kalmayabilir. Su ayrıca sprinklerden sıkılarak sistemin durulanması için kullanılabilir, böylece ilave önlem alınmış olabilir.

Çöp şutu sisteminde kullanılan kapaklar özel sızdırmazlık elemanları sayesinde duman sızıntısının yanında yaşam mahalline doğru enfeksiyon yayınımının önüne geçilmesi ön görülmektedir. Kapaklar için ayrıca binanın ilgili yerlerine ilave önlem olarak odacıklar yapıldığında tamamen yayınımın önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca sistem havalandırma ve temizleme modülleri ile devamlı temiz tutulması sağlanabilmektedir.

İki katlı bir bina için dört ayıklayıcılı olarak tasarlanan sistemde ayrıştırma işlemi için aktüatörler, sensörler, yazılım kullanılarak geri dönüşüm için entegre

edilmiştir. Sistem allta dörtlü separatör, gövde, havalandırma kısmı, iki adet çöp atma kapağı ve temizleme sisteminden oluşmaktadır.

Dört ayıklayıcılı sistem vasıtasıyla kâğıt, cam, plastik ve metal olarak ayrı ayrı toplanabilmektedir. Sistemin gövde çapı Ø400 mm, 8 m yüksekiğinde ve 1,0 mm AISI 304 kalite paslanmaz malzemeden tasarlanmıştır. Tasarlanan yeni sistemin tasarımı parametre seçimleri yapılarak mukavemet hesapları kontrol edilmiştir. Bunun için atılan çöpün ağırlık ve hızından dolayı oluşan kuvvet ve çöp şutunun statik ağırlığı hesaplanarak bilgisayar destekli programlar vasıtasıyla sistem taşıyıcısının sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Burada maksimum Von Mises gerilimi 26,4 Mpa ve uzama miktarı 0,0135 mm olarak gözlenmemiştir. Tasarlanan bu taşıyıcının 7, 76 kat emniyetli olduğu ortaya çıkmaktadır.

Sistemde atıkların güvenli toplanabilmesi kullanılacak konteynerın hacim hesabı ve sistemin kesintisiz çalışabilmesi için bu konteynerlardan kaç adet kullanılması gerektiği hesaplanmıştır.

Bu sistemin maliyeti 6500 $ olarak hesaplanmıştır. Ayrılacak atık çeşidi azaltılarak veya yapılacak statik, hacim hesaplarına göre kalınlık ve çap ölçüsü düşürülerek maliyetler belli oranda aşağıya çekilebilir. İlk yatırım olarak bu sistemin pahalı olduğu düşünülebilir, yalnız geri dönüşüm ve yeniden kullanımın ekonomiye kazandırıldığı düşünüldüğünde bu fiyatın kısa zamanda amorti edileceği düşünülmektedir. Bu sistemin katma değerinin anlaşılması ile parelel olarak devlet desteği alınabilir. Teşfik veya hibe maliyet yükleri de hafifleticeğinden sistemin yaygınlaştırılması sağlanabilir**.**

TEŞEKKÜR

Deneysel Tasarım, projelendirme ve fabrika ürünlerini kullanma imkani veren Ulus Endüstriyel Paslanmaz Baca Sistemleri Firması Mühendisleri ve Çalışanlarına yardım ve desteklerinden dolayı çok Teşekkür ederiz. Ulus Endüstriyel Fabrika: Çerkeşli OSB Mah. İmes 1 Bulvarı No:5/A, www.ulusendustriyel.com. Dilovası/Kocaeli, TURKİYE

KAYNAKÇA

Al-Salem, S. M., Lettieri, P. ve Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. Waste management, 29(10), 2625-2643.

Aran, A. Ve Temel, M. A. (2004). Paslanmaz çeliklerin üretimi kullanımı standardları. Sarıtaş Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş Teknik Yayın No:1 2004, İstanbul.

Ervasti, I., Miranda, R. ve Kauranen, I. (2016). A global, comprehensive review of literature related to paper recycling: A pressing need for a uniform system of terms and definitions. Waste Management, 48, 64-71.

Gündüzalp, A. ve Güven, S. (2016). Atık çeşitleri, atık yönetimi, geri dönüşüm ve tüketici: Çankaya Belediyesi ve Semt Tüketicileri Örneği. Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-Dergisi 14 Şubat 2016, Ankara.

Idumah, C. I. Ve Nwuzor, I. C. (2019). Novel trends in plastic waste management. SN Applied Sciences, 1(11), 1402.

Jouhara, H., Czajczyńska, D., Ghazal, H., Krzyżyńska, R., Anguilano, L., Reynolds, A. J. ve Spencer, N. (2017). Municipal waste management systems for domestic use. Energy, 139, 485-506.

Kayakutlu, G., Daim, T., Kunt, M., Altay, A. ve Suharto, Y. (2017). Scenarios for regional waste management. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 74, 1323-1335.

Pivnenko, K., Eriksson, E. ve Astrup, T. F. (2015). Waste paper for recycling: Overview and identification of potentially critical substances. Waste management, 45, 134-142.

Recycling and proper waste sorting. Wilkinson Hi Rise, https://wilkinsonchutes.ca. (ET: 14.12.2020).

Recycling Chute. Hardall Ltd, http://www.hardall.co.uk. (ET: 14.12.2020).

Sayar, Ş. (2012). Sakarya ili entegre atık yönetimi ve ambalaj atıklarının geri dönüşümü. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi 2012. Sakarya.

Taherzadeh, M., Bolton, K., Wong, J. ve Pandey, A. (Eds.). (2019). Sustainable resource recovery and zero waste approaches. Elsevier.

Tanrıver, K. (2018). Poimerik malzemelerin geri dönüşüm sistemi ile ayrıştırılması. İstanbul Gedik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi 2018, İstanbul.

TSE K 569, (2019). Binalarda atık ayırma amaçlı baca sistemi. ICS 13.030.40.

Waste Conveyance System. Sangir Plastic, http://www.sangirplastics.in/garbage-chute-3152090.html. (ET: 14.12.2020).

Yuwen, Caiab., Tianlun, Huanga., Xin, Liua. ve Gaosi Xua. (2020). The Effects of "Fangcang, Huoshenshan, and Leishenshan" hospitals and temperature on the mortality of COVID-19. medRxiv preprint doi: https://doi.org/10.1101/2020.02.26.20028472.

Zhang, S., Ding, Y., Liu, B. ve Chang, C. C. (2017). Supply and demand of some critical metals and present status of their recycling in WEEE. Waste Management, 65, 113-127.

SEMBOL VE KISALTMALAR

D : Gövde dış çapı

fç : Atığın alt dirsek noktasına uyguladığı kuvvet

fg : Gövde yer çekimi kuvveti

fk : Konteynere uygulanan yer çekimi kuvveti

fr : Atığın alt dirsek noktasına uyguladığı gerçek kuvvet

fs : Stop dirsek malzeme ağırlığından kaynaklı yer çekimi kuvveti

ft : Taşıyıcıya uygulanan toplam kuvvet

g : Yer çekimi ivmesi

h : Çöp şutu yüksekliği

ma : Atık ağırlığı

mg : Gövde ağırlığı

ms : Stop dirsek malzeme ağırlığı

n : Atık ayısı

PLC : Programmable Logic Controlle

tr : Mekanizmaların konumlaması için tanımlanan

ttop :Toplam süre

t2 : Toplam serbest düşme

t3 : Atış miktarları arasındaki bekleme süresi

t4 : Atış sayısı ve sayılar arasındaki bekleme süresine bağlı oluşan süre

t4max : Atış sayısı ve sayılar arasındaki bekleme süresine bağlı oluşan azami süre

vç : Atığın serbest düşme hızı/çarpma hızı

v0 : Hacimsel oran

vh : Haftalık kullanılan atık miktarı

vk : Konteyner hacmi

Wt : Taşıyıcı en ve genişlik ölçüsü

BÖLÜM 22
KOMPOZİTLERDE KULLANILAN TAKVİYE ELEMANLARININ BAZI UYGULAMA ALANLARI

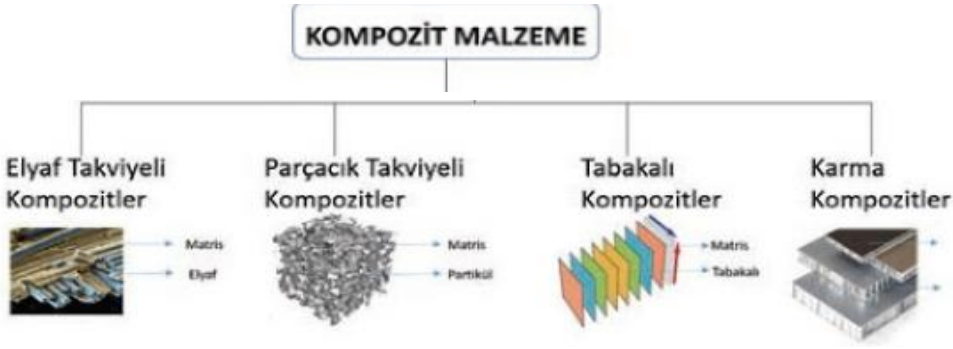
Prof. Dr. Yusuf ŞAHİN
Nişantaşı Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İstanbul / TÜRKİYE

Öz: Son yıllarda kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerine araştırma çalışmaları devam etmektedir. Mekanik ve fiziksel özellikleri iyileştirmek için çok farklı takviye elemanları kullanılmaktadır. Bu elemanların seçimi çok önemli çünkü kompozit sistemde yükün yaklaşık %94'ün üzeri takviye elemanı tarafından taşınmaktadır. Bu çalışmada; sadece kompozit malzeme yapımında yayın olarak kullanılan seramik takviye elemanlarının farklı tür ve şekilleri ve uygulama alanları gözden geçirilmiştir, yani hangi takviye elemanları ile ne tür ürün/cihaz/makine/sistemler yapılmakta olduğunu bildirmektir.

GİRİŞ

Takviye elemanı olarak kompozit malzemelerin yapımında seramik takviye elemanları kullanılmakta olup, bunlar plastik, metal ve seramik esaslı malzemeler ile gerçekleşemeyen yüksek özgül modül ve dayanımlı malzemelere olan ihtiyaç yüzünden son yıllarda daha çok tercih edilmektedir. Takviye elemanları ise değişik seramik elyaflar kullanılmakta ve kompozit (karma) malzemeyi oluşturan temel bileşenlerden biri bunlar; parçacıklı, kılcal kristalli, kısa ve uzun elyaflar dahil değişik morfolojik şekilde bulunmaktadır (Şahin, 2015). Bir karma malzemede takviye elemanın görevi; yükü taşıması matrisin dayanım/modülünü artırmasıdır. Takviye elemanlarının pek çoğu elyaf şeklinde üretildiklerinden dayanım ve rijitlikleri katı haldeki durumundan 3 kat daha yüksek oldukları için daha üstün davranış gösterirler (Şahin,2015; Hull, 1992). Takviye elemanı şekli, boyu, doğrultusu, matriks/elyafın özellikleri yanında elyaf/matriks arasında yeterli ara yüzey bağının oluşması da gerekmektedir. Takviye elemanı karma malzemeyi oluşturan en önemli bileşendir çünkü sisteme gelen yükün çok büyük kısmını o taşır. Ayrıca

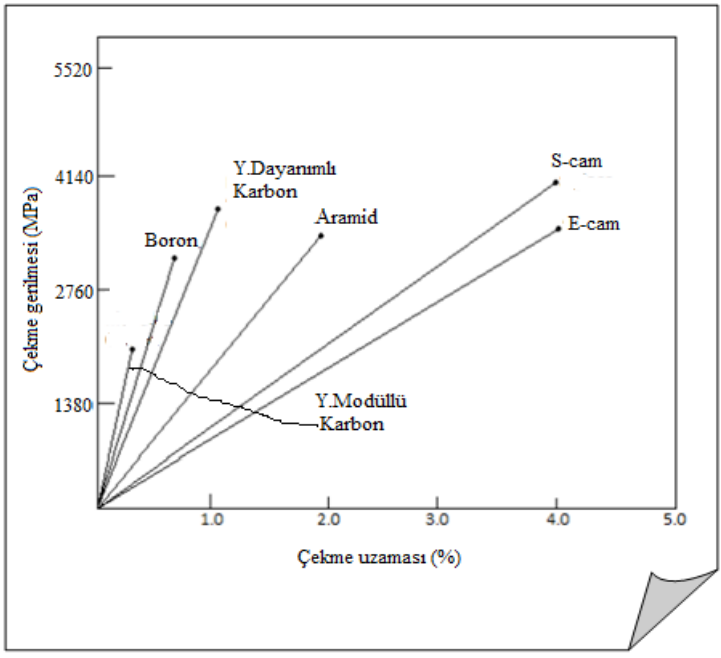
karma malzeme üretimi esnasında; takviye elemanı seçimi, üretim tekniği, ıslanabilme özelliği, yönlendirilmeler, elyaf içeriği de kompozitin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirler. Takviye elemanlarında belli başlı aranan temel özellikler ile ilgili detay kitabın önceki bölümünde verilmiştir. Karma malzemeler; elastik modülü/çekme dayanım düşük ana malzeme/matriks ile özgül ağırlığı düşük, elastik modülü ve dayanımı yüksek olan takviye elemanlarının birleştirilmesi ile oluşmaktadır. Şekil 1 'de bir kompozitin malzemenin takviye elemanları türüne göre sınıflandırılması gösterilmişken Şekil 2'de takviye elemanı olarak kullanılan bazı seramiklere ait gerilme - uzama miktarlarının değişimi gösterilmiştir. Bu grafikten anlaşılacağı üzere çok yüksek elastik modüle sahip olan karbon ve bor gibi takviye elemanlarının uzama miktarları yaklaşık %1 veya daha az olarak ortaya çıkmışken S ve C-cam elyaflar yaklaşık % 3-4'e kadar uzama miktarına sahip olabilmektedir. Bu grafikte; yatay eksen çekme uzama miktarını,(%) gösterirken düşey sütün ise çekme gerilmesini (MPa) göstermektedir. Elbete karma malzemelerde burada olduğu gibi aynı lineer ilişki oluşmayabilir. Pratik olarak çekme dayanım değerlerini (MPa) karşılaştırdığımızda karbonun ve bor elyafın mukavemetleri yaklaşık 4000 MPa, 3000 MPa'a ulaşırken Aramid fiberde ise bu değer yaklaşık 3100 MPa'den aşağı olmadığı görülmektedir. Bu bölümde; kompozit malzemeleri üretmek için farklı tür ve şekillere sahip takviye elemanları kısaca özetlenmiş ve bu seramik liflerin kullanım alanları da gözden geçirilmiştir.



Şekil 1. Kompozitin Malzemenin Takviye Elemanına Göre Sınıflandırılması

Özgül modül elastik modülü/yoğunluk oranı iken özgül dayanım da çekme dayanımı/yoğunluğa oranıdır. Tasarımcı, uygulanan yükün türü ve onun ağırlığının fonksiyonu olarak dayanım ve rijitliğini hesaplayarak kuvvet altındaki elemanın nasıl davranacağını tayin eder. Bu nedenle, çekme yüküne maruz kalan çubuklar için birim yoğunlukta rijitliğin doğru tasarım kriterinin, E/ρ olduğu gösterilebilir. Bu durumda yapı malzemesi olarak aluminyumun seçiminin, çelik,

titanyum, nikel ve tahta arasında karşılaştırmaya bakılacak olursa, Tablo 1'de gösterildiği gibi, farkın çok az olacağı açıktır. Fakat bunlar yerine karbon elyaf takviyeli kompozitlerin kullanılmasında hayli avantajlı olacağı görülmektedir çünkü tasarım kriterinin E(1/3)/ρ olduğu için uniform basınç altında panelleri kullanmanın en iyi malzeme olacağı açıktır çünkü yaklaşık 5.4 kat daha az kütle kullanılacak demektir. Mekanik avantaj bunun ile ölçülebilir çünkü belirli bir uzama için en hafif çubuk demek en yüksek E/ρ değerine sahip olmak demektir. Bundan dolayı, uzay malzemeleri ağırlığa karşı çok hassas olduğundan dolayı son yıllarda karma malzemelerde bu alanda daha çok tercih edilmektedir.



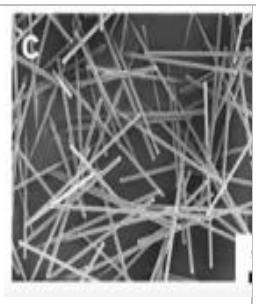
Şekil 2. Seçilen Seramik Liflerin Gerilme - Uzama Miktarlarının Değişimi

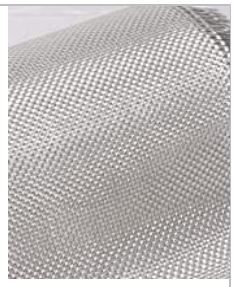
TAKVİYE ELEMANLARI

Dayanım ve rijitliğin esası, atomlar arasındaki bağda yatar. Elyaf üretim işlemi 3 guruba ayrılabilir. Son zamanlarda takviye elemanı olarak kullanılan seramiklerin başlıcaları; cam, karbon, bor, alumina ve silisyum karbüre ilaveten basalt ve aramid sayılabilir. Bu seramik takviye elemanlarının genel bazı mekanik ve fiziksel özellikleri; bu kitabın 1.ci Bölümünde Tablo 1'de gösterilmiştir (Şahin,2015).

Cam

Cam elyafın esasını; silis-kumu (SiO_2) meydana getirmekle beraber belirli oranlarda sodyum, kalsiyum, aliminyum, bor ve demir gibi elementlerin oksitlerinden oluşur. Polimer kompozitlerde yaygın ve en ucuz olan takviye elemanıdır. Plastik esaslı kompozitlerde kullanılan genellikle, E-Camı alkali olmayan bor silis, elektrik yalıtım özellikleri için geliştirilirken,1976'dan beri Şişe Cam A.Ş. tarafından üretilmektedir. S-camı daha yüksek modüle sahip magnezyum ve aluminyum silis 'de ihtiva eder fakat pahalıdır. C-camı ise kimyasal özellikleri/korozyon direnci iyi olduğu için depolama tanklarının yapımında tercih edilir ancak mekanik özellikleri düşüktür. Camlar, camı oluşturan bileşenlerin yüksek fırınında yaklaşık 1200-1500 ^{o}C de ergitilmesi ve ergiyen camların bir platin alaşımlı potanın tabanındaki binlerce delikten hızlı şekilde aşağı doğru çekilir ve soğutma bölgesinden geçirilir. Sonra işleme uygun olarak yerleştirilmiş bir sarma sitemi ile lifler yüksek hızlarda çekilir. Daha sonra kaplama uygulanır, makaralara sarılarak yaklaşık 3 kg'lık halinde depolara gönderilir. Kaplama işlemi genellikle Silan ile yapılır ki bu elyafları hasardan korur (Deak, Czigancy,2009). Şekil 3'de ise değişik formatta üretilmiş olan camlar ve türleri gösterilmiştir. Bunların başlıcaları sırasıyla; (a) rastgele yönlendirilmiş kırpılmış elyaf fiber, (b) chopped ve büyük parçacıklardan oluşan elyaflar, (c) tek uçlu surekli elyaf, ve (d) dokuma türü cam elyaf olmak üzeredir. Her birinin farklı özellliği bulunmaktadır, ona göre seçim yapılmalıdır. Örneğin, şayet çekme dayanımını artırmak mı istiyorsunuz? Korozyon direncini mi artırmak istiyorsunuz? Ya da aşınma direncini mi iyileştirme istiyorsunuz? Hedefiniz ne ise ona ona uygun takviye elemanı seçimi yapılmalıdır. Aksi halde doğru seçim/ karar verilmeyebilir ve deneysel elde edilen sonuçlarda istenilen beklentiler sağlanamayabilir.



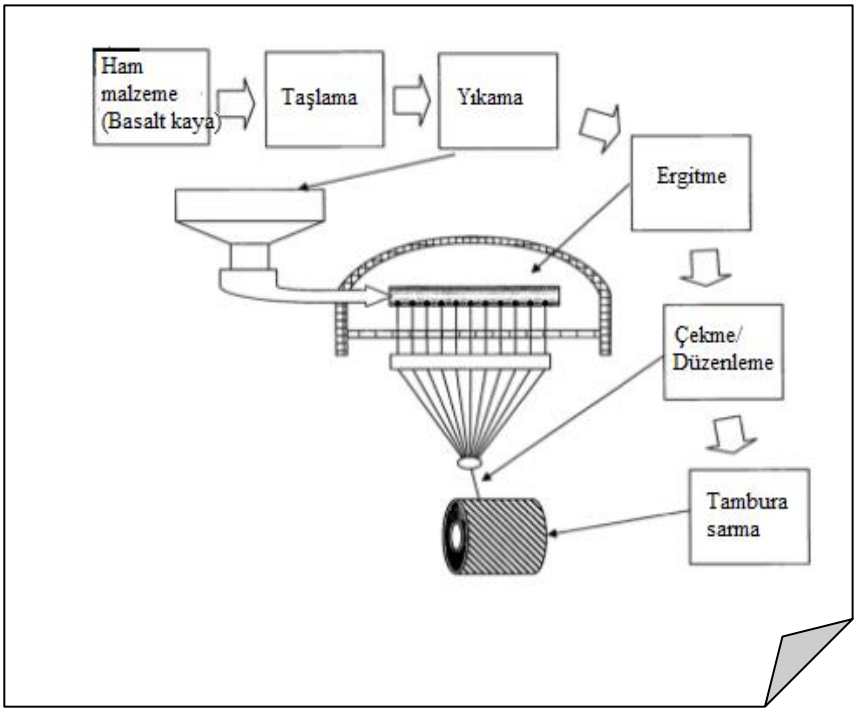



a)Kısa elyaf takviyelirastgele yönlendirilmiş cam elyaflar	b)Büyük(6mm/12mm) parçacık boyutlu cam	c) Tek uçlu sürekli fitil elyaf	d) Dokunmuş/kumaş cam elyaf

Şekil 3. Değişik Formatta Üretilmiş Olan Cam Elyaflar. (A) Kesikli-Rastgele Yönlendirilmiş Kırpılmış Fiber, (B) Büyük Parçacıklı Elyaf, (C) Tek Uçlu Surekli Elyaf, (D) Dokuma Türü Cam Elyaf

Basalt fiber

Basalt takviye elemanı; karbon ve aramid elyafla karşılaştırıldığında daha geniş sıcaklıkta kullanım alanı sağlamaktadır (-269 ^{o}C'den 650 ^{o}C'e kadar). Bu yüzden de; oksidasyon direnci, radyasyon direnci, basma dayanımı ve kayma dayanımı daha yüksektir. Bazalt, volkanik kayaçlardan elde edilen koyu altın renginde veya siyah renkte, tok olan bir maddedir. Sürekli elyaflar, kırılmış bazalt kayaçların 1350 ^{o}-1700°C sıcaklıkları arasında platin/rodyum ateşe dayanımlı potalarda ergitilerek, alt haznede bulunan yüzlerce meme deliklerinden akıtılıp iplik haline getirilerek üretimi gerçekleştirilir (Şekil 4). Sonra bu iplik haline getirilmiş olan elyaflar tamburlara sarılarak depolara gönderilmektedir. Elbette bazalt elyaflar da hızlı soğutulma ve kaplama işleminden geçirilmektedir. Bazalt elyafların üretiminden daha iyi sonuçlar elde edilmektedir çünkü camların üretiminde kullanılan ilave katkı maddelerinin olmaması ve çevre dostu bir eleman olmasıdır. Bu nedenledir ki, ekonomik açıdan bakıldığında, karbon ve camlara göre avantajlı, %100 doğal, çevreye zarar verici olmayışıdır (Sfarra ve ark. 2013). Bunun yanında, Bazaltların ısı karşısında direncinin yüksek olmasından dolayı yangın yalıtım malzemesi olarak kullanılabildiği gibi gürültünün izole edilmesinde de olumlu performanslar sergilemektedir.



Şekil 4. Basalt Fiber Üretim Ünitesi Ve Aşamaları

Asbesto'nun geçmişte otomotiv sanayinde, balatalarda kullanılmış olması ile insan sağlığına zararlı olduğu kanıtlanmıştır. Onun yerini ise son yıllarda basalt kullanılmaktadır. Şekil 5' de değişik tür ve şekilde üretilmiş olan basalt elyafları gösterilmiştir. Burada da yine sırasıyla; (a) kısa parçacıklı-rastgele yönlenmiş elyaflar, (b) choped/ufalanmış fiber, (c) hortum üretmek amacıyla tasarlanmış olan silindirik içi boş elyaf örgü sarmalı ve (d) dokuma türü basalt elyaf şeklinde sıralanabilir. Ayrıca, tek/çok uçlu surekli fitil bobin oluşturan elyaflarda üretilmekte ve kompozit yapımında kullanılmakta fakat burada gösterilmemiştir. Her birisi farklı bir amaç ile kullanılmalıdır. Örneğin, choped/ufalanmış fiber, genellikle inşaat işlerinde, yol yapımı esnasında dengeyi sağlamakta tokluk özelliği nedeniyle çok fayda sağlarken diğer içi boş formatta olan elyaf türü ise söndürme aygıtlarında ve ateşe karşı koruyucu amaçlı cihaz ve ürün geliştirmek için daha çok seçilir. Fiyat bakımından E camdan pahalı, S cam'dan, aramid ve karbon fiberden daha ucuz, ancak dünyada üretim arttıkça fiyatı da düşmektedir. Koruyucu havlu, tüp şeklinde istenilen profilde üretimi mümkün olup motor ve generatörlerde termal koruma sağlarken temel amaç; ısıya karşı direnci artırmak olduğu için basalt elyafların son yılllarda daha çok uygulandığı görülmektedir.



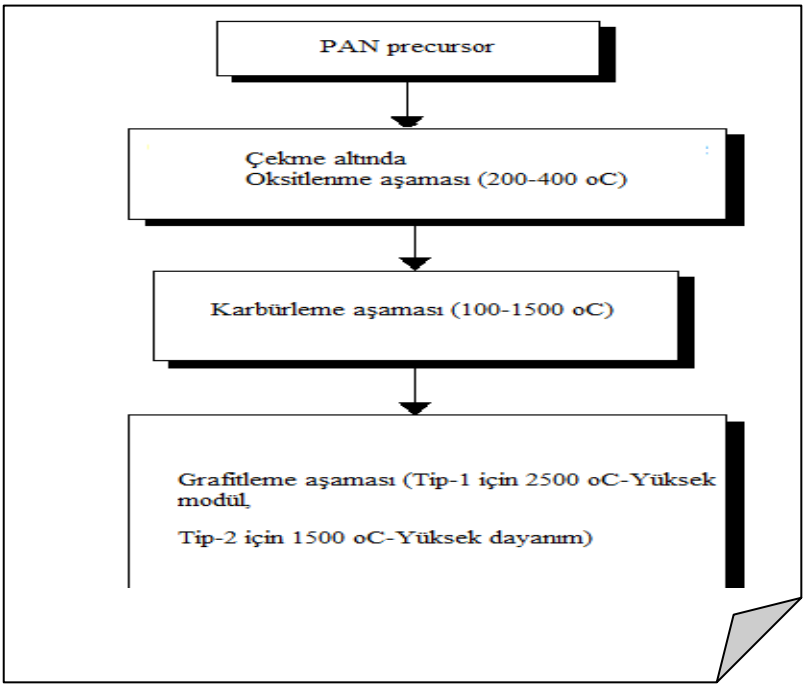



a) Kısa elyaf – rastgele yönlendirilmiş basalt elyaflar	b) Choped fiber takviye elemanı	c) Hortum üretmek için tasarlanmış /örgülü kol	d)Dokunmuş/kumaş basalt elyaf

Şekil 5. Değişik Formatta Üretilmiş Olan Basalt Elyaflar. (A) Kısa Elyaf Parçacıklı, (B) Choped/Doğranmış Fiber, (C) Hortum Üretim Amaçlı Örgülü Kol Elyaf, (D) Dokuma Türü Basalt Elyaf

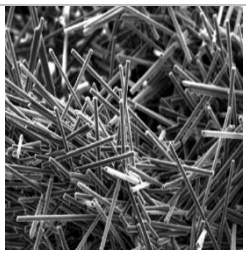
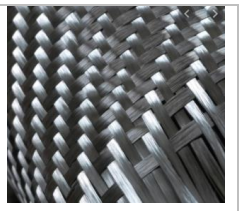
Karbon

Bu takviye elemanı, çekme dayanımı ve elastik modülü yüksek olan elyaftırlar. Grafitler, karbon atomların altıgen düzlem katmanında ABABAB sırasıyla düzenli olarak dizilmesiyle meydana gelir. Tabakalar atomlar arasında kovalent bağlar kuvvetli iken katmanlar arasında bağlar zayıftır. Grafit takviye elemanın, ham maddesi poli-akro-nitril (PAN), Selüloz (Rayon) ve Zift (Pitch) 'tir. PAN esaslı elemanlarda, %93-95 karbon bulunurken grafitlerde %99'ın üzerinde karbon bulunur. Karbon ve Grafit aynı mıdır? sorusunun cevabı da verilmiş oldu. Diğer bir fark ise, karbon 1300 ^{o}C-1500°C'de üretilirken grafit ise 2000 ^{o}C 'nin üzerinde üretilir. PAN karbon esaslı takviye elemanlarının üretim şematik olarak Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. PAN Esaslı Karbon Elyafın Üretimi

İlk basamakta elyaf oksijeni emerek kısalma önlenirken ikinci aşamada ise elyaf içindeki N2, H2, CO atomları dışarı atılır ve gazlar dışarı atılır, kristalleşir karbon. Son aşamada kristalimsi bölge, 2000 ^{o}C'de büyüyerek grafitleşir. Dolayısı ile elastik modülü; (a) son işlem sıcaklığı, (b) başlangıç ham maddesi, (c) kristalin mükemmelliği ve (d) boyut etkisine bağlı olarak değişir. Şekil 7'de değişik formatta üretilmiş olan karbon elyaflar gösterilmiştir. Bunlar sırasıyla; (a) rastgele yönlenmiş kesikli karbon elyaflar, (b) çok uçlu fitil bobinler ve kırpılmış elyaflar, (c) karbon reçine emdirilmiş tabaka ve son olarak (d) dokuma/keçe karbon elyaf olmak üzeredir.

			
a) Rastgele yönlendirilmiş-kesikli karbon elyaflar	b) Çok uçlu sürekli fitil bobin ve kırpılmış takviye elemanı	c) Reçineye gömülmüş elyaf demeti (prepreg)	d) Dokunmuş/kumaş şeklinde elyaf

Şekil 7. Değişik Formatta Üretilmiş Olan Karbon Elyaflar. (A) Kesikli Elyaflar, (B) Tek/Çok Uçlu Sürekli Fitil Elyaf Bobin Ve Kırpılmış Karbon Elyaf, (C) Karbon Reçine Emdirilmiş Tabaka/Fiber Demeti, (E) Dokuma Veya Keçe Karbon Elyaf

Boron

Boron (bor) elyaf, oda sıcaklığında katı olan hafif elementlerden birisi çok gevrek olduğundan klasik teknikler ile üretmek mümkün olmadığı için; bor, hidrojen ile bor triklorürün reaksiyonu ile yaklaşık 1300 ^{o}C'e sıcaklığa kadar ısıtılan tungsten (w) teli veya karbon (c) üzerine çökeltilerek elde edilir. Tungsten telin çapı 15 μm iken, bu metot ile elyaf çapı 100-140-200 μm kadar ulaşabilir. Bu nedenle, basma kuvvetinin yüksek olduğu yerlerde uygulamak daha yararlıdır. Karbon çekirdek düşük yoğunluğa sahip olduğundan (1.8 gr/cm^3) tercih edilmekte, bor ile reaksiyona girmemesi de ayrı bir avantaj sağlamaktadır (Trumper,1987). Başlıca avantajları/dezavantajları;

- Yüksek dayanım, rijitlik ve yüksek sıcaklık direnci (çekme, basma ve yüksek sıcaklıkta),
- Yüksek yoğunluk,
- Yüksek maliyet, şeklinde sıralanabilir.

Şekil 8'de değişik formatta üretilmiş olan bor elyaflar gösterilmiştir. Bunlar; sırasıyla (a) BN ve B2C4 tozları, (b)) Tek/çok uçlu sürekli bor fitili, (c) Reçine emdirilmiş bor tabakası (prepreg), (d) Dokuma şeklinde bor fiber sıralanmıştır. Bu takviye elemanları ucuz olmamasına rağmen uzay sanayinde uygulama alanı bulmaktadır. Fiyat konusu elbette tamamen daha çok tüketime bağlı bir olaydır.



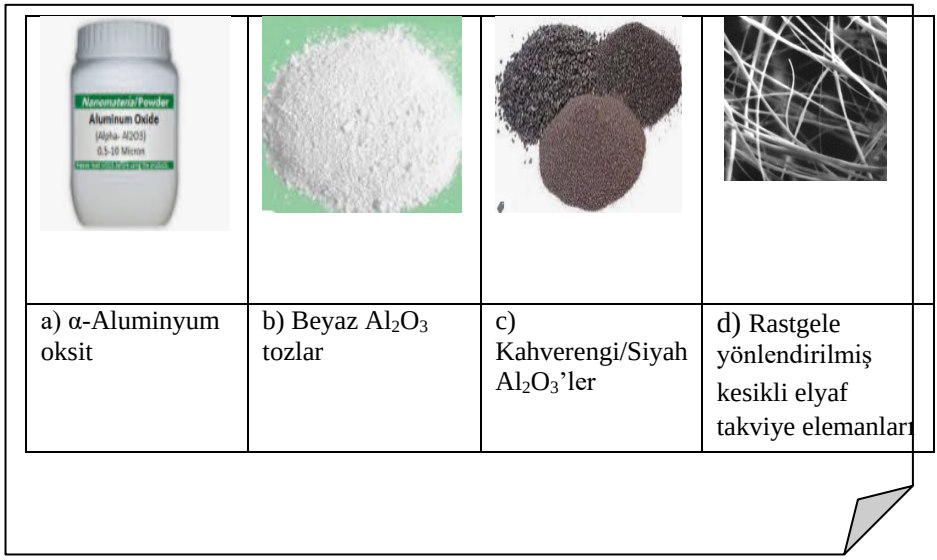



a) Bor karbür (B2C4) (b2) Bor nitrür (BN) tozları	b) çok uçlu sürekli bor elyaf fitili	c) Reçine emdirilmiş bor elyaf demeti (prepreg)	d) Dokunmuş bor elyaf

Şekil 8. Değişik Formatta Üretilmiş Olan Bor Elyaflar. (A) BN Ve B2C4 Tozları, (C) Reçine Emdirilmiş Bor Tabakası (Prepreg), (E) Dokuma Bor Fiber

Aluminyum Oksit

Aluminyum oksit "alumina" iki cinsi bulunur, α-alumina olup "FP" olarak anılırlar, ortalama 20 μm çapında fakat uzun sürekli olarak üretilirler. Bunlar çok kristalli, % 99 saf aluminyum oksit bulunur, yaklaşık 1000 ^{o}C'e kadar mukavemetini sürdürür. Diğer cinsi ise "Safimax/Saffil'olarak bilinir. Delta fazlı δ-alumina "RF" ile gösterilir. Bu takviye elemanları kesilmiş/kırpılmış şekilde üretilir. Bunlar % 95 aluminyum oksit ve % 5 silis içerir, çok kristalli ve ortalama tane boyutu 0.05 μm'dır. Buradaki silis; Al alaşımları ile elyaflar arasında yapışma bağını iyileştirir, tane büyümesini önler. Sıcaklık karşısında direnci yaklaşık 1230 ^{o}C'e kadar mükemmeldir (Taya, Arsenault,1988). Saffil takviye elemanları; 3 μm çap, 500 μm ortalama uzunluk ve 3950 kg/m³ yoğunluğa sahiptirler. Bu takviye elemanı metal karma malzemelerde daha çok uygulanmaktadır. Bu seramikler izotropik davranış sergiler, basma/çekme dayanımları yanında yüksek elastik modülüne sahiptirler. Bu oksit içerikli seramiğin son şekli ise whisker/kılcal kristaller'dir. Vista A.Ş. çapı 30 μm'a kadar olan whiskerler üretmişlerdir. Şekil 9'da farklı formatta üretilmiş olan Al_2O_3 tozlar/elyaflar gösterilmiş olup bunlar; (a) α-Aluminyum oksit, (b) nano-boyutlu beyaz Al_2O_3 tozları, (c) kahverengi/siyah Al_2O_3 tozlar, (d) rastgele yönlendirilmiş elyaflardan oluşmaktadır.



a) α-Aluminyum oksit	b) Beyaz Al_2O_3 tozlar	c) Kahverengi/Siyah Al_2O_3'ler	d) Rastgele yönlendirilmiş kesikli elyaf takviye elemanları

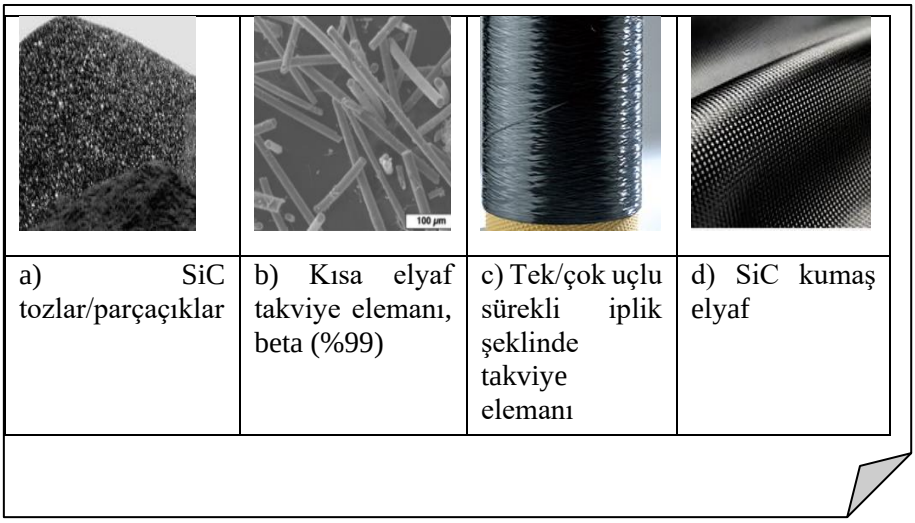
Şekil 9. Değişik Formatta Üretilmiş Olan Al_2O_3 Toz/Elyaflar. (A) A-Aluminyum Oksit Tozlar, (B) Beyaz Al_2O_3 Tozları (Nano-Boyutlu), (C) Kahverengi/Siyah Al_2O_3 Tozları, (D) Rastgele Yönlendirilmiş Kesikli Elyaflar

Silisyum Karbür

"General Teknoloji Şirketi (GTŞ)" SiC üzerine yoğunlaşırken 1966 yılından sonra "Avco Şirketi" tungsten ana malzemesi üzerine SiC filamentleri üzerine çalışmışlardır. SiC'ün üretimi iki usülle yapılır. Birincisi, kimyasal buhar fazında yoğunlaştırma ile üretilirken ikincisi SiC'den direkt fiber çekilerek üretilir. Bazı avantajları şöyle özetlenebilir:

- Mukavemetli olması yanında ekonomik olması,
- SiC'ün çok sert olması,
- Yüksek ısı iletkenliğine sahip olması,
- Yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemete sahip olması.

Değişik şekil, biçim ve formatta üretilmiş olan SiC parçacıklar/elyaflar Şekil 10'da gösterilmiş olup bunlar; (a) SiC tozları ve parçacıkları, yeşil ve koyu renkli SiC tozlar, (b) Kesikli rastgele yönlendirilmiş SiC parçacıklar, beta fazlı, (c) Tek veya çok uçlu sürekli iplik şeklinde elyaflar ve (d) kumaş SiC'lerden oluşmaktadır.

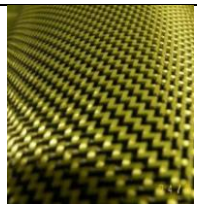


a) SiC tozlar/parçaçıklar	b) Kısa elyaf takviye elemanı, beta (%99)	c) Tek/çok uçlu sürekli iplik şeklinde takviye elemanı	d) SiC kumaş elyaf

Şekil 10. Değişik Formatta Üretilmiş Olan Sic Elyaflar. (A) Siyah Sic Tozları, (B) Rastgele Yönlendirilmiş Kesikli Elyaflar, (C) Tek/Çift Uçlu Sürekli Sic Elyaf İpliği/Fitili, (E) Dokuma Sic Elyafı

3.7. Aramid elyaflar

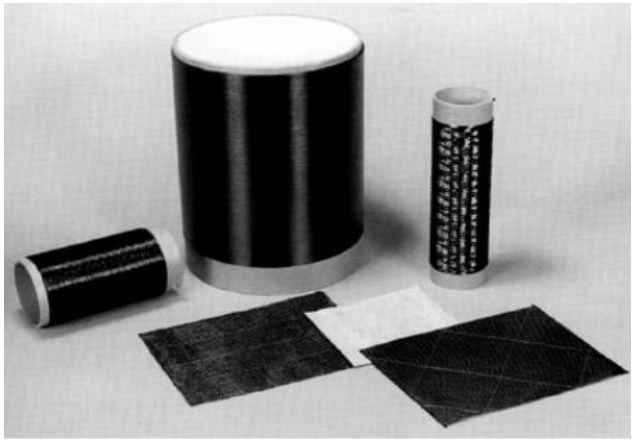
Kevlar para-phenylene diamine ve terephthaloyl klorit'ten elde edilir. Fakat bunlar öncelikle çözücü ile eritilir, üzerlerine H_2SO_4 ilave edilir. Havalandırma sonrası su / sülfürik asit banyosundan geçirilir oda sıcaklığında. Banyo sonrası elyaflar yıkanır, kurutulur ve depoya gönderilmek üzere bobine sarılır, çekme altında 550 ^oC sıcaklıklarda azot atmosferinde ısıtılır. Kevlar 29 ve 49 olarak iki cinsi üretilmektedir. Kevlar 29, kumaş şeklinde, kurşun geçirmez koruyucu yelek ve sürtünen malzemelerde halat ve kabloların yanısıra otomobil araba lastiğinde de kullanılır. Kevlar 49 ise elastik modülü yüksek olduğu için kimyasal etkilere/yorulmaya karşı performansı daha iyi, diğer takviye elemanları ile hibrit kompozit yapımında kullanılmaktadır. Fakat suya /neme karşı çok zayıf, UV ışığı karşı mekanik davranışları hızla düşer. Yoğunluğu çeliğin yaklaşık 1/8 kadar azalır. Değişik formatta üretilmiş olan Aramid elyaflar/parçacıklar Şekil 11'de gösterilmiştir. Bunlar; (a) küçük parçacık/tek uçlu fitil elyaflar, (b) tabakalı elyaf, (c) büyük parçacıklı Kevlar, (d) kumaş şeklinde Kevlar elyaflardan oluşmaktadır. Sürekli iplik formunda olan takviye elemanı da üretilmekte olup burada gösterilmemiştir. Üretilen bu tür parçacık/elyafların renginin sarı ve tonları olduğunu, kompozit yapımı için kullanılan diğer elyafların her birisinin farklı renkte olduğunu ve niçin bu renklerin oluştuğunu da inceleyin.

			
a) Parçacık/uzun sürekli çok uçlu elyaf-Kevlar elyaf (Balistik amaçlı)	b) Elyaf bandı-Kevlar	c) Büyük parçacıklı takviye elemanı	e) Dokunmuş veya kumaş elyaf türü

Şekil 11. Değişik Formatta Üretilmiş Olan Aramid Elyaflar/Parçacıklar. (A) Küçük Parçacık/Uzun Sürekli Elyaflar, (B) Tabakalı Elyaf, (C)) Büyük Parçacıklı Kevlar, (D) Sürekli İplik Formunda Takviye Elemanı, (E) Dokunmuş Kevlar Elyaflar

Reçine Emdirilmiş Takviye Elemanları (Prepreg)

Reçine emdirilmiş takviye elemanlarını (Prepreg) tekrar hatırlatalım. Reçine emdirilmiş takviye (resin-impregnated fiber) malzemelerine (fiber, kumaş vb.) verilen bir isim "Prepreg"dir (Şekil 12). Bunlar, tek-yönlü bant (unidirectional tape), iki-yönlü takviyeli bant (bidirectional), örgülü-kumaş (woven-fabrics) veya fitil/iplik (single/multi-fiber roving) şeklinde üretilmektedir. Elbette benzer şekilde termoset ve termoplastiklerin'de prepregleri mevcuttur.



Şekil 12. Farklı İçerikli Tek-Filament Ve Çoklu-Flament Demetli Reçine Emdirilmiş Elyaf Bantları

Yukarıda üretimi, metotları, özellikleri, geometrisi, biçim ve türü verilen bazı seramik elyafların yaygın olarak günümüzde çok değişik alanlarda; uçak ve uzay, otomative, inşaat, gemi ve eğlence sektörleri vb. yerlerde tercih edilen bu takviye elemanlarının kullanım alanları burada sırasıyla kısaca özetlenmiştir.

UYGULAMA ALANLARI

Havacılık/Uzay Sanayinde İleri Kompozit Malzemelerin Kullanılma Avantajları şöyle özetlenebilir:

- Yaklaşık %20'den %50' varan ağırlık düşmesi olması,
- Düşük ağırlıklı bir sistemde tek-katmanlı kalıplanmış yapılar daha yüksek dayanım sağlaması,
- Yüksek darbe direnci elde edilmesi (yakıt taşıyan tankların yapımında Kevların kullanımı),
- Termal kararlılık sağlanması,
- Yorulma/korozyon direncinin artması,
- Yapısal parçaların karma malzemeden yapılması halinde montajların daha kolay olması.

Uçaklarda ve helikopterlerde iç mekân tasarımında ve yapısal malzeme üretiminde kullanılmaktadır.

(a) Kompresör Kanatları, Gövde, İç Donanım: B/Al, SiC/Al, Gr/Al,

(b) Türbin Kanatları: Wolfram ve Tantal takviyeli malzemeler,

(c) Helikopter Parçaları: B/Al, SiC/Al, Gr/Al, Gr/Mg, Al2O3/Mg, Al2O3/Al.

Cam elyafların kullanım alanları

E camı, düşük maliyette yüksek elastiklik ve yorulma dayanımı gerektiren parçalar,

S camı, istatiksel olarak fazla yüklenen hafif parçalar ve daha yüksek modül istenmesi,

C camı, daha iyi korozyon direnci istenmesi halinde, tercih edilir.

R camı da yüksek dayanımı ve korozyon direncinin önemli olduğu hallerde tercih edilebilir**.**

1. Uçak ve uzay sanayi

- Helikopter ve uçaklarda uçuş kabini zırhı,

- Uçak kanadı,
- Helikopter zırhı,
- Koltuklar ve zemini,
- Rüzgar turbini vb.,

2. Otomotiv sanayi

- Ön/arka tamponlar,
- Dikiz aynası,
- Far gövdesi
- Otomobil gösterge paneli; GMT,
- Otomobil Yan Gövde İskeleti; Ford, CTP,
- Otomobil Kaporta; Corvette, SMC CTP

3. Kimya sanayinde

- Korozyona dayanıklı olan yerlerde basınçlı kaplar,
- Yakıt tankı
- Asit tankı vb.

4. Fiber optik kabloların yanısıra termal yalıtımın önemli olduğu yerler.

- Boru hattı destekleme ve birleştirme,
- Anten yansıtıcılar.

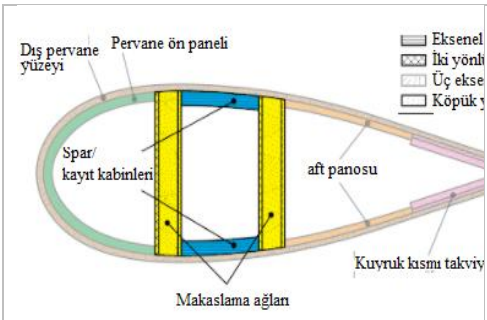
5. İnşaat sektörü

- Cephe korumaları, tatil evleri,
- Büfeler,
- Otobüs durakları,
- Soğuk hava depoları,
- İnşaat kalıpları,
- Balkon Korkuluğu; CTP, vb.

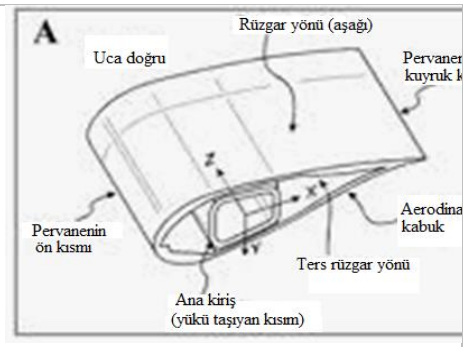
6. Sağlık sektörü

- Diş hekimliğinde ise diş dolgusu olarak kompozit reçineler, diş destek materyali olarak kolljen lif ile güçlendirilmiş epoksi reçinesi kullanılmaktadır.
- Ortodontik teller; cam lif ile güçlendirilmiş (naylon, polipropilen, polimetilmetakrilattan) imal edilmektedirler.

Cam Takviyeli Kompozit (CTP)'den yapılmakta ve kullanılmaktadır. Termoset ve termoplastik bazlı malzemeler otomotiv sanayinde kullanımı giderek daha fazla talep gören çeşitler arasındadır. Örneğin, Toyoto, Volkswagen Golf, Volkswagen Polo, Audi A4 marka otomobillerde ön tarafları cam elyaf takviyeli termoplastik malzemeden üretilmektedir. Volkswagen ve onun sanayiinde gerçekleşen Alman ürünü otomobilleri yeni çıkardıkları araçlarında polimer matrisli kompozit malzeme gereksinimlerinden oldukça faydalanmaktadır. Şekil 13'de cam elyaftan tasarlanmış ve yapılmış olan bazı polimer bazlı kompozit sistemler ve yapılar görülmektedir. Bunlar sırasıyla Şekil 13 (a) uçakların türbin pervanesi, Şekil 12 (b) pervanenin ön ve arka kuyruk kesitleri, Şekil 13 (c) enerji sektöründe enerji üretmek amacıyla tasarlanan rüzgâr türbin pervaneleri, Şekil 13 (d) sahil güvenlik kayıkları, Şekil 13 (e) kimyasal depolama kazanları ve nihayet Şekil 13 (f)' de bina yapımı cam elyaf takviyeli beton aracılığı, (**g)** kompozit cephe/kapı ve (h) İzolasyon amaçlı yapılan cam takviyeli kompozit ile gerçekleştirilmiştir.



a) Cam/Karbon takviyeli plastik kompozitten yapılmış olan tek yönlü,iki yönlü ve üç yönlü türbin pervanesi



b) Pervanenin ön/arka kuyruk kısmı ve kesiti

	
c) Cam elyaflardan yapılmış olan rüzgar türbini.	d) Deniz kayığı cam takviyeli plastik kompozit
	
e) Korozyona dirençli sıvı/kimyasal depolama tankları	f) Cam elyaf takviyeli beton.
	
g) Kompozit cephe/kapı	h) İzolasyon amaçlı yapılan cam takviyeli kompozit

Şekil 13. Cam Elyaftan Yapılmış Olan Bazı Polimer Bazlı Kompozit Sistemler Ve Yapılar. (A) Uçaklarda Turbin Pervanesi, (B) Pervanenin Ön Ve Arka Kuyruk Kesitleri, (C) Enerji Sektöründe Enerji Üretmek Amacıyla Tasarlanan Rüzgar Turbini, (D) Sahil Güvenlik Kayıkları, (E) Kimyasal Depolama Kazanları, (F) Çelik Yanında Bina Yapımında Kullanılmış Cam Takviyeli Elyaflar Ve (G) Kompozit Cephe/Kapı, (H) İzolasyon Amaçlı Yapılan Cam Takviyeli Kompozit

BASALT ELYAFLARIN KULLANIM ALANLARI

- Yüksek dayanım ve rijitlik,
- Korozyon direnci,
- Gürültü/titreşim ve ısıl yalıtım özelliklerinin iyi olması,
- Maliyetinin karbon elyaflardan düşük olması, nedeni ile tercih edilmelidir.

1.Otomotiv endüstrisi

- Fren balatası ve plakası,
- Silindir başlıkları,
- Tampon,
- Egzoz çıkış sistemi termo yalıtımı,
- Endüstriyel filtre,
- Termal bariyer yapımı,
- Şaft yapımı,
- Sıvı depolama tankı,
- Plastik boru,
- Yangın söndürme aparatı/hortumu,

2. İnşaat sanayi ve bina yapımı

- Bina yapımı
- Yol yapımı
- Asfalt yapımı
- Köprü yapımında.

İnşaat alanı içinde çok önemli basalt lifleri kullanmak çünkü 1 tonluk basalt takviyeli beton yaklaşık 9.6 ton çelik takviye elemanına denk gelmektedir. Bunun anlamı; yaklaşık 10 kat daha az ulaşım ve yerleşim maliyeti düşecek ve daha az betona ihtiyaç duyulacak demektir. Diğer taraftan basalt takviye elemanı, çeliklere göre çekme dayanımı 3 kat yüksekken 4 kat daha hafif yapı demektir.

3. Gemi sektörü

- Kayık vb.

4. Eğlence sektörü

- Bisiklet /Time firması,

5. Enerji sektorü

- Rüzgar türbini yapımı, cam elyafa alternatif olarak son yıllarda uygulanmaya başlanmıştır. 40 m ve 60 m boylarında tasarlanmakta olup ve cam elyaflardan daha iyi performans sergilemektedirler.

Şekil 14'de basalt elyaftan tasarlanmış ve yapılmış olan bazı polimer bazlı kompozit sistemler ve yapılar görülmektedir. Bunlar sırasıyla Şekil 14 (a) fren balata ve pabucu, Şekil 14 (b) de bazı otomobil parçaları, Şekil 14 (c) sıvı depolama, basınçlı kaplar ve kazanları, Şekil 14(d) enerji sektöründe tasarlanan rüzgar turbin kanatları, Şekil 14 (e) yangın söndürme aparatı ve hortumu, Şekil 14 (f) bisiklet gövdesini gösterirken nihayet Şekil 14 (g,h) ise yol yapımı ve asfalt yapım işlerinde kullanılmış choped/kesilmiş basalt elyaf takviye elemanlarını göstermektedir.

	
a) Fren balata ve pabucu	b) Binek otomobil parçaları
	
c) Sıvı tankı deposu	d) Rüzgar türbini kanatları
	
e) Yangın söndürme aparatı ve parçaları	f) Bisiklet gövdesi
	
g) Yol yapımı ve düzenlenmesi	h) Asfalt yapımı.

Şekil 14. Basalt Elyaftan Yapılmış Olan Bazı Polimer Bazlı Kompozit Yapılar Ve Aletler.(A) Fren Balatası/Pabucu, (B) Otomobil Parçası, (C) Sıvı Tank Deposu, (D) Rüzgar Turbini, (E) Yangın Söndürme Aparatı, (F) Bisiklet, (G,H) Yol Ve Asfalt Yapımı

KARBON ELYAFIN UYGULAMA ALANLARI

Karbon,

- Minimum ağırlık,
- Yüksek dayanımlı karbon: Yüksek dayanım ve orta rijitlik,
- Yüksek modüllü karbon: Çok yüksek rijitlik ve orta dayanım, elde edilir.

Karbon elyafların genel kullanım alanları aşağıdaki gibidir.

1.Uçak ve uzay endüstrisi

- Kanat kenar panelleri,
- Yatay/düşey dümenler,
- Kanatçıklar,
- Taban kirişler, kapılar,
- Helikopter pervaneleri.

2. Otomotiv sanayi

- Yarış arabaları, yarış motorlar (Formula 1 arabaları),
- Jet motorlarının pervaneleri (Rolls Royce Şirketinin geliştirdiği RB211),
- Piston kolları,
- Araba jantları,
- Direksiyon takımı.

3. Spor ekipmanları/aletleri

- Tenis raketi,
- Hokey sopaları,
- Kayaklar,
- Oltalar,
- Bisikletler.

4. Gemicilik

- Kayık,
- Sahil botları,
- Yakıt tankları ve gemi vb.

5. Genel ulaşım alanı

- Otobüs havalandırma kanalları,

- Port bagaj parçaları,
- Gösterge paneli; CTP,
- Açık alan servis (Golf arabası) araçları kaporta, tavan; CTP,
- Konteyner tabanı; GMT (Preslenebilir takviyeli termoplastik)

6. Sağlık alanı

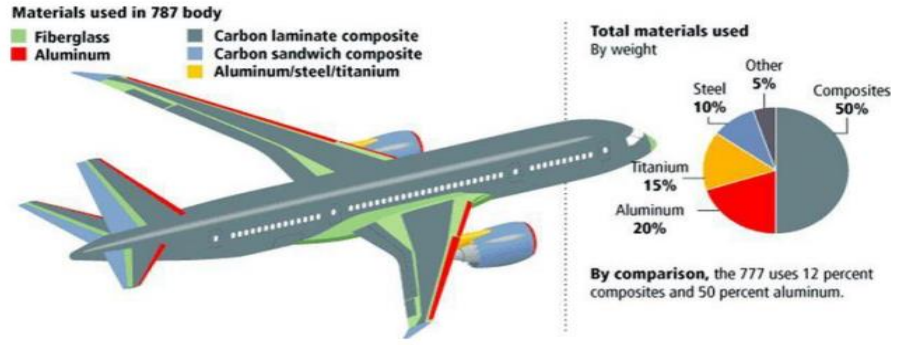
- Tekerlekli sandalyeler (Cam / Karbon Elyaf takviyeli Polyester).
- Tıbbi Tetkik Cihazları Dış Muhafazaları (CTP malzeme),
- Protez bacak,
- Kalça protezi.

Karbon elyafların uçak ve uzay endüstrisinde kullanılmalarının ana sebepleri:

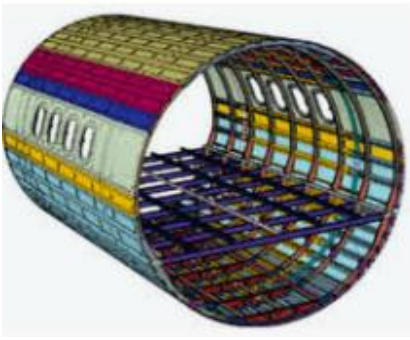
- Karbon elyafların özgül dayanımları metallerden yaklaşık yedi kat fazla olması,
- Sıcaklık ile genleşme eğilimlerinin çok düşük olması,
- Çelik ve alüminyum gibi geleneksel mühendislik malzemelerinden iyi bir yorulma dayanımı göstermesi,
- Performans / maliyet oranının gittikçe daha avantajlı olması.

Boeing 787 uçak ana gövdesi diğer bazı akşamların/parçaların yapımında kullanılan bazı Ti,Al gibi metaller ve cam/karbon elyaflı uygulamaları Şekil 15 (a,b)'de görülmektedir. Burada Çelik, Ti ve Aluminyum yaklaşık %10, %15, %20 teşkil ederken diğer çoğunlukla %50 civarında kompozit malzemelerden yapılmış olduğu görülmektedir. Elbette bu sadece Boeing şirketi tarafından değil diğer İngiliz Uçak şirketleri de, örneğin, A320 ve A380 tipi uçaklarında; kanatlar, gövde iskeleti ve giriş kapıları karbon takviyeli kompozit malzemelerden yapılmaktadır. Şekil 15'de karbon elyaftan yapılmış olan bazı polimer bazlı kompozit sistemler ve yapılar görülmektedir. Bunlar sırasıyla; Şekil 15 (c) de helikopter rotor mili ve pervanesi, Şekil 15 (d,e)' de sırasıyla otomobilin tampon ve BMW i3 otomobilin kapıları dahil bazı parçaları, Şekil 15 (f,g) de karbon fiberlerden yapılmış olan otomobil jantı ve yine lüks otomobilde kullanılan petekli yapı gösterilmiştir. Bu petekli kompozit, cam, karbon, aramid yanında Al, Ti gibi matriksler seçilerek yapılan hafif yapılardır. Bu tür sandviç yapıların iç ve dış tabakaları arasına bu petekli yapılar yerleştirilir sistemi hafifletmek için. Bilhassa çarpma sonucu or-

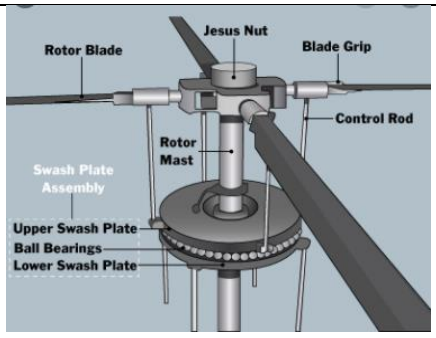
taya çıkan enerjinin emildiği yüksek mekanik dayanım gerektiren konstrüksiyonlarda kullanılmaktadır. 2011 yılında elektirikli 5 kapılı, BMWi3 otomobilin iç ve dış yapıların çoğu karbon takviyeli plastik kompozitlerden (CFRP) yapılmıştır. 2012 yılından beri üzerinde çalışılan "PAL-V adlı" uçan araba piyasaya çıkarılmış, Liberity firması tarafından 2020 yılında sürüş testlerini tamamlamış/plakasını almış olan Avrupa yollarının yolcusu olmaya hazırlanıyor. Şekil 15 (h) da gösterilmiş olup temelde karbon fiber kullanılmış olmasına rağmen Kevlar ve diğerleri ile hibrit kompozitten yapılmıştır.



a) Boeing 787 uçak gövdesinin yapımında kullanılan bazı mühendislik malzemeleri ve kompozitler.



b) Uçak ana gövdesi ve kesiti.



c) Helikopter rotor mili/pervanesi.





d) Yüksek performanslı otomiller için karbon fiberden yapılan gövde ve tampon kısmı	e) BMW i3 model binek otomobil, gövde ve iskelet dahil.
	
f) Otomobil jantı (Karbon fiber takviyeli kompozitten yapılan).	g) BMWi3 model otomobilde Karbon fiberden yapılan petekli yapı
	
h) PAL-V Liberty tarafından yapılan Uçan otomobil (Katlanabilir uçak).	

Şekil 15. Karbon Elyaftan Yapılmış Olan Bazı Polimer Bazlı Kompozit Yapılar Ve Ürünler. (B) Uçak Ana Gövdesi Kesiti, (C) Helikopter Rotor Mili, (D,E) Tampon Ve Kapılar Dahil İç/Dış Parçalar, (F) Karbon Elyaftan Yapılmış Jant, (G) Petekli Yapı Sistemi, Ve (H) Uçan Otomobil

Buna ilaveten, karbonlar hem Boeing hem de Airbus uçaklarında karbon-karbon kompozit lameli olarak frenler yapılmakta ve kullanılmaktadır çünkü oldukça hafif, yakıt tasarrufu iyi, dayanıklı ve daha da önemlisi 1200m mesafede durmak zorunda iken yaklaşık 1500-1600 ^{o}C sıcaklıkta açığa çıkan enerjinin boşalmasına imkan sağlamasıdır.

1990'lı yıllarda üretilen Boeing 757'lerde **%78 Alüminyum, %3 Kompozit** kullanılmasına karşın, 2010'da hizmete giren yeni bir yolcu uçağı tasarımında ise **%65 Kompozit, %11 Alüminyum** kullanılmıştır.[11]

Bor Elyaflar

Bor hangi amaçlar için kullanılır?

- Yüksek dayanım,
- Yüksek rijitlik,
- Yüksek basma dayanımı.

Bor elyaf hem polimer matriksli kompozitler hem de metal matriksli kompozit malzemeler için kullanım alanları mevcuttur, bunlar şöyle özetlenebilir:

1 - Uçak sanayi

- Jet motorunda geri itme kuvvetini önleyen metal matriksli kompozit yapı,
- Teleskop ayarları,
- Helikopter pervaneleri.

2- Otomotiv sanayi

- Binek otomobillerin direksiyon mili takımı,
- Tüp şeklinde şaftlar,

3 – Eğlence sanayi

- Bisiklet iskeleti,
- Tenis raketi.

Şekil 16'da bor elyaftan yapılmış olan bazı polimer/metal bazlı kompozit sistemler ve aygıtlar gösterilmiştir. Bunlar arasında jet motorunda oluşan karşı itiş kuvvetini dengeleyen metal matriks kompozitten yapılmış turbofan, helikopter pervanesi, bisiklet gövdesi ve kademeli içi dolu ve boş şaftların olduğunu söyleyebiliriz. Bunun ötesinde, bor bileşiklerin tozlarından yapılan karma malzemelerde mevcuttur. Boron nitrür bazlı uçuş şaftın avantajları şöyle özetlenebilir:

- Çelikten 5 kat daha dayanımlı olması,
- Çelikten 2 kat daha rijit olması,
- Grafit çubuklardan yapılan kompozitlerden %25 daha dayanımın yüksek olması,

[11] https://gelisenkariyerim.com/kompozit-cag-ucak-motor-uygulamalari

- Tüp şeklinde millerde basma dayanımının mükemmel olması,
- Darbe direncinin artmış olması.

Buna ilaveten, Bor karbür (B_4C), çok sert olduğundan tank ve hafif zırhlı araçların korunmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yeni çıkan helikopterler ve uçakların yanında zırhlı kara araçlarındada B_4C karbürler kullanılmıştır.[12]

3.9.5. Al_2O_3 /SiC'ün Uygulama Alanları

Aluminyum oksit

- Yüksek çekme basma dayanımı,
- Yüksek elastik modülüne sahiptir.

Silisyum karbür

- Yüksek sıcaklık dayanımı,
- Ekonomiklik, aranıyorsa bu elyafların tercih edilmesi gerekir.

Yüksek sıcaklıktaki mekanik performansına, akışkan gazlara ve kimyasal dayanımlarına istinaden seramik liflerinin çok çeşitli kullanım alanları vardır.

- Yüksek mukavemet, sertlik ve yüksek ısı yalıtkanlığı gerektiren kompozit teknolojileri,
- Uzun süreli ısı izolasyonu,
- Yüksek sıcaklıkta gaz filtrasyonu,
- Kesici takım ve takımlar.

Seramik lifleri uzay ve kimya endüstrisinde güçlendirici malzeme olarak sıklıkla kullanılmaktadır. En büyük kullanım alanlarından biri yüksek sıcaklıkta zorlanmaya uğrayan metal konstrüksiyonlardır. Motor teknolojisi buna örnek gösterilebilir.

[12] http://www.authorstream.com/Presentation/CMTCMT-2465379-kompozit-rh-malzemeleri

	
a)Jet motorunda metal matriksten yapılmış turbofan kompozit	b)Helikopter pervanesi
	
c)Bor fiber takviyeli epoksi kompozitten yapılmış bisiklet.	d)Kompozit zırh malzemesi (B4C)

Şekil 16. Bor Elyaftan Yapılmış Olan Bazı Polimer/Metal Bazlı Kompozit System Ve Ürünler. A)Jet Motorunda Metal Matriksten Yapılmış Turbofan Kompozit, B) Helikopter Pervanesi,

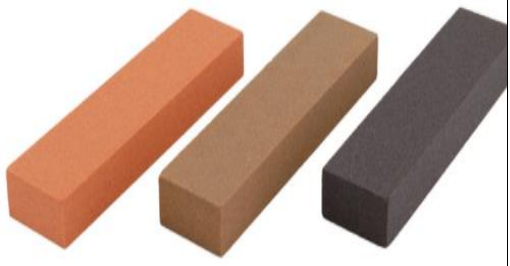
C)Bor Fiber Takviyeli Kompozitten Yapılmış Bisiklet, Ve (D) B4c'den Yapılan Kompozit Zırh

UYGULAMA ALANLARI

1.Otomativ sanayi: Motor teknolojisi, yanma odaları, yüzey kararlılığı genişleme yuvaları ve çeşitli kasklar,

- Piston kolu,
- Kesici takımlar,
- Kesme diskleri,
- Klasik seramik parçalar, muhtelif geometride.
- Al_2O_3'den yapılmış 25x100 mm'lik cep taşları.

Şekil 17'de ise Aluminyum oksit elyaf veya parçacıklardan oluşan bazı metal/seramik bazlı kompozit malzemelerden yapılan alet, takımlar, ve genel seramik ürünler gösterilmiştir. Seramikler, çok sert, gevrek ve ergime noktası çok yüksektirler. İstenilen özellikler elde etmek için seramik bazlı kompozitler yapılır. Bunlar Al2O3-SiO2, Al2O3-Si3N4 gibi matriks yanında Al2O3, SiC veya Si3N4 takviye elemanı olarak seçilebilir. Şekil 18 (a,b) de otomativ motor piston, Lamborghini ve Kesme diski/taşları, Şekil 17 (c,d) de muhtelif çeşit ve geometride genel seramikler ve Al_2O_3'den yapılmış 25x100 mm'lik bileme taşları gösterilirken Şekil 17 (e,f) de ise seramik matriksli kompozitten fren diski ve CMC yakıt duvarı dış ve iç astarı gösterilmiştir. CMC malzemeleri, süper alaşımlardan 200º-300ºF daha yüksek sıcaklıktadır. Bir yakıcı astar malzemesi olarak, SiC / SiC kompozitleri NOx'in karşılanmasına yardımcı olabilecek bir kolaylaştırıcı malzemedir. CMC malzemeleri, süper alaşımlardan 200º-300ºF daha yüksek sıcaklıktadır.

	
Otomativ motor piston, Lamborghini	Kesme diski/taşları
	
c) Muhtelif çeşit ve geometride genel seramikler	d) Al_2O_3'den yapılmış 25x100 mm'lik bileme taşları
	
a) Seramik matriksli kompozitten fren diski	e) CMC dış ve iç astarı

Şekil 17. Aluminyum Oksit Elyaf Veya Parçacıklardan Yapılmış Olan Bazı Metal/Seramik Bazlı Kompozit Yapılar Ve Aletler

Aramidin Uygulama Alanı

Aramidler, genelde ışığa karşı pek dayanıklı değillerdir. Süre ile mekanik özelliklerde önemli düşüşler meydana gelir.

Fakat ısıya karşı 300-400 ^{o}C çok dayanımlıdırlar. Bu özellik bazı mühendislik uygulamaları için önemlidir. Diğerleri ise;

- **Y**üksek çekme dayanımı,
- Orta rijitlik ve iyi şok direnci,
- Çok düşük basma dayanımı,

Yüksek elastik modülü ve dayanımları nedeniyle dinamik enerji sönümlendirmesinde (balistik olaylarda) kullanılırlar.

1. Koruyucu olarak

- askeri kep,
- kurşun geçirmez yelek,
- eldiven, iş yeri ayakabıları vb.

2. Endüstriyel malzeme olarak,

- halat/kemer,
- kablo,
- kordon,
- hortum,
- dokulu kayışlar.

3. Otomotive sanayi

- ısıya karşı conta,
- helikopter burnu,
- döşemeler,
- basınlı kaplar vb..

4. Gemi sanayinde

- yelken direği,
- yatlar,
- kayak.

Özetlemek gerekirse; koruyucu giysiler, eldiven, motorsiklet kepi, yelkenler, yatlar için yelken direği spor eşyası ve diğer askeri uygulama alanlarıdır. Otomotiv sanayi uygulamaları için kemer, hortum ve sürtünme balatalarında kullanılmaktadır. Elyaflar düşük yoğunluklu ve yüksek özgül modül özellikleri nedeniyle uzay sanayi alanlarında kullanılmasını sağlar.

Şekil 18'de Kevlar elyaftan yapılmış olan bazı polimer bazlı kompozit ürünler ve aletler gösterilmiştir. Bunlar sırası ile Şekil 18 (a) Motosiklet kasketi, (b) Kurşun geçirmez yelek, (c) Deniz kayığı, Şekil 18 (d) Radyal ayakkabı, (e) Sürekli elyaf takviyeli termoplastikten yapılan spor ayak-kabı şeklinde özetlenebilir. Bu örnekleri çoğaltmak mümkündür elbette, örneğin, halat, iş yeri elbisesi ve eldivenleri çünkü bunlar ısıya maruz yerlerde kullanım amaçlıdır.



a)Motorbisiklet helmet/kasketi



b)Kurşun geçirmez yelek



c)Sürekli elyaf takviyeli termoplastikten yapılan spor ayakkkabı



d)Kevlardan yapılan radial ayakkabı

Şekil 18. Kevlar Elyaftan Yapılmış Olan Bazı Polimer Bazlı Kompozit Sistemler Ve Ürünler. (A) Motosiklet Kasketi, (B) Kurşun Geçirmez Yelek,(C) Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastikten Yapılan Spor Ayakkabı , (D) Radyal Ayakkabı

Kompozit Malzemenin Sektörleri ve Tüketimi

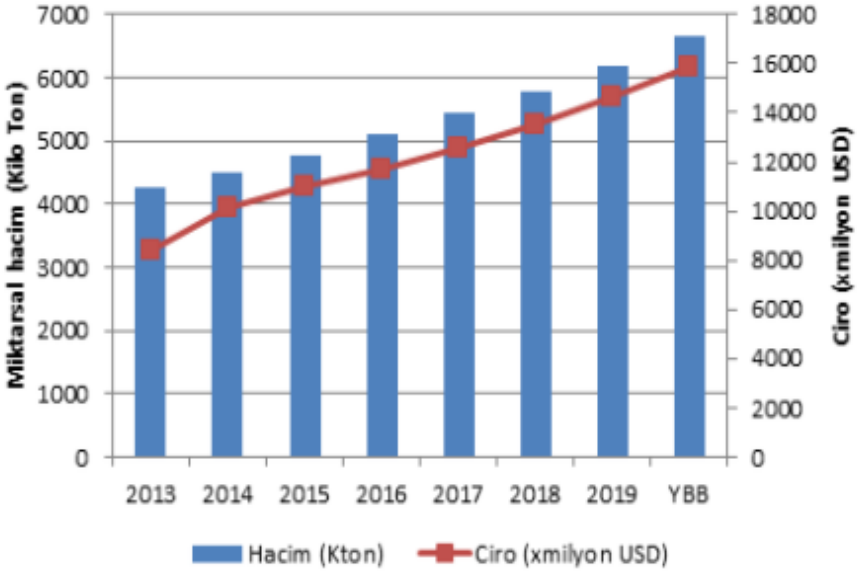
Kompozit malzemeler mekanik, fiziksel/kimyasal performanslarından dolayı çok değişik sektörlerde uygulama alanı bulmaktadır. Gündelik hayatımızda; otomobil sektöründe, inşaat yapımında/binalarda, denizde, havada, savunmada, eğlence, tarım sektöründe de çok yönlü olarak karşılaşılmaktadır çünkü daha verimlidirler. Tablo 1'de kompozit malzemelerin sektörlere göre hacimsel olarak dağılımı gösterilmiştir. Bu dağılım aynı zamanda Türkiye ile Avrupa ülkelerinin bir karşılaştırmasını vermektedir. Her sektörde % olarak ne kadar kompozit yapıların kullanıldığını dolayısı ile Avrupa ülkeleri ile ülkemizin neden az veya çok kullandığı hakkında da fikir vermektedir. Örneğin, havacılık, denizcilik ve enerji alanlarında çok düşük olduğu hacimsel (%5 ve altı) olarak söylenebilir. Bunun muhtemel sebebi pazardaki fiyatların diğer sektörlerden yüksek olmasından kaynaklı olabilir. Oysa bu sektörlerin pazarda daha ön sırlarda bulunduğu bilinmektedir (Kompozit Sanayicleri Derneği Verileri, 2016, sayı 12).

Tablo 1. Kompozit Malzemelerin Sektörlere Göre Hacim Olarak Dağılımı (%)

SEKTÖRLER	DÜNYA (%)	AVRUPA (%)	TÜRKİYE (%)
Yapı ve İnşaat	24,5	20	22
Taşımacılık ve Otomotiv	21	30	20
Elektrik ve Elektronik	19	14	3
Tüketim Malları	6	3	2
Rüzgar Enerjisi	7	12	5
Boru ve Tank	14	13.5	45
Uzay ve Havacılık	0,5	0,5	-
Denizcilik	4	5	2
Diğer	4	2	1

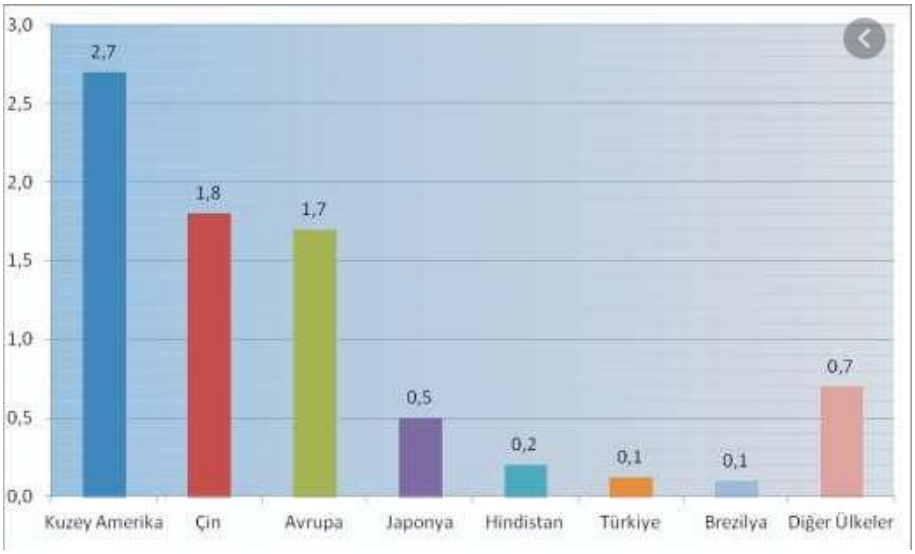
Bu kompozit malzemelerin yıllara göre hacimsel dağılımları da Şekil 19'da gösterilmiştir. Buradan görüleceği gibi,2013 yılında yıllık hacimsel olarak 3200 KiloTon iken 2017'de 4900 yaklaşık 2020 yılında ise 6000 KiloTonu geçmiş bulunmaktadır. Bu eğilimin hızla lineer olarak arttığını göstermektedir. Bu artışın her yıl devam edeceği anlamına gelmektedir. Yıllık cira oranı hızla arttığı 8200x milyon dolardan 16000'e ulaştığı da görülmektedir.[13]

[13] https://www.btsoekonomi.com/tr/yazi/82/1/gelecegin-malzemesi-kompozit.html



Şekil 19. Kompozit Malzemelerin Yıllara Göre Hacimsel Değişimi

Şekil 20'de bazı ülkelerdeki kompozit malzemelerin tüketim miktarı verilmiştir. Tüm ülkelerin kompozit kullanım alanlarına bakıldığında çok farlılıklar ve değişiklerrin mevcut olduğu görülmektedir. Gelişmekte olan ülkeler de uygulamanın çok düşük olduğu (0.1-0.2 aralığında) bunlar arasında Türkiye,Brezilya, Hindistan göze çarpmakta iken Küzey Amerika, Çin ve Avrupa ülkelerinde ise bu değerin 1.7 - 2.7 arasında olduğu görülmektedir. Bu farkın ise gelişmiş ülkeler 10-13 kat daha çok kullanıldığı anlamına gelmektedir. Başka bir deyimle, daha gelişmiş ülkelere daha çok kompozitten uygulama alanı bulmuş ülkelerdir. Kuzey Amerika'da pazar yılda 8% daralmış ve 2,7 milyon ton kompozit kullanımıyla dünyada pazar payı 38%'den 34%'e gerilemiştir. Avrupa'da yılda 1,7 milyon ton kompozit malzeme kullanımı gerçekleşmiş ve pazar payı daralmıştır. Avrupa'nın pazar payı 23%'den 22%'ye gerilemiştir.



Şekil 20. Ülkelerdeki Kompozit Malzeme Tüketim Miktarı (İnkaya, 2011)

Tablo 2'de kompozit malzeme yapılmış olan makine/cihaz veya ürünün değişik sektörlere göre fiyat dağılım oranları gösterilmiştir. Bu tabloya göre, dünya'da her sektörde farklılıklar olduğu, fakat en yüksek fiyatlamanın havacılık sektöründe, enerji sektörünün ve tüketim malları sektörünün bunu takip ettiğini söyleyebiliriz. En düşük fiyatlamanın boru/tank ve inşaat yapımında olduğu görünmektedir. Bunun sebebi muhtemelen bu sektörlerde çok kullanılmış/farklı takviye elemanları, özellikle, kısa,kırpılmış elyafların seçilmiş olmasından kaynaklı olabilir. Sektörlere göre kompozit malzemelerin dünya ortalama fiyatlarının kg'mı 8€ olduğu görülmektedir. Bu fiyat seviyesi ülkemizde ise 5€/kg düzeyindedir [13,14].

Tablo 2. Kompozit Üretiminde Farklı Sektörlere Göre Fiyat Dağılımı (Bulut, 2014; Hacıoğlu, 2013)

KULLANIM ALANLARI	Oranı (%)
Havacılık	33 €/kg
Rüzgâr Enerjisi	15 €/kg
Tüketim Malları	10 €/kg
Denizcilik	8,6 €/kg
Otomotiv ve Taşımacılık	7,5 €/kg
Elektrik & Elektronik	6,5 €/kg
İnşaat	5 €/kg
Boru & Tank	2,5 €/kg
ORTALAMA	8 €/kg

Karbon salınımlarını azalttığı için otomotiv sektöründe her zaman önceliği almıştır çünkü bir otomobilin ağırlığındaki %10 düşüş %5 - %7 arası yakıt tasarrufu sağlayabilmektedir. En önemlisi de her hangi bir otomobilden şayet 1 kg. tasarruf sağlanırsa, oluşan karbondioksit salınımını 25,3 kg. düşürmektedir (***Kaynak:****CompositesTurkey, Mart 2016 Sayı:12).* Bunun anlamı da bu sektörde yakıt maliyetlerini azaltmak için daha hafif araçlar yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bundan dolayı bundan sonraki geliştirilen araçlar mutlaka daha hafif ve dayanımlı kompozitlerden yapılması gerekecektir. Otomobil sanayinde daha hafif araçlar elde edebilmek için BMW, Mercedes, Ford ve GM'yi karbon kompozit kullanıma itmiştir. Rüzgar enerjisi teknolojisinde de tek parça ya da modüler kanat için artan bir eğilim mevcuttur.

SONUÇLAR ve GELECEK ÇALIŞMA

Takviye elemanı olarak; öncelikle sürekli elyaflar, kısa elyaflar, kırpılmış lifler, parçacıklar, kılcal kristaller, dokuma kumaşlar ve tabakalar kullanılabilmektedir. Bu çalışmada; kompozit malzemelerin yapımında genel olarak kullanılan seramik takviye elemanlarının bazı özellikleri ve türleri üzerinde durulmuştur. Bu nedenle, burada bu takviye elemanlarının önemi ve uygulama alanları gözden geçirilmiştir. Kompozit teknolojisi, karbon nano-tüpler ve basalt gibi yeni takviye türlerini uygulamaya sokarak ilerlemeye devam edecektir. Ayrıca, doğal takviye elemanlarının (flax, jute, kenaf, coir gibi) çevre dostu elyafların/parçacıkların

tekstil/otomative/enerji/paketleme/spor sanayi gibi yerlerde kullanımı artırması beklenmektedir. Yeni gelişmelerin, bilhassa turbo jet motorların iç sıcak-kesitlerinde ve uçakların oturma yeri / uçak içi konfor alanında olması beklenmektedir. Metal matriks bazlı kompozitlerin bu alanda uygulamalarını artıracağı belli. Fakat, uzay sahasında karbon fiber takviyeli plastik kompozitler (CFRP) daha çok kullanım alanı bulacaklardır. Diğer uygulama örnekleri ise; manipülatör kolları, kaplamalar, anten yansıtıcılar, güneş enerji panelleri, optik platformlar ve masalar şeklinde sıralanabilir.

KAYNAKÇA

Aricasoy, O., Kompozit Sektör Raporu, İstanbul, Aralik, 2006.

Bulut, M.,(2014).Yük.Lisans, Türkiyede Kompozit Malzeme Üretimi ve Kompozit Malzeme Sektörünün Genel Değerlendirilmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Temmuz 2014.

Colombo, C., Vergani, L., Burman, M., (2012). "Static and fatgiue characterization of new basalt fibre reinforced composites", *Composite Structure* 94, 1165-1174.

Composites,Turkey, Mart 2016 Sayı:12.

Czigany T, Vad J, Poloskei K. (2015). Basalt fiber as a reinforcement of polymer composites. Period. *Polytech Mech Eng*.;49(1):3–14.

Çelikkanat, A. B. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Bölümü, No: 503981110, Aralık 2002.

Deak, T., and Czigany, T. (2009). "Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers: A Comparision*", Textile Research Journal* 79(7), 645-651.

Dorigato, A., and Pegoretti A. (2012). "Fatigue resistance of basalt fibers-reinforced laminates", *Journal of Composite Materials* 46(15), 1773-1785

Fiorre, V., Bella, G.D., Valenza, A. (2011). "Glass-Basalt/Epoxy hybrid composites for marine applications", *Materials and Design* 32, 2091-2099.

Hacıalioğlu,İ.H. (2013,3-5 Ekim) "Türkiye 10. Kalkınma Planı Projeksiyonunda Kompozit Sektörü Genel Değerlendirmesi", Türk Kompozit 2013-Kompozit Zirvesinde sunuldu, İstanbul 2-12.

Hull, D.(1992). "An introduction to composite materials", Cambridge Solid State Science Series, Cambridge University Press, 1992.

ISBN 978-975-02-3463-7.

İnkaya,S.,(2011)"Dünya'da ve Türkiye'de Kompozit Sektörü", Mühendis ve Makina, Cilt:52, Sayı: 613, 31-34.

Mallick, P.K. (1988). "Fibre *reinforced composites: Materials, manufacturing and design*", Marcel Dekkery Inc.New York, USA, 1988.

Sahin, Y. (1996). "Wear performance of aluminium alloy composites containing unidirectionally-oriented silicon carbide coated boron fibres", *Wear* 197, 248-254, 1996.

Sahin, Y.(1998). "Wear of planar-random oriented metal matrix composites*", Wear*, 216, 112, 1998.

Sahin, Y.(2003). "Preparation and some properties of aluminium alloy composites", *Materials and Design*, 24 (2003) 671-679.

Seo Young H., Kang Chung-Gil.(1995). "The effect of applied pressure on the particle-dispersion characteristics and mechanical properties in melt-stirring squeeze-cast SiCp/Al composites", *J. Mate. Process. Techn.*, 55, 370, 1995

Sfarra, S., Ibana-Castanedo, C., Santalli, C., Paoletti, A., Paoletti, D., Sarasini, I., Bendada, A., Maldague, X. (2013). "Falling weight impacted glass and basalt fibre woven composites inspected using nondestructive tehcnigues", *Composites: Part B Engineering* 45, 601-608.

Sur, G., Sahin, Y., Gökkaya, H.,(2003)."Ergimiş metal karıştırma ve basınçlı döküm yöntemi ile alüminyum esaslı tanecik takviyeli kompozitlerin üretimi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20 (2) (2005) 233-238.

Şahin Y. (2015). "Kompozit Malzemelere Giriş", Mukavemet - Hafiflik - Özgül Modül / Dayanım, Güncellenmiş 3. Baskı, Seçkin Yayıncılık San.Tic.A.Ş., Ekim 2015, Ankara.

Şahin, Y., Murphy S.(1996)."Friction and wear behaviour of Saffil reinforced Zinc-Alüminium alloy composites", *7th Int.Machine Design and Production Conf.*, Sept. 11-13, 996, METU, Ankara

Taya, M., Arsenault, R.J.(1988). "Metal matrix composites-thermal and mechanical behaviour", Pergamon press, 1988.

Trumper, R.L.(1987). “Metal matrix composites, applications and prospects”, J. *Int. Metals, Metals and Materials*, 3-11, 663, 1987.

Türkiye’de Kompozit Malzemelerin Sektörlere Göre Pazarda Hacimsel Olarak Dağlımı(Kaynak: CompositesTurkey, Mart 2016).

İNTERNET KAYNAKLARI

http://accluster.com/kompozit-malzemelerinin-kullanim-alanlari/

http://kompozithayalleri.com/devamli-fiber-takviyeli-termoplastik-kompozitler-sayesinde-yuksek-performansli-spor-ayakkabi-parcalari-uretiliyor

http://www.authorstream.com/Presentation/CMTCMT-2465379-kompozit-rh-malzemeleri

http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html.

https://gelisenkariyerim.com/kompozit-cag-ucak-motor-uygulamalari

https://www.btsoekonomi.com/tr/yazi/82/1/gelecegin-malzemesi-kompozit.html.

BÖLÜM 23
METAL MALZEMELERDE ÇATLAK TESPİTİ VE ONARIM YÖNTEMLERİ

Alper ÖNER[1], Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA[2], Emre PETEKKAYA[3],
[1,3] Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul/Türkiye
[2]Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İstanbul/Türkiye

Öz: Endüstride çok sayıda malzeme kullanılır. Bu malzemeler kullanıldığı yere bağlı olarak hayati öneme sahip olabilirler. Örneğin havacılık sektöründeki malzemeler. Dolayısı ile bu malzemelerde ki herhangi bir hata ya da kusur çok fazla can ve mal kaybına neden olur. Ayrıca kullanılan malzemelerin işlevlerini tam olarak yerine getirebilmesi hem kalite hem de zaman açısından oldukça önemlidir. Bu saydıklarımız iki basit örnek sadece bu sayı oldukça fazladır. Malzemelerin kontrol edilmesi hayati bir öneme sahip olduğu için malzemelerin muayenesi de aynı şekilde önemli hale gelir. Bu çalışmamızda malzeme muayene yöntemleri açıklandı ve bazı uygulamaları yapıldı. Ayrıca muayene sonucunda herhangi bir kusur yâda hatanın tespit edilmesi durumunda uygulanabilecek onarım yöntemlerine değinildi. Manyetik parçacıklarla muayene yöntemi malzemelerin yüzeyinde yâda yüzeyine yakın yerlerdeki hataları tespit ederken sıvı Penetran yönteminde belli olmayan; yüzeyle bağlantısı kesilmiş kusurları tespitte daha avantajlıdır. Ancak ultrasonik muayene yâda radyografik muayene kadar kesin ve net sonuçlar sağlayamaz. Malzemenin içerisinde bulunan hatalarda da yetersiz kalan bir yöntemdir. Malzemelerdeki çatlak onarımı kaynak tamiri ile onarılması kısmen daha yaygındır. Daha çok büyük parçalarda uygulanır. Büyük parçanın değişim maliyeti göz önüne alınır. Metalock yöntemi ise İngiltere'de daha yaygın kullanılan yeni bir mühendislik alanıdır. Metal malzemeler gerekli dayanım ve sertliği sağlamaları gerektirdiğinden yapılan bu onarımlar, dayanımını değiştirir. Dolayısıyla o ilk istenen özellikler kısmen yerine getiremezler. Bu yüzden kullanılan malzemeler pahalı değilse değiştirmek daha uygun olur.

GİRİŞ ve KURAMSAL ÇERÇEVE

Malzeme Seçiminin Önemi

Malzeme seçimi, bir malzeme kullanmak durumunda kalan tasarım ve malzeme mühendisleri tarafından gerçekleştirilen bir görevdir. Malzeme seçiminin amacını, uygun imalat işlemlerinden sonra, ürünün veya bileşenin gerekli işlevini en düşük maliyetle göstermesi için gerekli boyutlara, şekle ve özelliklere sahip olacak malzemelerin belirlenmesi olarak tanımlanabilir. Malzeme seçimi amacıyla, tüm malzeme türlerini karakterize etmek için binlerce veriye ihtiyaç duyulacaktır. Malzemeler, metaller, polimerler, seramikler, kompozitler ve doğal malzemeler olarak sıralanabilir. Çok çeşitli mekanik, termal ve elektriksel özelliklerin yanı sıra çevresel performans, işleme, mevcut formlar, tipik kullanımlar, tedarikçiler ve daha fazla bilgi kaynakları hakkında tasarım mühendislerinin en uygun malzemeleri seçmelerine yardımcı olmak için birçok seçim sistemi mevcuttur. En temel düzeyde, tasarım mühendisleri veri kitaplarındaki malzeme özellikleri tablolarını kullanabilir (Sapuan, 2001). Diğer bir malzeme seçme yöntemi ise günümüzdeki yalın düşüncelerin bir unsuru olan başarılı rakiplerin veya bilinenlerden faydalanma yöntemidir. Yanlış malzeme seçimi can kayıpları, mal kayıpları, zaman kayıpları gibi birçok kayba sebep olabilmektedir. Dolayısı ile Bir tasarım yaparken kullanılacak malzemenin seçilmesi en az tasarım kadar önemlidir. Kullanılan malzemenin doğru seçilmesi gerek iş sağlığı ve güvenliği gerekse tasarlanan sistemden en iyi şekilde yararlanmamızı sağlar (URL 1).

Metal Malzemeler Nelerdir?

Hidrojen haricinde, kimyasal reaksiyonlar sırasında elektron kaybederek pozitif iyon oluşturan tüm elementlere metal denir. Dolayısıyla metaller, nispeten düşük iyonlaşma enerjisine sahip elektropozitif elementlerdir. Esas olarak karakterleri, parlaklık, ışıltılılık, sertlik, sesi tınlaşım etme yeteneği, ısı ve elektrik iletkenliğidir. Metaller, Cıva dışında normal koşullar altında katı maddelerdir.

Metallerin Fiziksel Özellikleri: parlak, dövülebilir, sünek, sert (Yumuşak ve bıçakla kesilebilen sodyum ve potasyum dışında tüm metaller serttir), iyi ısı ve elektrik iletkenleridir. Diğer özellikler ise, değerlik (Metaller, atomlarının en dış kabuğunda tipik olarak 1 ila 3 elektrona sahiptir), yoğunluk (Metaller yüksek yoğunluğa sahiptir ve çok ağırdır. İridyum ve osmiyum en yüksek yoğunluklara sahipken, lityum en düşük yoğunluğa sahiptir), erime ve kaynama noktaları (Metaller yüksek erime ve kaynama noktalarına sahiptir. Tungsten en yüksek erime ve

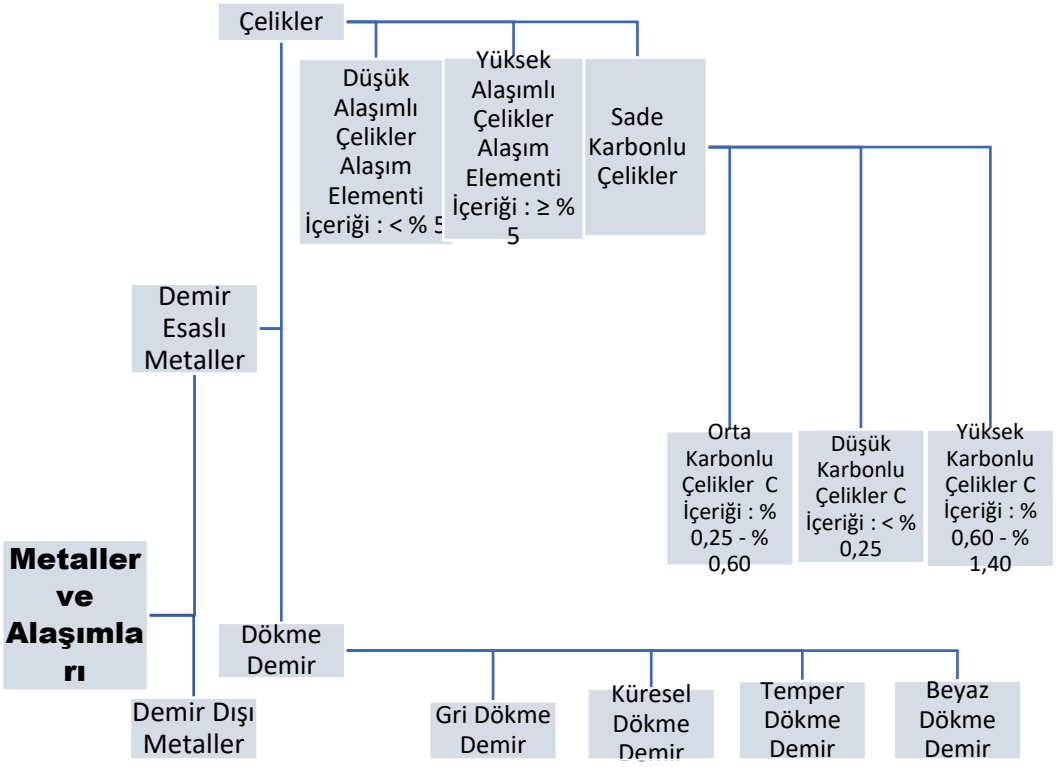
kaynama noktalarına sahipken, cıva en düşük seviyededir. Sodyum ve potasyum da düşük erime noktalarına sahiptir). 90 kadar doğal olarak oluşan elementler vardır ve bunların çoğu metaldir. Ancak metaller yararlı olsalar da, bazen yapmaları gereken işler için mükemmel olamayacak kadar azdırlar. Örneğin demiri ele alalım. Şaşırtıcı derecede güçlüdür, ancak oldukça kırılgan olabilir ve ayrıca nemli havada kolayca paslanır. Ya da alüminyum ne olacak? Çok hafiftir, ancak saf haliyle, pek işe yaramayacak kadar yumuşak ve zayıftır. Bu yüzden kullandığımız "metallerin" çoğu aslında metal değil alaşımlardır: onları daha güçlü, daha sert, daha hafif veya başka bir şekilde daha iyi hale getirmek için diğer maddelerle birleştirilen metaller. Alaşımlar, dişlerimizdeki dolgulardan ve arabalarımızdaki alaşım tekerleklerden başımızın üzerinde vızıldayan uzay uydularına kadar çevremizdeki her yerde. Alaşımlara birkaç örnek verilirse: Demir iyi bir yapı malzemesidir ancak çelik (demire küçük miktarlarda metalik olmayan karbon eklenerek yapılan bir alaşım) daha güçlü, daha sert ve paslanmazdır. Pirinç, normalde bakırda bulunan atomların yüzde 10-35'inin yerini çinko atomlarının aldığı bakır temelli çinko ile oluşan sert ve dayanıklı bir alaşımıdır (Kapı kilitleri ve sürgüleri, pirinç müzik aletleri, merkezi ısıtma boruları gibi çok yerde kullanılır). Alüminyum çok hafif bir metaldir ancak saf haliyle de çok yumuşaktır. Küçük miktarlarda metal magnezyum, manganez ve bakır ekleyin ve duralumin adı verilen, uçak yapmak için yeterince güçlü olan mükemmel bir alüminyum alaşım yaparsınız. Alaşımlar her zaman bir veya daha fazla önemli fiziksel özelliklerinde (güç, dayanıklılık, elektrik iletme yeteneği, ısıya dayanma yeteneği vb.) Ana metal üzerinde gelişme gösterir. Genel olarak alaşımlar, ana metallerinden daha güçlü ve daha serttir, daha az dövülebilirdir (işlenmesi daha zordur) ve daha az sünektir (tel çekilmesi daha zordur) (URL 2)

Malzemelerin mekaniksel özelliklerinin sıralanması:

- ✓ Çekme/basma (tensile /compression)
- ✓ Sertlik (hardness)
- ✓ Darbe (impact)
- ✓ Kırılma (fracture)
- ✓ Yorulma (fatigue)
- ✓ Sürünme-kayma (creep)

Metaller alaşım oluşturabildikleri için çok değişik mekanik özellikler edinebilirler. İstenilen değeri elde edebilmek için oluşturulan alaşımlardaki elementlerin oranları değiştirilebilir. Dolayısı ile bu özellikler her metal ve metal alaşımları için farklılıklar göstermektedir. Örneğin çelik elde edebilmek için demir metali ile karıştırılan karbon elementinin miktarı; elde edilen çeliğin mekanik özelliklerini değiştirir. Metaller mühendislikte kullanılan malzemelerin çok büyük bir kısmını kapsamaktadır ve kimyasal yapıları bakımından iki ana gruba ayrılmaktadırlar. Bu gruplar Şekil 1'de verilmiştir.

Şekil 1. Metaller ve Metal Alaşımları.



Demir Esaslı Metal Alaşımları

Çelik: Temel elementi demir olmakla beraber en basit haliyle içerdiği karbon oranı yüzde ikinin altında olan alaşımları çelik olarak adlandırırız. Ancak soğuk

iş takım çelikleri için bu oran % 2,1 gibi değerlere de ulaşabilir. Soğuk takım çelikleri dışında bu oranın % 2'den daha fazla olduğu diğer alaşımlar dökme demir olarak adlandırılırlar.

Çelik, dünyanın en önemli mühendislik ve yapı malzemesidir. Hayatımızın her alanında kullanılır; otomobillerde ve inşaat ürünlerinde, buzdolaplarında ve çamaşır makinelerinde, kargo gemilerinde ve cerrahi neşterlerde. İki ana çelik ailesi vardır: alaşımlı çelikler ve alaşımsız çelikler. Alaşım, her biri için minimum değişken içeriğe göre demire eklenen karbon dışındaki kimyasal elementleri ifade eder. Örneğin: silikon için% 0,50, molibden için% 0,08, krom için% 10,5. Böylece paslanmaz çeliği oluşturmak için% 17 krom ve% 8 nikel alaşımı kullanılır. Bu nedenle bir değil birçok çelik türü vardır. Şu anda 3.000'den fazla kataloglamış kalite (kimyasal bileşimler) bulunmaktadır, özel talepleri karşılamak için yaratılanları saymamakta, hepsi çeliğin geleceğin zorluklarının üstesinden gelmek için en uygun malzeme haline gelmesine katkıda bulunmaktadır. Sade karbonlu çelikler: Yüzde ikiden az karbon ve yüzde bir manganez ve az miktarda silikon, fosfor, kükürt ve oksijen içeren bir demir ve karbon alaşımıdır. Ancak bu çeliklerin sertleşme kabiliyetleri çok sınırlı olmakla beraber diğer mekanik özellikleri de zayıftır. Orta Karbonlu Çelikler; Isıl işlemlere karşı oldukça dayanıklı olan bu çelikler; dayanımları ve süneklikleri Az Karbonlu Çelikler gibi zayıftır. Yüksek karbonlu Çelikler; Yapılarında oluşan Perlit bağlarından dolayı serttirler. Süneklikleri oldukça azdır. Kesilme ve işlenebilme kabiliyetleri kısıtlıdır. Ancak Küreselleştirme tavı sonucunda talaş kaldırma işlemlerinde kullanılabilirler. Aşağıda Tablo 1'de En popüler karbon çelik sınıflar ve kullanım alanları verilmiştir (URL 3).

Tablo 1. En Popüler Karbon Çelik Sınıflar ve Kullanım Alanları

SINIFI	İÇERİĞİ	KULLANIM YERLERİ	
12L14	Ücretsiz işleme. İşlenebilirliği artırmak için kurşun eklendi. Bununla birlikte, kurşun eklenmesi gerilme mukavemetini azaltır, ancak yine de genellikle 1018'den daha güçlüdür. Her koşulda manyetik.	Fren hortumu uçları, kasnaklar, dişli kutusu bileşenleri, bijon somunları ve uçları, disk fren pistonları, asma kilit pranga, kontrol bağlantıları, çöp kovası aksları, beton ankrajlar,	

			hidrolik bağlantı parçaları, mengene çeneleri	
	8620	Daha yüksek mukavemet için sünek iç kısım ile birleştirilmiş sert dış yüzey.	Dişliler, krank milleri, dişli halkalar	
	A36	Kimyasal olarak 1018'e benzer, ancak daha düşük özelliklere ve daha pürüzlü bir yüzeye sahiptir. En yaygın olarak sıcak haddelenmiş çelikler bulunur. Verim gücü de 1018'den önemli ölçüde daha az	Otomotiv bileşenleri, kamlar, demirbaşlar, tanklar, dövmeler ve binalar veya köprüler gibi yapısal uygulamalar	
	A513	Daha yüksek karbon içeriği, daha yüksek mukavemet, ancak daha düşük kaynaklanabilirlik ve işlenebilirlik anlamına gelir.	Mandrel borusu üzerinden çekilmiş	
	1008	İşlenmiş düz karbon çelikler arasında en yüksek ısıl iletkenlik. En düşük çekme mukavemetine ve orta derecede yüksek sünekliğe sahip olabilir. Mükemmel kaynaklanabilirlik.	Makine parçaları, bağlantı çubukları, nispeten düşük mukavemetli yapısal uygulamalar, montaj plakaları ve braketler	
	C1010	Nispeten düşük mukavemet, ancak yüksek bir maliyetle mukavemeti artırmak için söndürülebilir ve temperlenebilir. Oldukça iyi işlenebilirlik; iyi şekillendirilebilirlik ve süneklik.	Makine parçaları, bağlantı çubukları, nispeten düşük mukavemetli yapısal uygulamalar, montaj plakaları ve braketler	
	C1018	En yaygın olarak bulunan soğuk haddelenmiş çelik. Mukavemete, biraz sünekliğe ve karşılaştırmalı işleme kolaylığına sahiptir.	Makine parçaları, bağlantı çubukları, nispeten düşük	

			mukavemetli yapısal uygulamalar, montaj plakaları ve braketler	
	C1045	1008 veya 1010'dan daha fazla güç veya daha yüksek sertliğin gerekli olduğu uygulamalar için.	Cıvatalar, dişliler, krank milleri, silindir milleri, kalıp dövmeleri	
	C1141	1045'e benzer uygulamalar için, ancak işlenebilirlik çok önemlidir.	Pimler, saplamalar, cıvatalar, miller, bağlantı çubukları	
	C1144	1018 veya A36'dan daha yüksek mukavemet, ancak ek olarak geliştirilmiş sünekliğe sahiptir. Kimyası, üretim yöntemi ve ısıl işlem kombinasyonundan dolayı işlemeden sonra çok düşük bozulma veya eğilme. İşlenmesi nispeten kolaydır.	Pimler, saplamalar, cıvatalar, miller, bağlantı çubukları, işlenebilirliğin çok önemli olduğu 1045'dekilere benzer uygulamalar	

Alaşımlı çelik: metalleri ve metal olmayanları içeren diğer elementler karbon çeliğine eklendiğinde, alaşımlı çelik oluşur. Bu alaşımlı çelikler, alaşım yapmak için kullanılan elementlere göre değişebilen çeşitli çevresel, kimyasal ve fiziksel özellikler gösterir. Burada alaşım elementlerinin oranı farklı mekanik özellikler sağlayabilir. Karbon çeliği manganez, silikon, nikel, titanyum, bakır, krom ve alüminyum gibi bir veya birkaç alaşım elementi ile birleştirilerek yapılır. Bu metaller, normal karbon çeliğinde bulunmayan belirli özellikleri üretmek için eklenir. Elementler çeşitli oranlarda (veya kombinasyonlarda) eklenerek malzemenin artan sertlik, artan korozyon direnci, artan mukavemet, geliştirilmiş şekillendirilebilirlik (süneklik); kaynaklanabilirlik de değişebilir. Alaşım elementlerinin miktarları% 1 ile% 50 arasında değişebilir. Alaşımlı çelikler iki gruba ayrılabilir: düşük alaşımlı çelik ve yüksek alaşımlı çelik. Düşük alaşımlı ve yüksek alaşımlı çelik arasındaki sınır genellikle% 5 alaşım elementi olarak kabul edilir. Petrol ve gaz endüstrisindeki tüm pratik amaçlar için alaşımlı çelik, düşük alaşımlı çelik anlamına gelir (URL 4).

Dökme Demir; ağırlıkça % 2 - 4 karbon, ağırlıkça %0 -% 3 silikon ve daha az miktarda küçük elementler içeren bir demir alaşımıdır. Demir cevheri genellikle demir ve gang olarak adlandırılan kum ve kil gibi büyük miktarlardaki safsızlıkların bir karışımıdır. Demir cevherlerinde bulunan demir, demir oksitler şeklinde bulunur. Bu safsızlıkların bir sonucu olarak, demirin önce gangdan ayrılması ve ardından saf demire dönüştürülmesi gerekir. Cevherinden demir üretimi, bir yüksek fırında gerçekleştirilen bir oksidasyon-indirgeme reaksiyonu sonucunda elde edilir. Bu erimiş ham demir kalıplara dökülür, karbon içeriği% 2'den fazla olan demir-karbon ve ayrıştırılamayan çok az miktarda fosfor, manganez ve kükürt te içerebilir. Karşılaştırıldığında, çelik ağırlıkça% 2'ye kadar daha düşük karbon içeriğine ve daha düşük silikon içeriğine sahiptir. Dökme demirin silikon içeriğine bağlı olarak, beyaz dökme demir veya gri dökme demir olarak sınıflandırılır ve dövülebilir veya sünek dökme demir üretmek için belirli sıcaklıklar altında daha fazla işlenebilir.

Dökme demirin genel özellikleri: Dökme demir, eritildiğinde karmaşık şekillere kolayca dökülebilmesi ve düşük maliyeti nedeniyle oldukça tercih edilmektedir. Ek olarak, üretim yöntemlerinde önemli değişiklikler yapmadan bileşimi ve soğutma hızını ayarlayarak özellikleri kolayca değiştirilebilir. Dökme çeliğe göre diğer ana avantajları arasında işleme kolaylığı, titreşim sönümleme, basınç dayanımı, aşınma direnci ve korozyon direnci bulunmaktadır. Dökme demirin korozyon direnci silikon, nikel, krom, molibden ve bakır gibi küçük elementlerin eklenmesiyle artırılır. Dökme demirin bunca iyi özelliklerinin yanında çelik ve benzeri malzemelere göre mukavemeti ve esnekliği zayıftır ayrıca kopmada mukavemet ve uzama olaraktan zayıftır(URL 5).

Demir Dışı Metaller: Demirden başka bütün saf metaller ile demirin ana komponent olmadığı alaşımlar bu gruba girer. Bu cins metaller içinde gereksinim olarak az ihtiyaç duyulan çok yüksek maliyet olanlar olduğu gibi çok kullanılanları da vardır. Örneğin Almanya'da yılda yaklaşık 40 milyon ton demir ve çeliğe karşılık, toplam 3 milyon ton dolayında bakir, alüminyum, kurşun, çinko, nikel ve kalay tüketilir.

Bakır, alüminyum ve magnezyum alaşımları gibi demir dışı alaşımlardan yapılan şekil hafızalı alaşımlar ve mikro parçalar, yüksek elektriksel ve termal iletkenlikleri, iyi sünekliği ve mükemmel aşınma direnci, yorulma dayanımı ve yatak özellikleri nedeniyle elektronik bileşenlerde ve tıbbi cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

METAL MALZEMELERDE ÇATLAK

Metallerde Çatlaklar: Çatlaklar, bir malzemede gelişen yüzey veya yüzey altı çatlaklardır. Mekanik, termal, kimyasal ve metalurjik etkilerden elde edilen yayılma enerjisi veya bunların bir kombinasyonu çatlak başlangıcını ve büyümesini etkileyebilir. Metallerde çeşitli çatlak türleri bulunur ve soğutma, katılaşma, merkez hattı, krater, taşlama, asitle temizleme, ısıl işlem, talaşlı işleme yırtıkları, kaplama, yorulma, sünme, gerilme korozyonu ve hidrojen çatlakları olarak tanımlanmaktadır. Metallerde kırılgan kırılma, çok az uyarı ile veya hiç gözle görülür bir uyarı olmadan gerçekleşir.

Bir çatlağın ana nedeni, iç gerilimlerin kaynak metalinin, ana metalin veya her ikisinin gücünü aşmasıdır. Ve bu stresler için bir odak noktası - yani bir stres yükseltici - gelişip biriktiğinde, bir çatlak yayılabilir (Marazani, Madyira, Esther, 2017).

Metal Malzemelerde Çatlak Oluşumuna Etki Eden Faktörler;

1. Yüzey kalitesi: metallerin yüzey kalitesi çatlak başlaması açısından oldukça önemlidir. Yüzey kalitesinin iyi olması çatlak oluşumunu geciktirir.

2. Metallerin elde ediliş yöntemi: metallerin elde ediliş yöntemleri metalin içerisinde oluşabilecek içyapı hataları dolayısıyla da çatlak başlangıcı açısından oldukça önemlidir.

3. Gerilmeler: Genlik, çift eksen gerilmenin olması, kaymanın yol açtığı gibi gerilime neden olgular, parçanın maruz kaldığı yüklenmeler üzerinde etkilidir ve yüklenme de parçada oluşabilecek çatlağı doğrudan etkiler.

4. Geometrisi: Gerilmelerin birikimine yol açacak süreksizliklerin olması ve yorulmanın çatlak oluşturabilecek seviyede olması çatlak oluşmasına davetiye çıkarır.

5. Malzemenin cinsi: Yorulmanın çatlağa yol açma süresi malzemenin cinsine bağlı olarak çok farklılıklar gösterebilir.

6. Malzeme içerisinde kalan gerilme: Malzemenin üretimi safhalarında işlemlerden artık kalan gerilmeler yorulmaları artırarak dayanması için gerekli ömrü düşürür.

7. İçte olan kusurların boyut ve yerleri: Örnek ile açıklarsak: dökümden sonra oluşan yapısal bozukluklar çatlak başlaması açısından oldukça tehlikelidirler.

8. Yükleme doğrultusu: Yükleme doğrultusunu malzemenin içyapısına etkileri doğrultusunda deformasyon hızı artar.

9. Tanelerin büyüklükleri: Birçok metalin küçük olan tanelerin büyüklükleri metal malzemede çatlak başlamasını geciktirir.

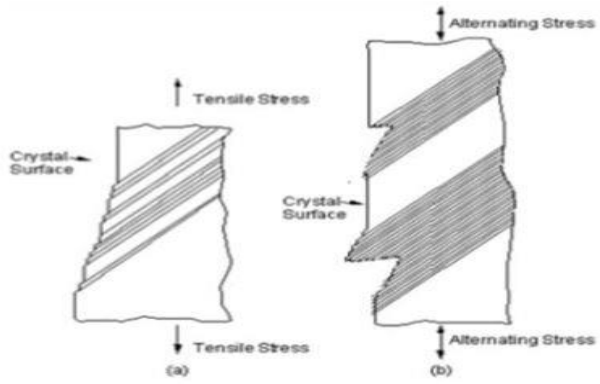
10. Çevresel etki: Ortamda gazların varlığı, korozyona ve erozyona yol açacak etmenlerin varlığı ve bunlar gibi çevresel şartlar metalin yüzeyini etkileyerek bir çatlak başlatabilirler.

11. Sıcaklık: Çok yüksek veya çok düşük sıcaklıklar malzemenin içyapısını etkiler dolayısıyla çatlak oluşumuna etkiler.

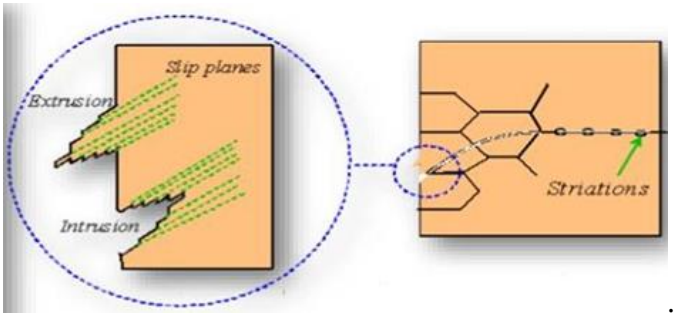
Metal Malzemelerde Çatlak Başlangıcı

Kusursuz bir kristaldeki bir çatlağın oluşması, esasen atomlar arası bağların kopmasını içerir. Bunu yapmak için gereken stres, atomlar arası kuvvetler için bir ifadeden başlayan teorik kohezif gerilmedir. Bu ifadeden, sıradan malzemelerin mükemmel kristallere göre çok daha düşük gerilimlerde kırıldığını görüyoruz. Bu davranışın açıklaması, önceden var olan çatlaklar olarak hareket eden yüzey ve iç kusurların varlığında ve kırılmadan önceki plastik deformasyonda yatmaktadır. Hem plastik deformasyon hem de kırılma ortadan kaldırıldığında teorik kohezif gerilmelerin sırasına göre gerilimler elde edilir. Çatlak oluşma mekanizmaları malzemenin türüne göre değişir: kırılgan, yarı kırılgan veya sünek. Bir malzemenin kırılganlığı, çatlak oluşması bölgesindeki dislokasyonların davranışıyla ilgilidir. Oldukça kırılgan malzemelerde dislokasyonlar pratik olarak hareketsizdir, yarı kırılgan malzemelerde dislokasyonlar hareketlidir, ancak sınırlı sayıda kayma düzleminde ve sünek malzemelerde, malzemenin kristal yapısının doğasında bulunanlar dışında dislokasyonların hareketi üzerinde herhangi bir kısıtlama yoktur.

Kırılgan bir malzemenin açıkta kalan yüzeyi, mikroskobik toz parçacıklarıyla bile mekanik temastan zarar görebilir. Yüzey işlemi yapılmamış bir cam elyaf bir masa üstüne yuvarlanırsa, mekanik olarak ciddi şekilde hasar görür. Bir malzemede gerilme konsantrasyonu oluşturan herhangi bir heterojenlik çatlakları oluşturabilir. Örneğin, basamaklar, çizgiler, çukurlar, delikler vb. Görünüşte mükemmel yüzeyler üzerinde gerilim arttırıcı görevi görür. Malzemenin iç kısmında boşluklar, hava kabarcıkları, ikinci faz parçacıkları vb. Olabilir. Bu kusurların en zayıfında, koşulların en uygun olduğu yerde çatlak oluşması meydana gelecektir. Şekil 2 ve Şekil 3'te çekme ve alternatif gerilme altında girinti ve çıkıntı şeklindeki kaymalar verilmiştir.

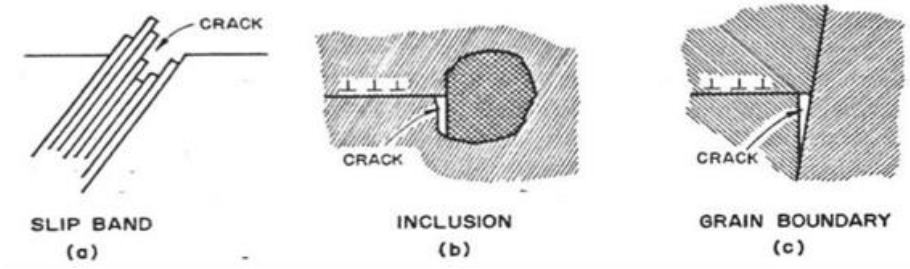


Şekil 2. Girinti ve çıkıntıların oluşumu



Şekil 3. Gerilme çatlağının yayılması

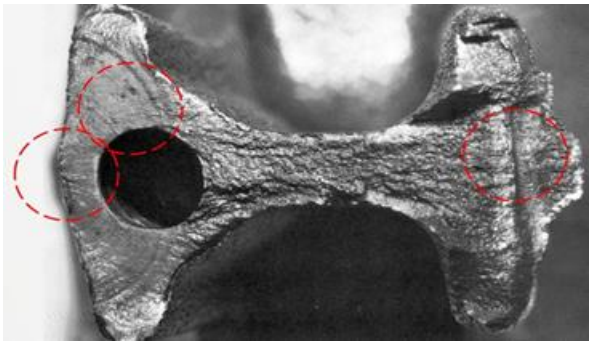
Genel olarak, boyutların ve kusurların yerlerinin, parametreleri deneysel verilere uyacak şekilde ayarlanan standart dağılımın bazı işlevlerine göre malzemede dağıtıldığını varsayıyoruz. Bu varsayımda, kusurların niteliği veya kaynağı hakkında açık bir değerlendirme yoktur. Yarı kırılgan malzemelerde, başlangıçta kayma eğilimi vardır, bunu iyi tanımlanmış kristalografik düzlemlerde kırılma izler. Yani, deformasyon sürecinde belirli bir bükülmezlik vardır ve materyal, yerel plastik gerilmeleri barındıramadığından, gerilmeleri gevşetmek için bir çatlak başlatır. Çeşitli modeller, bir engel bölgesinde çatlak oluşması fikrine dayanmaktadır (Meyers, Chawla, 2009).



Şekil 4. Çatlak İlerlemesi

Metal Malzemelerde Çatlak İlerlemesi

Kritik altı çatlak büyümesi, döngüsel yükleme uygulandığında herhangi bir metal alaşımdaki kırılma tokluğu genellikle çok daha düşük olan gerilim yoğunluğu seviyelerinde meydana gelebilir. Basitleştirilmiş konseptte, yorulma çatlağı büyümesinin içsel mekanizmasını açıklayan, çatlak ucundaki plastik bölgede döngüsel plastik deformasyondan kaynaklanan hasarın birikmesidir. Aşağıda Şekil 5'te çatlak başlangıcı ve ilerlemesi gösterilmiştir.

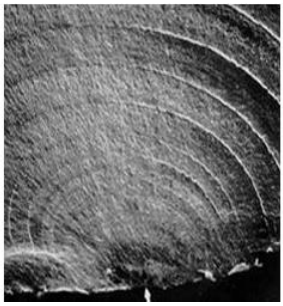


Şekil 5. Çatlak başlangıcı ve ilerlemesi

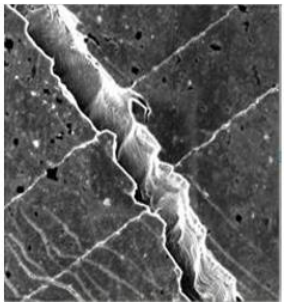
Yorulma arızası sürecinin kendisi şunlardan oluşur: ilk döngüsel hasarı (döngüsel sertleşme veya yumuşatma), ilk "ölümcül" kusurun oluşumunu (çatlak başlangıcı), bu kusurun makroskopik yayılmasını (çatlak büyümesi) ve son katastrofik başarısızlık veya istikrarsızlığı içeren birkaç farklı süreç. Bu tür yaklaşımlar, tüm yapıların kusurlu olduğunu ve çatlakların hizmet ömrünün erken dönemlerinde başlayıp kritik olmayan bir şekilde yayılabileceğini kabul eder. Aşağıda Şekil 6, 7 ve 8'de çatlak aşamaları, ilerlemesi ve ayrılması gösterilmiştir.



Şekil 6. Çatlak Aşamaları

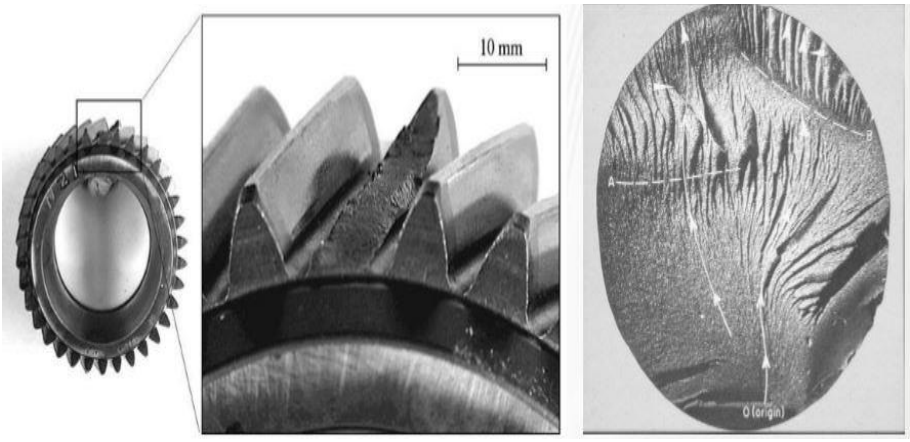


Şekil 7. Çatlak ilerlemesi



Şekil 8. Çatlak Ayrılması

Kullanım ömrü, daha sonra, izin verilen bir gerilme veya limit yük ile tanımlanabileceği gibi, en büyük tespit edilmeyen çatlağın arızaya dönüşmesi için yükleme döngülerinin süresi veya sayısı temelinde değerlendirilir. Bu tür analizlerde örtük olarak, kritik altı çatlak büyümesinin, çatlak ucundaki yerel koşulları tanımlayan ancak yükleme parametreleri, çatlak boyutu ve geometri açısından belirlenebilen bazı yönetim parametreleri (genellikle bir çatlak tahrik kuvveti olarak düşünülür) ile karakterize edilebilmesidir. Aşağıda Şekil 9'da çatlak başlama ve kırılma örneği verilmiştir. Doğrusal elastik ve doğrusal olmayan elastik kırılma mekaniği bugüne kadar bu tür analizlerin yapılması için en uygun yöntemi sağlamıştır (Ritchie, 1999).



Şekil 9. Örnek çatlak başlama ve kırılma

METAL MALZEMELERDE ÇATLAK TESPİTİ

Malzeme Muayenesinin Amacı ve Önemi

Malzeme muayene ve testleri çeşitli nedenlerle gerçekleştirilir ve test edilen malzemeler, prototipler veya ürün numuneleri hakkında çok sayıda bilgi sağlanabilir. Test sırasında toplanan veriler ve son test sonuçları mühendisler, tasarımcılar, üretim yöneticileri ve diğerleri için çok faydalı olabilir. Malzeme testleri, hatalı ürünleri, yetersiz malzemeleri ve nihayetinde bir arızanın nedenini belirlemeye yardımcı olmak için arıza analizi araştırmalarında da büyük bir rol oynar.

Malzeme testinin önemli olmasının nedenlerinden bazıları:

1-Düzenleyici kurumların gereksinimlerini karşılamak – Mevzuata uygunluk: Yorulma testi, birçok ürün, bir arızanın kapsamlı hasar veya yaralanmaya neden olabileceği kritik uygulamalarda kullanılır. Bazı örnekler, uçakların, köprülerin, araçların, nükleer reaktörlerin, askeri teçhizatın ve tıbbi implantların güvenliğini sağlamada hayati bir role sahip olan üretilmiş bağlantı elemanları ve parçalardır. Buna ek olarak, birçok yargı bölgesi, tehlikeli maddelerin kullanımını kısıtlayan yasaları kabul etmiştir. Bu gibi durumlarda, hükümetler ve düzenleyici kurumlar, üreticiler tarafından karşılanması gereken uyumluluk gereksinimlerini belirler. Şirketler, uyumluluğu kanıtlamak için genellikle test prosedürlerini belirleyen bu standartlara uymak durumundadır.

2-Bir uygulama için uygun malzeme ve işlemlerin seçilmesi –Materyal ve tedavi seçimi: Üretilen bir ürüne giren bir malzemenin kalitesi, üretim sürecinin güvenilirliği kadar önemlidir. Malzeme testi, belirli bir malzeme veya işlemin belirli bir uygulama için uygun olup olmadığını anlamamıza ve ölçmemize yardımcı olur. Piyasada bulunan çok çeşitli malzeme ve işlemlerle, testler, amaçlanan kullanım için en uygun seçim seçeneklerinin daraltılmasına yardımcı olabilir. Daha önce belirtildiği gibi, birçok endüstri uygulaması için, malzemeyi belirli bir standart veya şartnamelere göre onaylamak veya kullanıma sunulmadan önce diğer katı kriterleri karşıladığını doğrulamak için test yapılır. Test, yalnızca malzeme seçimi ve güvenilir bir tedarikçi seçimi için yaygın olarak dayanmakla kalmaz, aynı zamanda yeni bir tedarikçiden alınan malzemenin sipariş edilen şey olduğundan emin olmak için bir doğrulama süreci olarak sıklıkla kullanılır.

3- Ürün tasarımını veya iyileştirme özelliklerini değerlendirme: SEM / EDS analizi Bir işletmenin yeni bir ürün tasarımı için malzeme belirlerken mekanik test hizmetleri satın alması tipiktir. Mukavemet, sertlik, elastikiyet ve kırılma tokluğu

gibi mekanik özellikleri değerlendirmek için test yapılabilir. Korozyon testi, malzemenin nem veya tuzlu su ortamı gibi belirli koşullar altında dayanıp dayanmayacağını belirleyebilir. Bir uygulama daha dayanıklı veya daha korozyona dayanıklı metaller gerektirdiğinde, bu genellikle işlemlerin eklenmesiyle sağlanabilir. Uygun olduğunda, belirtilen sonuçların elde edildiğini belirlemek için malzeme testten önce ısıl işleme tabi tutulabilir. Malzeme özelliklerinin daha fazla belirlenmesinde, mikroskoplar ve SEM ekipmanı kullanılarak mikro analiz, çeşitli yüzey özelliklerini analiz etmek ve kusurları ve tutarsızlıkları tespit etmek için kullanılabilir

4- Bir üretim sürecini doğrulama: Test, hem tasarım hem de üretim süreçlerinin önemli bir parçasıdır, yalnızca güvenlik söz konusu olduğunda değil, aynı zamanda güvenilir ürünler satmaya ve sorunların ortaya çıkması durumunda hasar ve maliyetleri en aza indirmeye kararlı olan herhangi bir şirket için de önemlidir. Test, planlı bir üretim sürecini değerlendirmek için genellikle ürün geliştirme sırasında erkenden gerçekleştirilir. Nihai ürünler için sürekli olarak doğrulama sağlamak da aynı derecede alakalı olabilir. Bitmiş ürünleri ürünlere zarar vermeden değerlendirmek için çeşitli tahribatsız muayene hizmetleri kullanılır (URL 6).

Tahribatlı ve tahribatsız testler aşağıda sıralanmıştır;

- Tahribatsız Muayene	**- Tahribatlı Muayene**
1-Ultrasonik Muayene	1-Çekme Testi
2-Penetrant Sıvısı İle Muayene	2-Yorulma
3-Manyeti Partiküller Muayene	3-Sertlik Testi
4-Radyografik Muayene	4-Çentik Darbe Testi
5-Eddy Current (Girdap akınları)	5-Burulma
6-Phassed Array	6-Eriksen Çökertme
7-Basınçla Kontrol	7-Metalografi

Malzemelerde muayene yaparken tahribatsız muayene yöntemlerinin kullanılmasının yukarıda saydığımız gibi birçok avantajı vardır. Bu çeşitli avantajlardan dolayı malzeme muayenede tahribatsız muayene yöntemleri kullanılır.

TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ

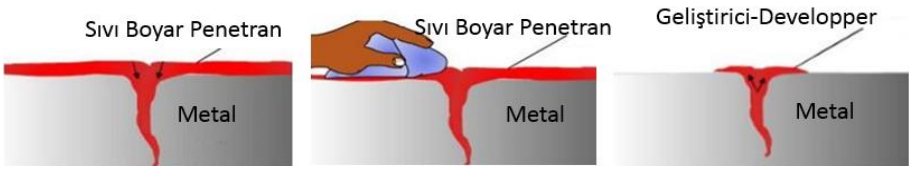
Görsel Muayene

Tahribatsız muayene yöntemlerinin en eskisidir. Gözle muayene, test edilecek malzemenin direkt göz veya ara ekipmanlar kullanılarak kontrol edilmesidir. En önemli gereksinimi ışık miktarının kabul edilebilir seviyede olmasıdır. Test yapılmadan önce yüzey temizlenmeli ve yeterli ışık sağlanarak kontrol edilmelidir. Bunun öncesinde parça ile ilgili üretim bilgileri, çalışma şartları ve bunun gibi bilgiler incelenmelidir.

Bu muayene yöntemini kullanacak kişinin tecrübesi, bilgi ve becerisi bu yöntemde oldukça önemlidir. Bu yöntem oldukça hızlıdır. Ekstradan ekipmana gerek yoktur. Oldukça avantajlı bir yöntem olmasının yanı sıra birçok konuda yetersiz kalıyor. Malzemenin iç kusurları hakkında bilgilendirme yapmada yetersiz kalıyor. Daha çok yüzeysel ve büyük ölçekli kusurların tespit edilmesinde kullanılan bir yöntemdir.

Sıvı Boya Penetrant Muayenesi

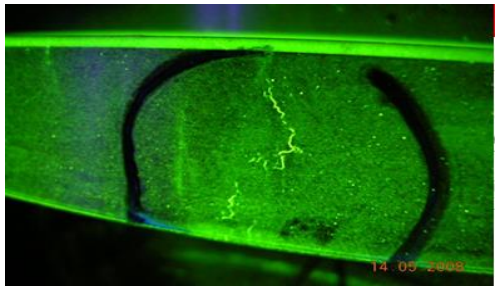
Boya penetrant Muayenesi, Sıvı penetrant muayenesi veya penetrant testi olarak adlandırılan bu test, özellikle gözeneksiz malzemelerdeki (metaller, plastikler, seramikler) yüzey kırılma kusurlarını bulmak veya kontrol etmek için yaygın olarak kullanılan düşük maliyetli bir inceleme yöntemidir. Kılcal çatlaklar, yüzey gözenekliliği, yeni ürünlerdeki sızıntılar ve hizmet içi bileşenlerde bulunan yorulma çatlakları gibi döküm, dövme ve kaynak yüzey kusurlarını tespit etmek için kullanılır (URL 7).



Şekil 10. Sıvı Penetrant Uygulanması, Temizlenmesi ve Sıvı Penetrantın Yüzeye Çekilmesi

Boya Penetrant Muayenesi: Düşük yüzey gerilimli, temiz ve kuru yüzeye, kırılma ve çatlak gibi kusurlara nüfuz edebilen kılcal hareket edebilen bir sıvı penetrant kullanılır. Penetrant, daldırma, püskürtme veya fırçalama yoluyla test bileşenine uygulanabilir. Yeterli penetrasyon süresine izin verildikten sonra, fazla penetrant çıkarılır ve penetrantı kusurlardan çekmek için bir geliştirici (developer)

uygulanır, floresan ışığın altında böylece kusur, çatlak vs. görünür hale gelir. Aşağıda Şekil 11'de bir örnek verilmiştir (URL 7).



Şekil 11. Penetrant Sıvısı uygulanmış parçanın floresan ışığında görüntüsü

Penetrant Testinin Artıları ve bazı avantajları şunlardır:

1- Nispeten karmaşık olmayan bir testtir.

2- Küçük yüzey kırma kusurları da gösterir

3- Nispeten ucuzdur

4- Birkaç malzeme sınırlaması vardır.

5- Büyük ve küçük, geometrik olarak karmaşık nesnelerin incelenmesine izin verir

6- Penetran ve diğer kimyasallar taşınabilir (aerosol sprey kutuları)

Penetrant Testinin Eksileri ve bazı dezavantajları şunlardır:

1- Ön temizliğin dikkatli yapılması gerekir, kritiktir.

2- Derinlik boyutu yok

3- Yalnızca nispeten gözeneksiz yüzeyler incelenebilir

4- Test edilen yüzeye doğrudan erişim gereklidir.

5- Yüzey kalitesi ve pürüzlülük denetim hassasiyetini etkileyebilir

6- Bilgisayarlı kayıt tutma yok

7- Test sonrası temizlik gerekli

8- Kimyasal işleme ve uygun bertaraf gerekli

Manyetik Parçacık Testi

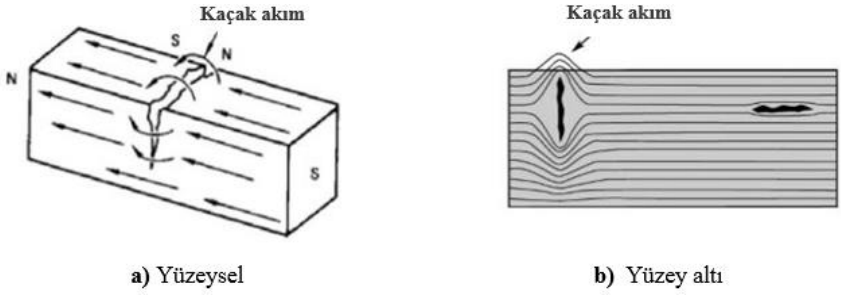
Manyetik parçacık testi çalışma prensibi, bölgeyi veya parçayı basitçe mıknatıslamak (doğrudan veya dolaylı olarak) ve ardından üzerine ıslak bir süspansiyon veya kuru demirli parçacıklar (tipik olarak demir oksit) uygulayarak çalışan bir tür çatlak algılama yöntemidir. Test edilen kısımda bir yüzey veya yüzey altı

süreksizliğinin varlığı, hava, metal kadar birim hacim başına manyetik alanı desteklemediğinden manyetik akının sızmasına izin verir. Şekil 12'de a) manyetik olmayan ve b) manyetik olan metalik malzemeler davranışı verilmiştir.



Şekil 12. a) manyetik olmayan ve b) manyetik olan metalik malzemeler

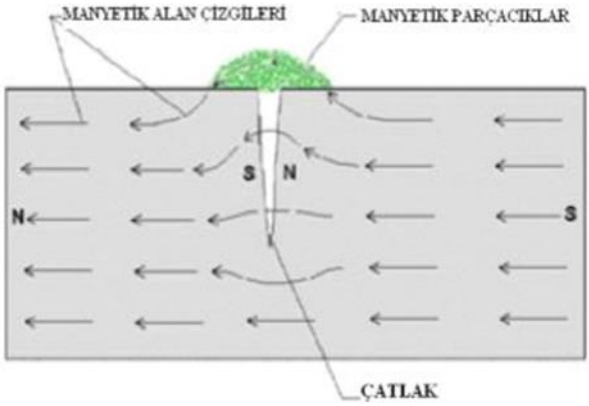
Bir akı sızıntısı alanı mevcutsa (Şekil 13'te metalik malzemelerin davranışı verilmiştir), demirli parçacıklar (parçacıklar malzeme veya parça ile renk olarak farklı seçilmelidir) ona çekilir ve test edilen alanda bir yüzey veya yüzey altı süreksizliğin meydana geldiğini gösterir (URL 7).



Şekil 13. Manyetik alan çizgileri

Manyetik parçacık testinin artıları ve bazı avantajları şunlardır:

1. Nispeten karmaşık olmayan
2. Kusurların neredeyse anında belirtilmesi
3. Nispeten ucuz
4. Büyük ve küçük nesnelerin incelenmesine izin verir



Şekil 14. Manyetik parçacık yönteminin şematik uygulanışını gösterimi.

Manyetik parçacık testinin eksileri ve bazı dezavantajları şunlardır:

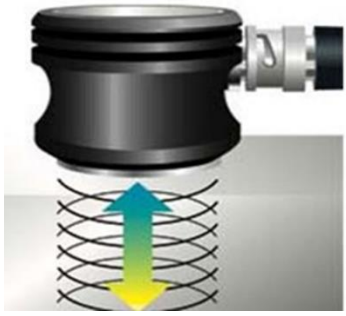
1. Ferromanyetik malzemelerle sınırlıdır
2. Bazı yüzey hazırlığı gerekli
3. Belirli koşullar altında dağınık ve kullanışsız
4. Elektrik kaynağına ihtiyaç var
5. Derinlik boyutu yok
6. Temizlik sonrası gerekli
7. Bilgisayarlı kayıt tutma yok
8. Kalın boya / kaplamalarda kullanılamaz
9. Sahte veya alakasız belirtiler olasıdır — keskin beceriler gerektirir



Şekil 15. Manyetik Muayene Uygulaması

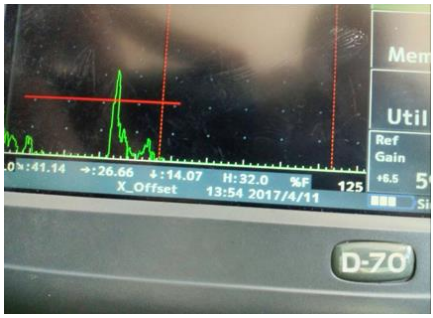
Ultrasonik Test

Ultrasonik test, ultrasonik dalgaları bir nesne veya malzeme üzerinden gönderen bir dizi tahribatsız muayene tekniğini içerir. Bu yüksek frekanslı ses dalgaları, malzemeyi karakterize etmek veya kusur tespiti için malzemelere iletilir. Çoğu ultrasonik test inceleme uygulaması, 50 MHz'e kadar olan frekanslar kullanılabilmesine rağmen, 0,1-15 MHz arasında değişen frekanslara sahip kısa darbe dalgaları kullanır. Aşağıda Şekil 16'da muayene yönteminin şematik gösterimi verilmiştir. (URL 8).

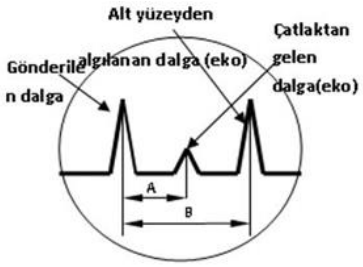


Şekil 16. Ultrasonik muayene yönteminin şematik gösterimi.

Ultrasonik incelemenin çalışması, en temel biçiminde bir pulsatör-alıcı ve osiloskop ekranı olan bir kusur detektörüne bağlı bir piezoelektrik dönüştürücü kullanır. Dönüştürücü, tipik olarak test nesnesine jel, yağ veya su ile bağlanan, incelenmekte olan nesnenin üzerinden geçirilir. Bu bağlayıcı, ses enerjisini dönüştürücüden parçaya verimli bir şekilde iletmek için gereklidir, ancak bu bağlayıcı, elektromanyetik akustik dönüştürücü (EMAT) veya lazer uyarımı gibi temassız tekniklerle testler yapılırken gerekli değildir. Aşağıda Şekil 17'de osiloskop ekranında sinyallerin görüntüsü,Şekil 18'de bu sinyal dalgalarının değerlendirilmesi verilmiştir.(URL 9).



Şekil 17. Osiloskop Ekranı



Şekil 18. Dalgaların Değerlendirilmesi

Yukarıdaki Şekil 17'deki osiloskop ekranına baktığımızda hatanın 26,66 mm ileride ve 14,07 mm derinlikte olduğunu anlıyoruz. Hatanın başladığı yer ile bittiği yeri belirleyerek hata büyüklüğünü anlayabiliriz. Ayrıca muayene yaptığımız parça uygun ise enine muayene ederken de hatanın boyutunu üç boyutlu öğrenebiliriz. Ultrasonik test, iki temel yöntem kullanılarak gerçekleştirilebilir - darbe eko ve geçişli iletim. Darbe eko testi ile aynı dönüştürücü ses dalgası enerjisini yayar ve alır. Bu yöntem, dalgaları sondaya geri yansıtmak için nesnenin arkası veya bir kusur gibi bir ara yüzde yankı sinyalleri kullanır. Sonuçlar, y ekseninde yansımanın yoğunluğunu ve x eksenindeki mesafesini veya süresini temsil eden ve malzemeden geçen sinyalin derinliğini gösteren bir genlikle bir çizgi grafiği olarak gösterilir.

Transmisyon testi, ultrason dalgalarını bir yüzeyden göndermek için bir verici ve nesnenin karşı tarafına ulaşan ses enerjisini almak için ayrı bir alıcı kullanır. Malzemedeki kusurlar alınan ses miktarını azaltarak kusurların yerinin tespit edilmesini sağlar. Temaslı ultrasonik test, tipik olarak yerinde incelemelere erişilebilirlik veya taşınabilirlik için kullanılır. Temaslı ultrasonik muayene, bir test numunesinin yalnızca bir tarafının ulaşılabilir olduğu veya test edilecek parçaların büyük, düzensiz şekilli veya taşınmasının zor olduğu yerlerde gerçekleştirilebilir. Aşağıda Şekil 19'da Temaslı ultrasonik muayene gösterilmiştir.



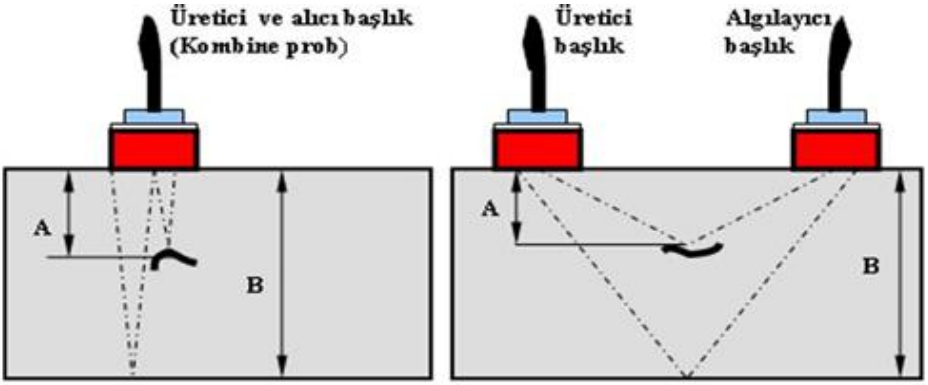
Şekil 19. Temaslı ultrasonik muayene uygulaması

Daldırma ultrasonik test, kavisli bileşenler, karmaşık geometriler ve ultrasonik teknik geliştirme için en uygun olan laboratuvar tabanlı veya fabrika tabanlı tahribatsız bir testtir. Bu yöntemde, bileşen veya malzeme, temas ultrasonu için kullanılan jellerin yerine bir bağlayıcı görevi gören bir suya batırılır. Daldırma ultrasonik test genellikle darbe eko yöntemini kullanır ve robotik prob yörüngeleri, temaslı problarla kaplanması zor olan karmaşık yüzeyleri incelemek için kullanılabilir. Daldırma ultrasonik test, çok çeşitli duvar kalınlığı ve malzeme türleri

için kullanılabilir, bu da onu çeşitli uygulamalar ve endüstriler için uygun bir test yöntemi haline getirir.

Kullanıldığı yerler: Tahribatsız bir test yöntemi olan ultrasonik test, test edilen nesneye veya malzemeye zarar vermeden kusurları ve kusurları tespit etmek için idealdir. Periyodik ultrasonik muayeneler, korozyonu veya bilinen kusurların büyümesini kontrol etmek ve böylece potansiyel olarak bir parçanın, bileşenin veya tüm varlığın arızalanmasını önlemek için de kullanılabilir. Bu test yöntemi için yaygın bir uygulama, boru tesisatı korozyonunu değerlendirirken olduğu gibi bir nesnenin kalınlığını tespit etmek için kullanılan ultrasonik kalınlık ölçümüdür. Ultrasonik teknoloji, tıp sektöründe on yıllardır başarılı bir şekilde kullanılmaktadır ve iyonlaştırıcı radyasyonun olmaması nedeniyle hem rutin tanısal görüntüleme tercih edilen seçenek haline gelmektedir. Havacılık, otomotiv, inşaat, medikal, metalurji ve imalat dâhil olmak üzere çok çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır (URL 9).

Hangi malzemeler test edilebilir: Ultrasonik test, birçok farklı malzemeye uygunluğundan dolayı çok çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. Ultrasonik test ideal olarak metaller gibi yoğun, kristal yapıların muayenesi için kullanılır. Seramikler, plastikler, kompozitler ve beton da başarılı bir şekilde incelenebilir, ancak bu malzemelerdeki zayıflama daha yüksek olduğu için daha düşük çözünürlükle test edilebilir.



Şekil 20. Ultrasonik muayene şematik gösterim

Ultrasonik testin avantajları:

1. Yüksek penetrasyon gücü, bir parçanın derinliklerinde kusur tespiti sağlar
2. Çok küçük kusurların tespit edilmesini sağlayan yüksek hassasiyet

3. Bir nesnenin yalnızca bir tarafının erişilebilir olduğunu test etmek için kullanılabilir

4. İç kusurların derinliğini ve paralel yüzeyli parçaların kalınlığını belirlemek için diğer tahribatsız test yöntemlerine kıyasla daha yüksek doğruluk

5. Kusurların boyutunu, şeklini, yönünü ve doğasını tahmin edebilme

6. Farklı akustik özelliklere sahip bileşenlerin alaşım yapılarını tahmin edebilme

7. Yakındaki personel, ekipman veya malzemeler için tehlikeli değil

8. Son derece otomatik ve taşınabilir işlemler mümkündür

9. Anında kararlar alınmasına izin veren anında sonuçlar alınabilir

Ultrasonik testte aşağıdaki gibi birkaç sınırlamalar vardır:

1. İnceleme ve veri yorumlama için deneyimli teknisyenler gerektirir

2. Sahte sinyaller olarak da bilinen hatalı pozitif sonuçlar, tolere edilebilir anormalliklerden ve bileşen geometrisinin kendisinden kaynaklanabilir

3. Kaba, düzensiz şekilli, çok küçük veya ince veya homojen olmayan nesnelerin incelenmesi zordur

4. Test başlamadan önce gevşek ölçek veya boyanın çıkarılması gerekir, ancak temiz, düzgün bir şekilde yapıştırılmış boya yerinde bırakılabilir.

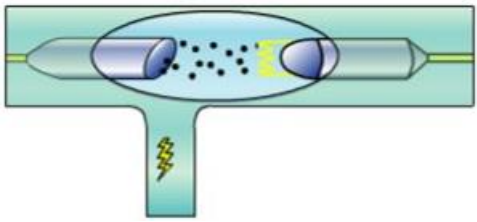
5. Geleneksel ultrasonik test kullanan testler için gerekli kaplinler

6. Ultrasonik test, hacimsel kusurlar, özellikle metal kapanımlar için radyografik teste göre daha düşük hassasiyete sahip olabilir

Uygulamalar: Ultrasonik test, bir malzeme veya bileşenin bütünlüğünün test edilmesi de dâhil olmak üzere endüstri genelinde çeşitli uygulamalara sahiptir. Bu, herhangi bir süreksizlik olup olmadığını belirlemek için kaynakların test edilmesini içerebilir. Bu test hem demir içeren hem de demir içermeyen malzemeler üzerinde ve ayrıca daha kalın bölümler ve yalnızca tek taraftan ulaşılabilenler için yapılabilir. Ultrasonik test ayrıca, radyografik testlerle kolayca değerlendirilemeyen daha ince kusurları ve düzlemsel kusurları da tespit edebilir. Ultrasonik test uygulamaları, havacılık, otomotiv, inşaat, demiryolu, medikal ve petrol ve gaz endüstrilerindekileri içerir (URL 9).

Radyografik Test

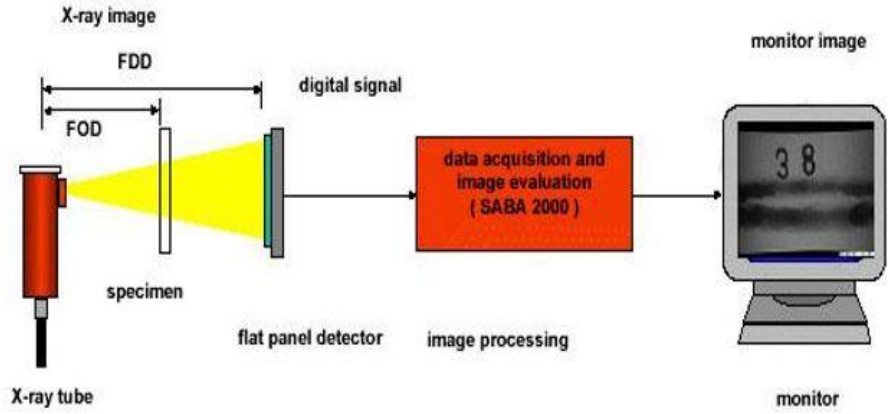
Radyografik Test (Radyografik test veya X-ışını veya Gama ışını), bir numunenin hacmini inceleyen tahribatsız bir test yöntemidir. Radyografi (X-ışını), operasyonunuzda optimum kaliteyi sağlamak için kalınlık, kusur (iç ve dış) ve montaj ayrıntılarındaki herhangi bir değişikliği gösteren bir numunenin radyografisini oluşturmak için X ve gama ışınları kullanır.



Şekil 21. X ışınlarının oluşturulması

Radyografik test, X ışınlarını veya gama ışınlarını kullanır. X ışınları bir X-ışını tüpü tarafından üretilir ve gama ışınları bir radyoaktif izotop tarafından üretilir. Yukarıda Şekil 21'te bu X ışınlarının oluşturulması gösterilmiştir.

Radyografik test genellikle, bazı borularda kullanılan çift duvarlı sinyal görüntü teknikleri haricinde, her iki taraftan da erişilebilen kaynaklı bağlantıların test edilmesi için uygundur. Bu yavaş ve pahalı bir tahribatsız muayene yöntemi olmasına rağmen, kaynak içlerindeki gözenekliliği, kapanımları, çatlakları ve boşlukları tespit etmenin güvenilir bir yoludur.



Şekil 22. Radyografik muayene yöntemi şematik gösterim

Yöntem, bir hastanedeki tıbbi radyografi ile aynı prensibe dayanmaktadır. İncelenen malzemenin uzak tarafına bir parça radyografik film yerleştirilir ve daha

sonra radyasyon, malzemenin bir tarafından radyografik filmin yerleştirildiği uzak tarafa iletilir. Yukarıda Şekil 22'de Radyografik muayene yöntemi şematik olarak gösterilmiştir (URL 10).

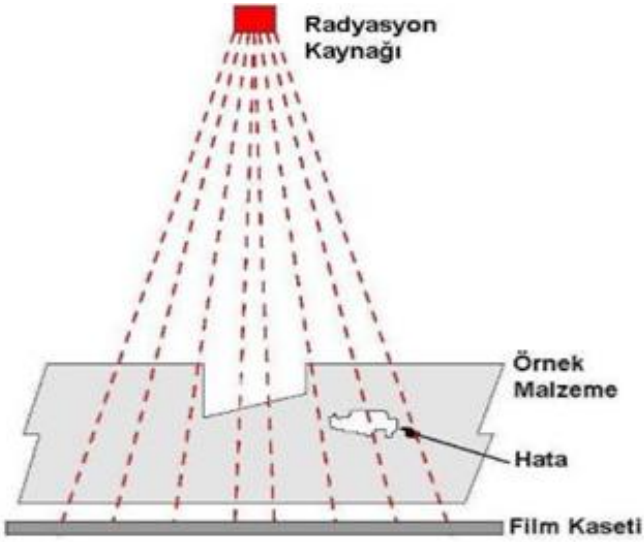
Radyografik film, radyasyonu algılar ve filmin tüm yüzeyinde alınan çeşitli miktarlarda radyasyonu ölçer. Bu film daha sonra karanlık oda koşullarında işlenir ve film tarafından alınan çeşitli radyasyon dereceleri farklı derecelerde siyah ve beyaz gösterilerek görüntülenir, buna film yoğunluğu denir ve özel bir ışık yayan cihazda görüntülenir. Şekil 23'te gösterilmiştir.



Şekil 23. Radyografik yöntemle test edilmiş parça

Malzemedeki süreksizlikler, film tarafından malzemenin bu belirli düzlemi aracılığıyla alınan radyasyon miktarını etkiler. Nitelikli denetçiler ortaya çıkan görüntüleri yorumlayabilir ve malzemede bulunan kusurun yerini ve türünü kaydedebilir. Radyografi çoğu malzeme ve ürün formunda kullanılabilir, örneğin kaynaklar, dökümler, kompozitler vb.

Radyografik test, radyografi biçiminde kalıcı bir kayıt sağlar ve malzemenin içyapısının oldukça hassas bir görüntüsünü sağlar. Aşağıda Şekil 24'de Radyografik muayene şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 24. Radyografik muayene şematik gösterimi

Nesne tarafından emilen enerji miktarı kalınlığına ve yoğunluğuna bağlıdır. Nesne tarafından emilmeyen enerji, radyografik filmin açığa çıkmasına neden olur. Film geliştirildiğinde bu alanlar karanlık olacaktır. Filmin daha az enerjiye maruz kalan alanları daha hafif kalır. Bu nedenle, gözeneklilik veya çatlaklar gibi süreksizlikler nedeniyle kalınlığın değiştirildiği nesnenin alanları filmde koyu ana hatlar olarak görünecektir. Cüruf gibi düşük yoğunluklu kapanımlar film üzerinde karanlık alanlar olarak görünürken, tungsten gibi yüksek yoğunluklu katkılar açık alanlar olarak görünecektir (URL 11).

Tüm süreksizlikler, işlenen filmin kaynak şekli ve yoğunluğundaki değişimler izlenerek tespit edilir. Personel uygun şekilde eğitilmişse, kaynak kalitesinin bu kalıcı film kaydının yorumlanması nispeten kolaydır. Yalnızca kalifiye personel radyografi ve radyografik yorumlama yapmalıdır çünkü yanlış okumalar pahalı olabilir ve üretkenliği ciddi şekilde etkileyebilir ve görünmez X-ışını ve gama radyasyonu tehlikeli olabilir (URL 11).

Radyografinin avantajları ve sınırlamaları aşağıda verilmiştir (URL 12).

Radyografi avantajları:

1. Neredeyse hiçbir yüzey hazırlığı gerektirmez
2. Hacimsel: hem yüzey hem de alt yüzey göstergeleri bulunabilir
3. Montajlı bileşenlerin muayenesi için uygundur
4. Saha içi ve yayın içi denetimler için uygundur

5. Birçok farklı malzeme türü için uygundur
6. Kalıcı kayıt çıktıları (film veya dijital dosya)

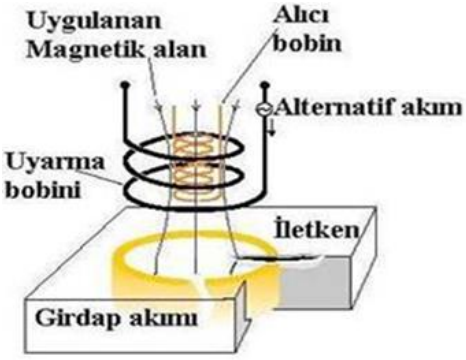
Radyografi sınırlamaları:

1. Tehlikeli iyonlaştırıcı radyasyon, güvenlik çemberinin oluşturulmasını gerektirir
2. Nispeten pahalı ekipman
3. Nispeten yavaş denetim süreci
4. Kusur yönelimine duyarlı
5. Genellikle endikasyonların derinliğini belirlemek mümkün değildir
6. Test nesnesine iki taraflı erişim gereklidir

Eddy-Current, Girdap Akımı Test

Girdap akımı testi, elektromanyetik indüksiyon yoluyla yüzey ve yüzey altı kusurlarını tespit etmek için kullanılan tahribatsız bir test tekniğidir. En basit haliyle, bobin etrafında bir manyetik alan oluşturmak için alternatif bir akım geçirerek uyarılabilen sarmal bakır telin kullanılmasını içerir. Bobin test edilen iletken malzemeye yaklaştıkça, malzemedeki akıma karşı bobindeki akım indüklenecek ve test edilen iletken malzemedeki herhangi bir kusur, girdap akımlarının yolu boyunca bir bozulma yaratacaktır. Girdap akımının yollarındaki bozulma, bakır bobindeki empedans değişimleri ile ölçülebilir (URL 13).

İletken malzemedeki bir kusur, girdap akımlarının yolunu bozarak, bobindeki empedans değişimleri ölçülerek ölçülebilen, sistemin dengesini değiştiren yerel bir manyetik alan yaratır. Aşağıda Şekil 25'te Girdap Akım test yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 25. Girdap Akım test yöntemi şematik gösterimi

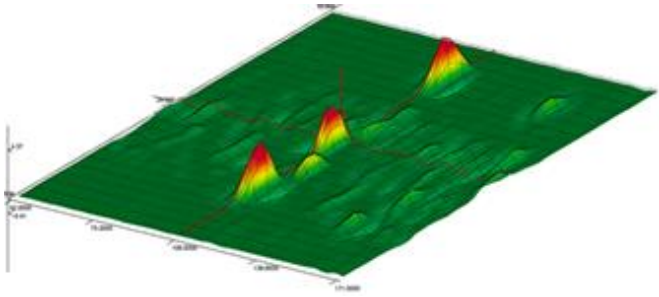
Girdap akımı testinin artıları ve bazı avantajları şunlardır:

1. Yüzey ve yüzey altı kusurlarına duyarlı
2. Çok katmanlı yapılar aracılığıyla algılama yeteneği
3. İnce iletken olmayan yüzey kaplamalarıyla algılayabilir
4. Biraz ön temizlik gerekli
5. Taşınabilir test ekipmanı küçük ve hafiftir

Girdap akımı testinin eksileri ve bazı dezavantajları şunlardır:

1. Manyetik geçirgenlik değişimlerinden etkilenir
2. Yalnızca iletken malzemeler üzerinde etkilidir
3. Operatöre bağlı
4. Geleneksel sinyal yorumlama beceri gerektirir

Eddy Current Array: Eddy akımı dizisi süper şarjlı girdap akımı testidir, Normal girdap akımı testi geleneksel, tek sarmallı problardan (yani, girdap akımı testinde kullanan kalem ve kaynak probları) tek geçişte daha büyük bir alanı kapsayacak şekilde tek bir prob içinde düzenlenmiş bir dizi tek elemandır. Bobinler, yakın çevredeki bobinler (karşılıklı endüktans) arasındaki paraziti en aza indirmek ve probun çözünürlüğünü en üst düzeye çıkarmak için belirli dizilerde çoklanmış - etkinleştirilir ve devre dışı bırakılır. Eddy akımı dizisi probları, inceleme hızları üzerinde önemli bir etkiye sahip olan raster taramayı (Girdap akımı testi kalem probları kullanırken gerekli) etkili bir şekilde ortadan kaldırır Şekil 26'da girdap akım test yöntemi ile alınan sonucun bilgisayarda geliştirilmiş görüntüsü verilmiştir (URL 7).



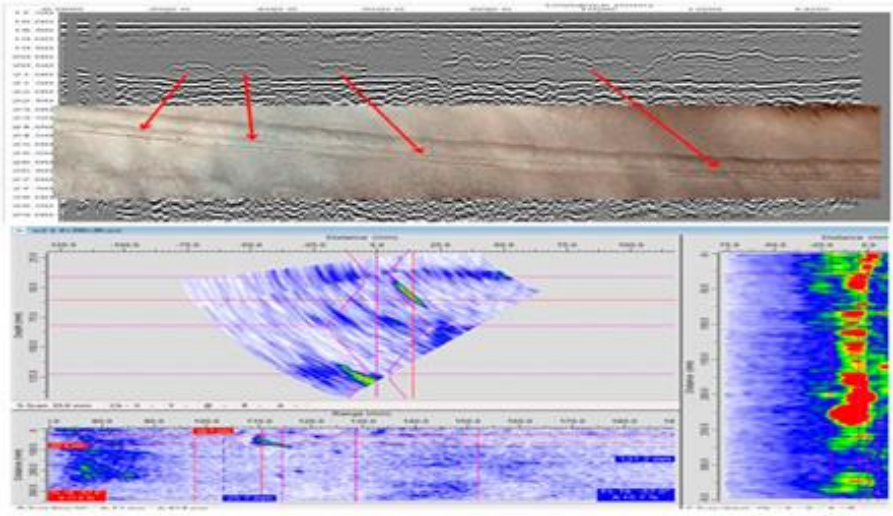
Şekil 26. Girdap Akım test yöntemi ile alınan sonucun bilgisayarda geliştirilmiş görüntüsü

Teğet Girdap Akımı Dizisi: karbon çelik kaynaklarda yüzey kırılma çatlaklarını tespit etmek için özel olarak tasarlanmış, çok katlı teğetsel bobinler ve yassı

bobinlerin bir karışımıdır. Teğet Girdap Akımı Dizisi bobin düzenlemesi ve çalışma modu, karbon çeliğindeki yüzey kıran çatlaklardan benzersiz girdap akımı sinyalleri vererek derinliklerinin boyutlandırılmasını sağlar. Vericiler, taramaların yönüne dik olarak akan girdap akımlarını tetikler. Girdap akımları uzunlamasına çatlaklarla karşılaştığında, altından dalarak veya ekstremitelerin etrafında hareket ederek etrafından akarlar (URL7).

Phased Array Muayene

Phased Array ultrasonik test (Paut) ultrasonik testin gelişmiş bir yöntemdir. Phased Array Ultrasonik yöntem konvansiyonel ultrasonik test yöntemi ile kolayca bulunamayan malzemede gizli kusurları ortaya çıkarmamıza olanak sağlayan daha etkin bir yöntemdir. Phased Array probu her biri bireysel olarak darbeli bir dizi küçük ultrasonik dönüştürücü içerir. Ultrasonik demet için gereken açı genel olarak elektronik demet olarak adlandırılan şekilde her bir elementin darbe zamanlamasını değiştirilerek elde edilebilir.



Şekil 27. Phased Array muayene yöntemi bilgisayar ekran görüntüsü

Ultrasonik demet muayene edilen nesne aracılığıyla arama ışığı gibi süpürülür ve çoklu demetlerin verileri nesne aracılığıyla bir dilimi gösteren görsel bir resim yapmak için bir araya getirilir. Yukarıda Şekil 27'de Phased Array muayene yöntemi bilgisayar ekran görüntüsü verilmiştir. Çoklu prob elemanlarının kullanımı yönetilebilir, odaklanmış ve yüksek çözünürlüklü demet üretirler. Konvansiyonel ultrasonik test ile karşılaştırıldığında, Phased Array ultrasonik test aletleri ve probları karmaşık ve pahalıdır ve iyi derecede eğitimli yetenekli ve tecrübeli

teknisyenler gerektirir. Konvansiyonel ultrasonik test ile karşılaştırıldığında, Phased Array ultrasonik test aletleri ve probları karmaşık ve pahalıdır ve iyi derecede eğitimli yetenekli ve tecrübeli teknisyenler gerektirir.

Basınçla Muayene

Basınç Testi, sınırında bir değişiklik veya onarım geçirmiş olan yeni basınçlı ekipman veya önceden kurulmuş basınç ve boru ekipmanı üzerindeki basınç kabuğunun bütünlüğünü sağlamak için yapılan tahribatsız bir testtir. Yeni, değiştirilmiş veya onarılmış bir boru tesisatı sisteminin nominal basıncına güvenli bir şekilde dayanabildiğini ve sızdırmaz olduğunu doğrulamak için çoğu boru tesisatı kodu tarafından basınç testi gereklidir. Boru kodlarına uygunluk, düzenleyici ve uygulayıcı kurumlar, sigorta şirketleri veya sistemin inşası için sözleşme hükümleri tarafından zorunlu kılabilir. Yasal olarak gerekli olsun ya da olmasın basınç testi, çalışanları ve halkı koruma amacına hizmet eder (URL 14).

Basınç testi, hesaplama yoluyla güvenli bir derecelendirme oluşturmanın mümkün olmadığı bir bileşen veya özel sistem için bir basınç derecelendirmesi oluşturmak için de kullanılabilir. Bileşenin veya sistemin bir prototipi, ölçülebilir akma ilk meydana gelene kadar veya alternatif olarak kopma noktasına kadar kademeli olarak artan bir basınca tabi tutulur. Daha sonra, bileşen veya sisteme uygun kodda veya standartta belirtilen değer kaybı faktörlerini kullanarak, deneysel verilerden bir tasarım basınç derecesi oluşturmak mümkündür (URL 15).

Sızıntı Testi Yöntemleri: Sahada basınç ve sızıntı testi için birçok farklı yöntem vardır. Bunlardan yedisi:

1. Basınç altında su veya başka bir sıvı kullanan hidrostatik test
2. Basınç altında hava veya başka bir gaz kullanan pnömatik veya gaz-sıvı testi
3. Düşük basınçlı havanın ilk olarak kaçakları tespit etmek için kullanıldığı pnömatik ve hidrostatik testlerin bir kombinasyonu
4. Sistem ilk çalıştırıldığında bir kaçak incelemesini içeren ilk hizmet testi
5. Bir sızıntının varlığını kontrol etmek için negatif basınç kullanan vakum testi
6. Normalde drenaj boruları için belirli bir süre dikey boruda bırakılan suyla yapılan statik kafa testi
7. Halojen ve helyum kaçağı tespiti

Hidrostatik kaçak testi:

Hidrostatik test, tercih edilen sızıntı testi yöntemidir ve belki de en sık kullanılan yöntemdir. Bunun en önemli nedeni, hidrostatik testin pnömatik teste göre göreceli güvenliğidir. Su, neredeyse sıkıştırılamaz olduğu için havadan çok daha güvenli bir sıvı test ortamıdır. Bu nedenle, bir boru sisteminde suyu belirli bir basınca sıkıştırmak için gereken iş miktarı, havayı veya başka herhangi bir gazı aynı basınca sıkıştırmak için gereken işten önemli ölçüde daha azdır. Sıkıştırma işi, basınç testi sırasında bir arıza durumunda aniden serbest bırakılabilen potansiyel bir enerji olarak sıvıda depolanır. 6900 kPa aynı nihai su hacminin potansiyel enerjisine kıyasla 6900 kPa basınca kadar sıkıştırılan havanın potansiyel enerjisinin hesaplanması 2500'ün 1'e oranını gösterir. Bu nedenle, Bir basınç testi sırasındaki bir arızadan kaynaklanan çevredeki ekipman ve personelde meydana gelebilecek olası hasar, gazlı bir test ortamı kullanıldığında çok daha ciddidir. Bir hidrostatik sızıntı testinde hiçbir tehlike olmadığı anlamına gelmez. Hidrostatik testte borularda sıkışan hava nedeniyle önemli tehlike olabilir. Basınç vermeden önce tüm hava borulardan tahliye edilse bile, çalışanların güvenliği göz önünde bulundurarak yüksek basınç testi yapmaları önerilir (URL15).

Pnömatik kaçak testi:

Normalde pnömatik bir test için kullanılan akışkan, sıkıştırılmış hava veya kaynak şişelenmiş gaz ise nitrojendir. Dışarı çıkan nitrojenin kapalı alandaki havanın yerini değiştirmesi olasılığı varsa, azot kapalı bir alanda kullanılmamalıdır. Kişilerin bu koşullar altında oksijen yetersizliği olduğunu fark etmeden önce bilinçsiz hale geldiği bilinmektedir. Gazlı bir test ortamı ile daha büyük yaralanma tehlikesi nedeniyle, sızıntıların görsel muayenesi için kullanılabilecek basınç, bazı boru tesisatı kodlarında hidrostatik teste göre daha düşüktür. Örneğin, pnömatik testler için ASME B31.1, basıncın 690 kPa altına veya sızıntı muayenesi sırasında tasarım basıncının altına düşürülmesine izin verir.

Birleştirilmiş pnömatik ve hidrostatik test:

Düşük hava basıncı, çoğunlukla 175 kPa büyük sızıntılar olup olmadığını görmek için ilk olarak kullanılır. Bu düşük basınç, kişisel yaralanma tehlikesini azaltır, ancak yine de büyük sızıntıların hızlı bir şekilde tespit edilmesini sağlar. Gerekirse onarımlar hidrostatik testten önce yapılabilir. Bu yöntem, özellikle ilk denemede sızıntıları bulmak için bir sistemi suyla doldurmak uzun zaman alı-

yorsa, zamandan tasarruf etmede çok etkili olabilir. Hidrostatik testte sızıntı bulunursa, onarım yapmak için suyu çıkarmak ve boruları yeterince kurutmak daha uzun sürecektir.

Hidrostatik-pnömatik sızıntı testi, önceki paragrafta verilen iki aşamalı testten farklıdır. Bu durumda basınç testi hava ve su birleşimi ile yapılır. Örneğin, sıvının üzerinde bir buhar fazına veya havaya sahip bir proses sıvısını içerecek şekilde tasarlanmış bir basınçlı kap, sıvının ağırlığını belirli bir maksimum beklenen sıvı yüksekliğine kadar desteklemek için tasarlanmış olabilir. Kap, tamamen sıvı ile doldurulduğunda ağırlığı desteklemek üzere tasarlanmamışsa, bu kabın, maksimum beklenen seviyenin etkisini çoğaltacak bir seviyeye kısmen proses sıvısı ile doldurulması halinde test edilmesi mümkün olacaktır.

Vakum sızıntı testi: sistemin herhangi bir yerinde bir sızıntı olup olmadığını belirlemenin etkili bir yoludur. Bu, normalde sisteme bir vakum çekerek ve vakumun sistem içinde tutulmasıyla yapılır. Sıkışan vakum atmosferik basınca yükselirse sızıntı belirtilir. Bir bileşen üreticisi, genellikle bu tür sızıntı testini üretim sızıntı testi olarak kullanır. Bununla birlikte, varsa bir sızıntının yerini veya yerlerini belirlemek çok zordur. Dumanın borulara çekildiği boru posizyonunu belirlemek için duman üreteçleri kullanılmıştır. Sızıntı dumanın tamamını veya çoğunu boruya çekmeye yetecek kadar büyük olmadıkça bunu kullanmak çok zordur. Oluşan duman boruya çekilenden çok daha fazla ise, çevreleyen havaya dağılan duman sızıntı yerini kolayca gizleyebilir. Açıktır ki bu yöntem, boru tesisatı bir vakumda çalıştırılmayacaksa, boru tesisatını çalışma basıncında veya üzerinde test etmek için uygun değildir.

Test Basınçları: Seçilen test yöntemi ve sıvı test ortamı, geçerli kodla birlikte, gerekli test basıncının hesaplanmasında izlenecek kuralları da belirleyecektir. Çoğu durumda tasarım basınç oranından daha büyük bir basınç kısa bir süre, örneğin en az 10 dakika süreyle uygulanır. Bu ilk test basıncının büyüklüğü, genellikle bir hidrostatik test için tasarım basınç oranının en az 1,5 katıdır. Ancak, hangi kodun uygulanabilir olduğuna ve testin hidrostatik veya pnömatik olmasına bağlı olarak farklı olabilir. Ayrıca, test basıncı, esnemeye neden olacak bir basıncı veya teste maruz kalan bazı bileşenlerin izin verilen maksimum test basıncını asla aşmamalıdır. ASME B31, bölüm 137.1.4 ve Kazan ve Basınçlı Kap Kodları söz konusu olduğunda, maksimum test basıncı, teste maruz kalan herhangi bir bileşen için verimin yüzde 90'ını aşmamalıdır. Sistemin nominal basınca güvenli bir şe-

kilde dayanabileceğini göstermek için test basıncına ihtiyaç vardır. Tasarım basıncından daha uzun olan bu sürenin ardından, sızıntıların incelenmesi için basıncın daha düşük bir değere düşürülmesine genellikle izin verilir (URL 15). Kusurların Tipine Göre Muayene Yöntemlerinin Uygunlukları Aşağıda Tablo 2'de verilmiştir (URL 16).

Tablo 2. Kusurların Tipine Göre Test Yöntemlerinin Uygunlukları.

Kusur Tipi / Muayene yöntemi		Görsel	Sıvı Penetran	Girdap Akımı	X-Işını Röntgen	Manyetik Parçacık	Ultrasonik
Yüzey Kırığı Doğrusal		C	A	A	C	A	D
Yüzey Kırığı yüzeye doğrusal ve paralel		C	A	A	D	A	D
Yüzeye Yakın Hacimsel		D	D	B	A	B	B
Yüzeyin Altında Hacimsel		D	D	D	A	D	A

A = En uygun
B = Kullanmak için Tamam
C = O kadar iyi değil
D = Hiç uygun değil

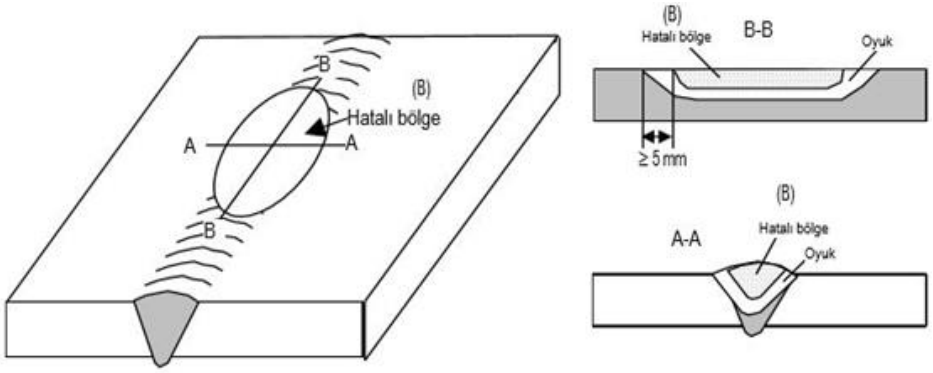
Metal Malzemelerde Çatlak Onarma

Çatlaklar, bir malzemede gelişen yüzey veya yüzey altı çatlaklardır. Mekanik, termal, kimyasal ve metalurjik etkilerden elde edilen yayılma enerjisi veya bunların bir kombinasyonu çatlak başlangıcını ve büyümesini etkileyebilir. Metallerde çeşitli çatlak türleri vardır ve soğutma, katılaşma, merkez hattı, krater, taşlama, asitle temizleme, ısıl işlem, işleme yırtıkları, kaplama, yorulma, sünme, gerilme korozyonu ve hidrojen çatlakları olarak kategorize edilebilir. Çatlaklar büyüyebilir ve bileşen ömrünü önemli ölçüde tehdit ederek bileşenin tamamen kırılmasına neden olabilir ve ciddi yaralanmalara veya can kaybına yol açabilir. Metallerde kırılgan kırılma, çok az veya hiç görünmeden veya uyarı olmadan meydana gelir. Herhangi bir çatlağın bulunması, çatlakların kırılma noktasına ilerlemeden önce durdurulması için acil müdahaleler şarttır. Mekanik bileşenlerde ve yapılarda kritik çatlaklar tespit edildiğinde, bunların daha fazla büyümesini veya yayılmasını engellemek veya durdurmak için birkaç yöntem kullanılır. Kullanılacak onarım

tekniğinin veya kombinasyonun seçimi, çatlağın niteliği, çatlak konumu, çatlak yönü, çatlak boyutu, çatlak erişilebilirliği, bileşen uygulaması, beklenen onarım hassasiyeti, aletlerin bulunabilirliği, metal türü, bileşen kalınlığı ve gerekli uzmanlık gibi birçok faktöre bağlıdır. Metallerde çeşitli çatlak tespit ve onarım yöntemleri geliştirilmiş, karakterize edilmiş ve araştırma yoluyla doğrulanmıştır. Yaygın olarak kullanılan teknikler aşağıdaki tek tek açıklanacaktır (Dexter, Ocel, 2013).

Kaynakla Çatlak Onarımı

V kaynak yöntemi uzun, kalınlıktaki çatlaklar için bir kaynak onarım yöntemidir. Bir çatlak tespit edildiğinde, malzeme çatlak uzunluğu boyunca, V şeklinde çatlayan bölümün kalınlığının dörtte üçü boyunca çıkarılır. V şeklindeki oluk daha sonra kaynak metali ile doldurulur ve işlem bölümün diğer tarafında tekrarlanır, böylece tüm çatlak kaynakla değiştirilir. Tercih edilen malzeme kaldırma yöntemi hava arklı oluk açmadır, ancak taşlama da işe yarar.



Şekil 28. Hatalı bölgenin tamir kaynağına hazırlanması

Çatlak malzemeyi çıkarmak için bir disk öğütücü kullanmanın dezavantajı, daha fazla malzeme kaldırıldıkça çatlağın bulanıklaşması (veya bulaşması) olabilir. Bu, çatlak yolunu gizleme veya maskeleme ve onarım kaynağı içinde gömülü bir kusur bırakma olasılığını artırır. Hava arklı oluk açarken, malzeme çıkarıldıkça çatlak açılıyor gibi görünür ve bu da çatlak yolunu takip etmeyi kolaylaştırır. Şekil 28'de karbon ark oluklu çatlak haddelenmiş bir kiriş flanşını gösterilmiştir. Şekilde, çatlakların tamamen kaldırılmasını kolaylaştırmak için ağda bir erişim deliğinin kesilmesi gerektiği görülebilir. Bir köprü elemanındaki onarımlarda, erişim deliği açmak için delikler açmanız veya alevle kesilmiş kenarları düzleştirerek

erişim deliğinin yorgunluk çatlaklarını başlatmaması tavsiye edilir (Dexter, Ocel, 2013).

Çevresel koşullar ve uygunsuz konumlandırma nedeniyle sahada yapılan kaynakların kalitesi genellikle bir fabrikada yapılanlardan daha düşük olduğundan, kaynak dikişi tamiri dikkatli bir şekilde belirtilmelidir. Kaynakçılar deneyimli, sertifikalı ve en az bir fabrikasyon atölyesinde çalışanlar kadar yetenekli olmalıdır.

Kaynak onarımları, kaynaksız ana metaldeki çatlaklar değil, çatlak bir kaynak ayrıntısını onarmak için kullanıldığında en etkilidir. Onarım kaynağı genellikle orijinal çatlaksız kaynak ayrıntısı ile aynı yorulma ömrünü gösterir. Bununla birlikte, kaynak yapılmayan ana metalin kaynakla onarımı nadiren etkilidir. Bu durumda, bir yorulma çatlağı genellikle orijinal kaynaksız ayrıntının çatlaması için geçen süreden daha kısa bir süre içinde yeniden ortaya çıkar. Bu durumda, kaynak dikişi tamiri, orijinal çatlamayla sonuçlanan gerilim aralığını azaltmak için diğer tekniklerle birlikte kullanılmalıdır(Dexter, Ocel, 2013).

Materyaller ve ekipman: Ark oluk açma: Hava arklı oluk açma, standart ekipman kullanılarak gerçekleştirilir. Ana metalin kalınlığına bağlı olarak 0,483-0,645 mm arasında değişen sarf malzemeleri kullanılabilir.

Kaynak işlemi: Onarımlar, kullanılabilirliğe ve saha koşullarına bağlı olarak korumalı metal ark kaynağı (SMAW), özlü ark kaynağı (FCAW) veya gaz metal ark kaynağı (GMAW) işlemi kullanılarak yapılabilir. Yüksek kaliteli bir saha kaynağı sağlamak için kaynak prosedürlerinin geliştirilmesine (ön ısıtma, kaynakçı sertifikasyonu, vb.) özel dikkat gösterilmelidir.

Sarf Malzemeleri: Her açıdan onarımın yapılabilmesi için tüm konum, köprü kalitesi, sarf malzemeleri seçilmelidir. Onarım kaynağının deformasyonu çevreleyen yapı tarafından sınırlanacağından, bitmiş onarım kaynağının mukavemeti tipik olarak önemli bir konu değildir. Sertifikalı nominal minimum nihai çekme dayanımı 480 MPa aşmamalıdır. 420 MPa daha düşük nihai çekme mukavemetine sahip yetersiz eşleştirilmiş kaynak sarf malzemeleri mevcuttur ve çok kısıtlı alanlarda artık gerilmeleri azaltmak için mümkünse kullanılmalıdır. Hidrojen çatlamasını önlemeye yardımcı olmak için E6018 veya E7018 gibi düşük hidrojenli bir SMAW elektrotu önerilir. FCAW işlemi kullanılıyorsa, yayılabilir hidrojeni minimumda tutmak için gaz koruma tercih edilir, ancak uygun kendinden korumalı sarf malzemeleri de kullanılabilir. AASHTO şartnamelerinin hükümleri

kullanılarak daha düşük bir değer gerekçelendirilemediği sürece, seçilen sarf malzemesi -30 ° C sıcaklıkta minimum 34 Joule Charpy V-çentik değerine sahip olmalıdır (Dexter, Ocel, 2013).

Yüksek mukavemetli çelik: Yüksek mukavemetli çeliğin (akma dayanımı 480 MPa veya daha fazla) kaynağı onarılırken hidrojen çatlağı riski yüksektir. Kaynak onarımları yalnızca, cıvatalı çift plakalar gibi diğer onarım türleri kesinlikle mümkün değilse yüksek dayanımlı çelik için kullanılmalıdır. Kaynağın neden olduğu artık gerilmeleri azaltmak için yüksek mukavemetli çelik kaynağı yapılırken yetersiz eşleşen sarf malzemeleri kullanılmalıdır. Kırılganlık çatlaması olasılığını azaltmak için yüksek mukavemetli çeliğin kaynağı için AWS D1.5'e göre minimum ön ısıtma gereksinimleri ve düşük hidrojen uygulamaları karşılanmalıdır (URL 17).

Prosedür

1. Sırasıyla penetrant boya nüfuz edici veya manyetik parçacık testi ile çatlak uçlarını tanımlayın.

2. Çatlak uzunluğunu çatlak malzemenin dörtte üçü kalınlığında olacak şekilde ufalayın veya havayla oyuk yapın. Sonraki adıma geçmeden önce kanalın farklı bir V veya U şekline sahip olduğundan emin olun.

Not: Kısmi kalınlıkta bir çatlak için tüm çatlağı çıkardığınızdan emin olun. Çatlak genellikle oyuk açan veya kaynakçı tarafından görülebilir ve oyuk açma veya kaynak sırasında yayılıyor gibi görünebilir. Oyuk açan ve kaynakçı, bunu rapor etmek ve çatlağın uçlarını yeniden konumlandırmak ve gerekirse onarımın kapsamını artırmak için uygun önlemleri almak üzere eğitilmelidir.

3. Oluklu kanaldaki tüm cürufu temizleyin ve çıkarın. Oluklu kanalı, AWS D1.5'te belirtilen tüm şartnameleri takip ederek uygun kaynak metalinden bir dizi küçük kirişli boncukla doldurun. Bu, kısmi kalınlık onarımını tamamlar.

4. Çatlamış malzemenin diğer tarafından, kalan çatlağı, tamir edilen malzemenin kalınlığının dörtte üçü boyunca zımparalayın veya havayla oyarak, henüz biriken kaynak metalini kısmen oyduğunuzdan emin olun.

5. Oluklu kanaldaki tüm cürufu bir öğütücü veya hava keskisi ile temizleyin ve çıkarın. Oluklu kanalı, AWS D1.1'de belirtilen tüm şartnameleri takip ederek uygun kaynak metalinden bir dizi küçük kirişli boncukla doldurun. Bu, tam kalınlıkta onarımı tamamlar.

6. Yeni kaynağın her iki tarafını da mevcut malzeme ile aynı hizada olacak şekilde taşlayın.

7. Gerekirse çıplak yüzeyleri astarlayın ve boyayın. Gelecekteki incelemelerde kullanılmak üzere köprü dosyasına dâhil edilmesi için konum ve onarım prosedürünü belgeleyin.

Şekil 29 'da gösterilen, V kaynak onarımı için bir kirişin hava arkı oluklu flanşı tamamen çatlamış. Flanşın tamamen oyulmasına izin vermek için delik ağa yerleştirilmelidir. Erişim deliği, bu kılavuzda önerildiği gibi düzleştirilmemiş.



Şekil 29. Karbon ark oluklu çatlak haddelenmiş bir kiriş flanşını gösterilmiştir.

Metalocking ve Metal Dikiş

Metalocking ve Metal dikiş döküm metallerindeki çatlakların kaynak yapılmasına gerek kalmadan tamir edilmesine yarayan bir yöntemdir. Dökme demir, dökme çelik ve ya alüminyumdan yapılmış tüm çatlaklı veya kırık parçalar üzerinde soğuk onarım yapılmasını sağlar. Kırılmalar ve çatlamalar genellikle aşırı yüklenmenin, olduğu yerlerde; kazalar, ekipman yanlış kullanımı veya döküm hataları nedeniyle meydana gelir.

Aşağıda gösterilen Metalock yöntemi düz bir zemine uygulanan basit bir tamir örneğidir. Daha karmaşık kırılmalarda veya daha karmaşık parçalarda meydana gelen hasarlarda Metalock Mühendisleri daha sistemli ve daha kapsayıcı bir araştırma ile bu işlemi daha verimli hale getirirler. Hasarın meydana geldiği parçanın bileşenleri, şekli, çalışması ve çevresel zorluklarıyla başa çıkmak için daha karmaşık prosedürler uygulamak zorundalar.

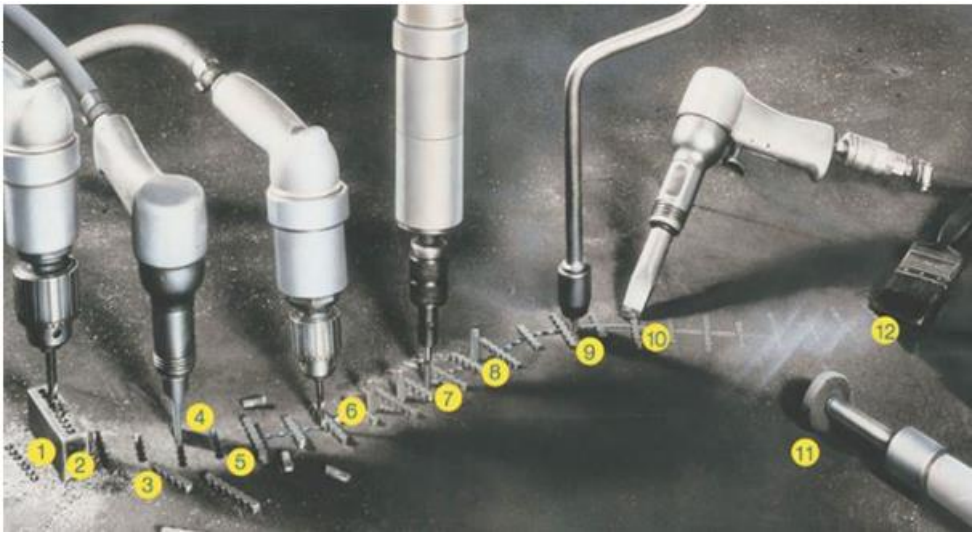
Metalock Tamir Prosesi

1-Müşteriye bir anket ve rapor sunulduktan sonra kırık, özel fikstürler ve kelepçelerle birlikte konumlandırılır, yeniden hizalanır ve sıkıca tutulur.

2- Özel delik delme aletleri kullanılarak, kırık hattı boyunca döküm derinliğine inene kadar

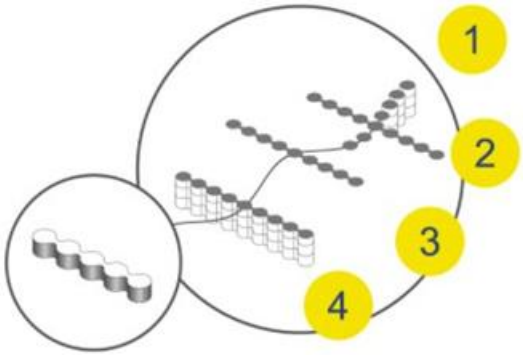
3- Metalock Anahtarı, yüksek sfero alaşımlı çoklu-dambıl biçimli bir kesittir ve boyut ve uzunluk kırığın türüne uyacak şekilde seçilmiştir.

4- Ardından delikler, Metalock Anahtarlarının şekline uyacak şekilde pnömatik keski kullanılarak birleştirilir.



Şekil 30. Metal Dikiş

5- Özel tabakalardan oluşmuş anahtarlar, çekiç ile vurularak daha önceden açılan deliklere oturtulur. Ana metal ile neredeyse bir bütün olacak şekilde bir metal- metal uyumu sağlanır.



Şekil 31. Metal Dikiş

6- Daha sonra kırık hattı boyunca delikler açılır ve bu deliklere dişler açılır.

7- Ardından bu delikler bağlantı elemanı ile doldurulur.

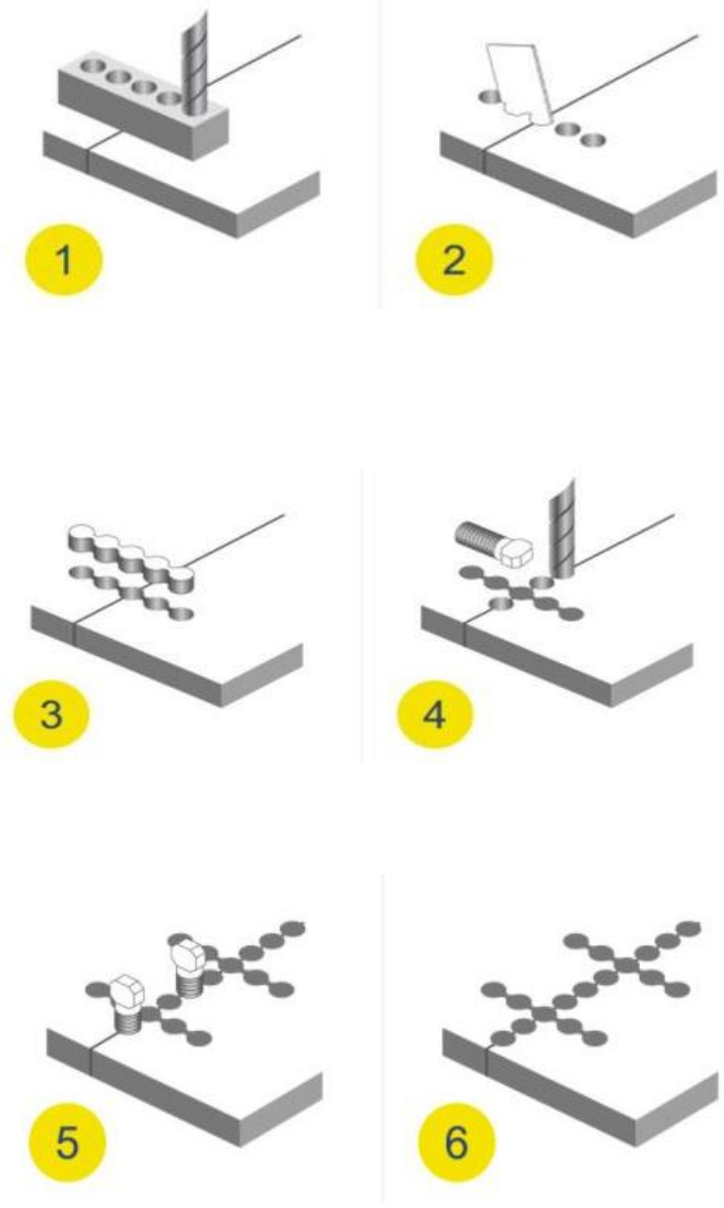
8- Her bağlantı elemanı kendisi için ayrılmış yere yerleştirilir. Basınçlı sıkıştırma ile döküm parçaşı onarılır ve sertlik kazanır.

9- Metalock prosesinin en önemli adımı olan basınçla sıkma işlemi sık sık tekrarlanır.

10- Bağlantı elemanları basınç ile sıkıştırılır ardından yüzeyde kalan kısım pnömatik keskiler kullanılarak kesilir.

11- Tüm onarım, son kat boyadan önce el ile taşınabilen taşlama makinesi ile taşlanır.

Metalock Döküm Onarım Şeması



Şekil 32. Metal Dikiş Aşamaları

1- Özel delik delme aletleri kullanılarak kör delik sıraları, çatlak yönüne dik olacak şekilde delinir. Her sıra anahtar olacak şkilde delinir.

2- Ara bölmeler pnömatik keski ile çıkarılır.

3- Metalock anahtarları delinmiş deliğe oturtulur ve kalafatlanır.

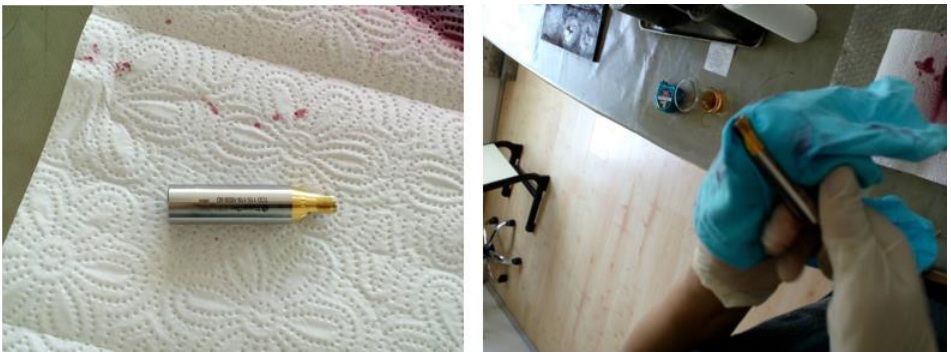
4- Metalock vidaları için anahtarlar arasındaki çatlak boyunca delik açılır.

5- Vidalar kırık yüzeyi mühür gibi kapsayacak şekilde yerleştirilir.

6- Son olarak, tüm tesisat kararlılık ve basınç sıkılığını sağlamak için kalafatlanır.[11]

YÖNTEM VE BULGULAR

Penetrant Sıvısı ile Freze Çakısının Muayenesi



Şekil 33. Temizlik Aşamaları

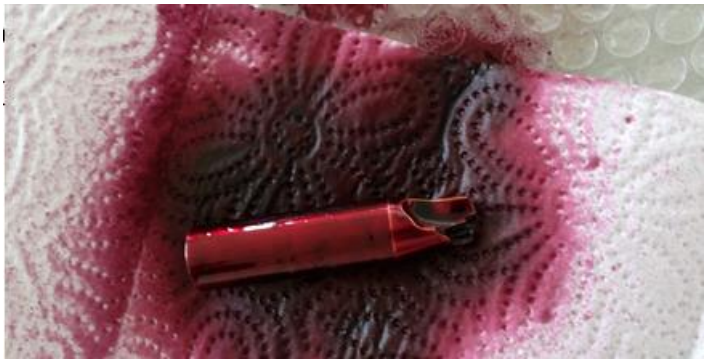
Başlangıçta freze çakısı her türlü kir, pas, yağ ve bunnlar benzeri maddelerden temizlendi. İlk

temizlik aşaması. Bu aşamalar yukarıda Şekil 33'te verilmiştir.



Şekil 34. Penetrant Sıvısı Uygulanışı

İkinci aşama olarak temizlenmiş olan parçaya Penetrant Sıvısı her parçanın her tarafına ulasacak şekilde püskürtüldü. Bu aşamalar yukarıda Şekil 34'te verilmiştir.



Şekil 35. Penetrant Sıvısının Nufüz Etmesi Safhası

Üçüncü aşamada penetrant sıvısının çatlaklar nufuz etmesi için 15 dakika beklenildi. Bu aşama yukarıda Şekil 35'te verilmiştir.



Şekil 36. Penetrant Sıvısının Nufüz Etmesi Safhası

Dördüncü aşamada çatlaklara nüfuz etmemiş yada yüzeyde mevcut olan penetrant bir bez yardımıyle temizlendi. Bu aşama yukarıda Şekil 36'da verilmiştir.



Şekil 37. Geliştiricin Penetrant Sıvıyı Yüzeye Çıkması

Beşinci adımda çatlaklar nüfuz etmiş penetrant sıvısının tekrardan yüzeye çıkması için parçamıza geliştirici sıkıldı. Yukarıda Şekil 37'de gösterilmiştir. Geliştiricinin parçanın her yerine ulaşmasına özen gösterildi. Son olarak parçaya püskürtülen geliştirici çatlaklar nüfuz etmiş penetrant sıvısını yüzeye çıkmasını sağlayarak parçada bulunan çatlağı bize göstermiş oldu.

Sıvı penetrant testi yüzeyde olan ve yüzey ile bağlantısı kapanmamış hataların tespiti için kullanıldığından diğer muayene yöntemlerinden daha elverişsizdir. Derindeki hataları yâda yüzey ile bağlantısı kesilmiş kusurları tespit için kullanılamaz. Ancak en ucuz ve en kolay yöntem olması onun daha fazla kullanılmasını sağlıyor.

P355GH Çeliğinden Levhaya Ultrasonik Muayene Uygulaması

Tablo 3. P355GH çelik Kimyasal Analizi

Sınıf	C. %	Mn. %	S.	N	Cu	Nb	Ti.	Si.	P.	AL	Cr.	Mo.	Ni	Vi
P355 GH	0.10-0.22	0.10-1.70	0.015	0.012	0.30	0.020	0.03	0.60	0.025	0.020	0.30	0.08	0.30	0.02

Tablo 4. P355GH Çeliği Mekanik Özellikleri

Sınıf	Tür	Kalınlık (mm)	Akma Dayanımı MPa (min)	Kopma Dayanımı MPa	Uzama % (min)	Darbe Enerjisi (KVJ) (min)		
						-20°	0°	+20
P355GH	Standartlaştırılmış	≤16	355	510-650	20	27	34	40
		16>to≤40	345	510-650	20	27	34	40
		40>to≤60	335	460-580	20	27	34	40
		60>to≤100	315	490-630	20	27	34	40
		100>to≤150	295	480-630	20	27	34	40
		150>to≤250	280	470-630	20	27	34	40



Şekil 38. Temizlenmiş Muayene Edilecek Levha

Muayene edilecek levha başta her türlü pislik, kalıntı ve artıktan temizlenir. Yukarıda Şekil 38'de temizlenmiş levha gösterilmiştir.



Şekil 39. Jel Kaplanmış Levha ve Üzerinde Ultrasonik Prob

Temizlenmiş olan levhanın üzeri bir jel ile kaplanır. Jel kullanılmasının amacı oluşturulan ses dalgalarının sağlıklı şekilde parçaya iletilmesidir. Levha yüzeyine jel sürüldükten sonra belirli yönden ileri ve geri gidilerek levha taratılır. Üzerine prob yerleştirilir. Yukarıda Şekil 39'da gösterilmiştir.

Levhanın içerisinde eğer kusur var ise osiloskop ekranında bu kusurun yeri belirlenir. Osiloskop ekranında hatanın bulunduğu yer iki eksende belli olur. Aşağıda Şekil 40'te verilmiştir.



Şekil 40. Düz Prob ve Osiloskopla Tarama Yapılmayı Bekliyor

Tarama yapılırken önce düz başlık kullandık ardından 45°lik başlık kullandık. Hatanın bulunduğu yer sistemli olarak tespit edilir. Hatanın başladığı yer işaretlenir. Ardından hatanın boyutunu belirlemek için hata bölgesinde çeşitli doğrultularda taramalar yapılır. Bu taramalar Aşağıda Şekil 41'de gösterilmiştir.



Şekil 41. 450 açılı Prob ile Tarama Yapılırken

Osiloskop ekranında inip kalkan eğriler kusursuz bölgede birbirini bir örüntü gibi devam ederken; bir kusurla karşılaştıklarında daha kısa boylarda, daha uzun boylarda ya da daha kısa aralıklarla meydana gelirler. Ekrandaki bu düzensizlikler parçanın içerisindeki kusurları bildirirler.



Şekil 42. Osiloskopta Hatanın Görülmesi

Şekil 42'de osiloskop ekranında probdan 26.66mm ilerde ve 14.07 mm derinliğinde hata olduğunun gösterimi



Şekil 43. Osiloskopta Hatanın Görülmesi

Ultrasonik muayene malzemenin iç kısmındaki hataları da gösterdiği için diğer birçok yöntemden daha avantajlıdır. Phassed Array ve Radyografik Muayene yöntemleri de malzemenin iç kusurlarını gösterir ancak bu yöntemler hem daha pahalı hem de daha tehlikeli yöntemler olduğundan endüstride en çok kullanılan yöntem Radyografik yöntemdir.

P355GH Çeliğinden Levhaya Manyetik Partiküller Muayene Uygulaması

Tablo 5. P355GH Çelik Kimyasal Analizi

Sınıf	C. %	Mn. %	S.	N	Cu	Nb	Ti.	Si.	P.	AL	Cr.	Mo.	Ni	Vi
P355 GH	0.10-0.22	0.10-1.70	0.015	0.012	0.30	0.020	0.03	0.60	0.025	0.020	0.30	0.08	0.30	0.02

Tablo 6. P355GH Çeliği Mekanik Özellikleri

Sınıf	Tür	Kalınlık (mm)	Akma Dayanımı MPa (min)	Kopma Dayanımı MPa	Uzama % (min)	Darbe Enerjisi (KVJ) (min)		
						-20°	0°	+20
P355GH	Standartlaştırılmış	≤16	355	510-650	20	27	34	40
		16>to≤40	345	510-650	20	27	34	40
		40>to≤60	335	460-580	20	27	34	40
		60>to≤100	315	490-630	20	27	34	40
		100>to≤150	295	480-630	20	27	34	40
		150>to≤250	280	470-630	20	27	34	40



Şekil 44. Temizlenmiş Muayene Edilecek Levha

Levha yüzeyinde bulunan yağ, pas, kalıntı ve diğer pisliklerden temizlenir. Levha yeterince temizlenmezse manyetik partiküller levha ile etkileşime geçemez ve o pislik veya artık alanının altındaki kusur belirlenemez. Yukarıda Şekil 44'te temizlenmiş PQR levha gösterilmiştir.



Şekil 45. Levha Beyaz Boya Püskürtülmesi

Ardından temizlenen levhaya resimde görülen bir başlık ile akım gönderilir. Gönderilen bu akım levhada elektrik alanı oluşturur. Levhaya akım yollandıktan sonra levhanın yüzeyine özel beyaz boya püskürtülür. Beyaz boya püskürtülmesinin amacı siyah manyetik partiküllerin kümelendiği yerleri daha kolay fark etmektir. Şekil 45'te beyaz boya püskürtülmesi verilmiştir.

Levhaya beyaz boya püskürtüldükten sonra aynı şekilde siyah renkte olan demir tozu(manyetik partikül) püskürtülür. Bu püskürtme kontrol edilmek istenilen yüzeyin tamamına yapılır.



Şekil 46. Levhanın Beyaz Boya kontrolü

Manyetik partikül püskürtülen levha yetkili kişilerce incelenir ve manyetik partiküllerin toplandığı yerde bir kusur olduğu belirtilir. Bizim levhada herhangi bir manyetik partikül yığılması bulunmadı. Dolayısıyla levhamızda herhangi bir hata mevcut değildir. Aşağıda Şekil 47'de görülmektedir.



Şekil 47. Levhanın İncelenmesi Siyah Partikül Birkmesi Gözlemlenmemiştir

TARTIŞMA

Yapılan çalışmalardan görüleceği gibi hataları tespit ederken sıvı penetrant yönteminde sadece üst yüzeydeki hatalar görülebilmektedir. Bu nedenle matkap ucundaki çatlak görülebilmiştir. Manyetik partiküller muayene yöntemi ile yapılan kontrolde bir hataya rastlanmadı çünkü bu yöntem malzemelerin yüzeyinde yâda yüzeyine yakın yerlerdeki hataları tespit edebilme yeteneğine sahiptir. Ultrason ile yapılan muayene ise parçanın içinde bulunan hata osiloskop ekranından görülebilmiştir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Denediğimiz üç yöntemde hata tespitinde verimli kullanılabilen yöntemlerdir. İstenilen özelliklere göre kullanım yerleri önemlidir. Yüzeydeki bir çatlak için sıvı penetrant yöntemi yeterlidir ve birçok şartlarda kullanması kolaydır. Yüzey ve yüzeye yakın hata tespitinde manyetik toz ile kontrolünde yeterli olduğu gözlemlenmiştir. Her iki yöntem de malzemenin içerisinde bulunan hatalarda da yetersiz kalan yöntemlerdir. Daha içte olan hataları için ise ultrasonik muayene yöntemi tercih edilebilecek bir kontrol yöntemidir. Ancak ultrasonik muayene, radyografik muayene kadar kesin ve net sonuçlar sağlayamaz. Radyografik yöntemle muayene ve kontrol neticesinde elde kayıt kalmasında büyük avantajdır.

KAYNAKÇA

Marazani, T., Madyira, D. M., Akinlabi, E. T. (2017). Repair of Cracks in Metals: A Review. Procedia Manufacturing. Volume 8, 2017, Pages 673-679. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.086

Marazani, T., Madyira, D. M., Esther, T. A. (2017). Repair of Cracks in Metals: A Review, Procedia Manufacturing, Volume 8, 2017, Pages 673-679. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.086

Meyers M. A., Chawla K. K., (2009), Mechanical Behavior of Materials, Cambridge University Press 2009. 2nd Ed.,Section. 8.2.1. pages 468-469. e-book(EBL) : ISBN-13 978-0-511-45557-5

Ritchie, R.O. (1999). Mechanisms of fatigue-crack propagation in ductile and brittle solids, International Journal of Fracture, Vol 100, pages55–83, 1999. https://doi.org/10.1023/A:1018655917051

Robert J. Dexter, and Justin M. Ocel (2013) Manual for Repair and Retrofit of Fatigue Cracks in Steel Bridges, Technical Report, FHWA Publication No. FHWA-IF-13-020. http://www.fhwa.dot.gov/bridge/steel/pubs/hif13020/hif13020.pdf

Sapuan, S.M. (2001), A knowledge-based system for materials selection in mechanical engineering design, Materials and Design Vol-22, Issue-8, 2001, pp. 687-695. https://doi.org/10.1016/S0261-3069(00)00108-4

Şahin Y., Yalçinkaya S. , Mirzayev H. (2017)., "The effect of load on the tribological property of polyacetal and metallographic observation", Proceedings of the International Symposium of Mechanism and Machine Science, cilt.1, ss.167-174.

İNTERNET KAYNAKLARI

URL 1. http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzemesecim/Malzmem_SEciminin_Onemi.pdf Malzeme Seçiminin Önemi. E.T. 16.12.2020

URL 2. Woodford, Chris. Alloys , Explainthatstuff Last updated: October 12, 2020. https://www.explainthatstuff.com/alloys.html E.T. 16.12.2020

URL 3. A Guide to Carbon Steel Grades (Plus a Chart), McHone Industries, Inc. June 03, 2020 https://blog.mchoneind.com/blog/carbon-steel-grades-chart E.T. 16.12.2020

URL 4. Alloy Steel, https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/alloy-steel. E.T. 16.12.2020

URL 5. Cast Iron: Properties, Processing and Applications. Matmatch, materials. https://matmatch.com/learn/material/cast-iron E.T. 16.12.2020

URL 5. ÇELİK, Y.D.D.S., Demir Dışı Metaller Ders Notları 2010 https://www.google.com.tr/webhp?sourceid=chrome-instant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#q=demir+d%C4%B1%C5%9F%C4%B1+metaller+ders+notlar%C4%B1&* E.T. 16.12.2020

URL 6. Why ıs materıals testıng performed? Laboratory testing Inc. https://www.labtesting.com/why-is-materials-testing-performed/#.X9_H31UzbSE E.T. 16.12.2020

URL 7. Sirois, M. 4 Methods of Detecting Surface Defects in Carbon Steel, Eddyfi Technologies, Updated on: July 22, 2020. https://eddyfi.com/en/blog/4-methods-of-detecting-surface-defects-in-carbon-steel E.T. 16.12.2020

URL 8. Balya, F.N. Tahribatsız muayene yöntemleri (ultrasonik muayene). Slideplayer. Lisans, F.N.B.M.M.Y. http://slideplayer.biz.tr/slide/7494153/. E.T. 17.12.2020

URL 9. What is ultrasonic testing and how does it work? TWI Technical knowledge. https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/ultrasonic-testing E.T. 17.12.2020

URL 10.Tahribatsız Muayene, https://www.ktu.edu.tr/dosyalar/14_03_00_aca05.pdf E.T. 17.12.2020

URL 11. Non destructive testing- Radiographic Testing, Explore the world of piping http://www.wermac.org/others/ndt_rt.html E.T. 17.12.2020

URL 12. Radiographic Testing (RT), MME group, https://www.mme-group.com/non-destructive-testing/radiographic-testing/ E.T. 17.12.2020

URL 13. Crack detection: Eddie current crack detection https://www.balance-technology.com/crack-detection/ E.T. 17.12.2020

URL 14. Basınç Testi, Tahribatsız Muayene, MEGEP. http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Tahribats%C4%B1z%20Muayene.pdf E.T. 17.12.2020

URL 15. Non destructive testing- Pressure Testing, Explore the world of piping. http://www.wermac.org/others/ndt_pressure_testing.html#:~:text=by%20Pressure%20Testing%3F-,Pressure%20Testing%20is%20a%20non%2Ddestructive%20test%20performed%20to%20ensure,to%20its%20boundary(s). E.T. 17.12.2020

URL 16. Hiller, V. The 6 most important methods for crack testing in non-destructive material testing. Foerster. Y.T. 20.08.2020. https://blog.foerstergroup.com/en/component-testing/the-6-most-important-methods-for-crack-testing-in-non-destructive-material-testing E.T. 17.12.2020

URL 17. Öztürk, O., Zeyrek, M., Ertürk. İ. Kaynaklı çelik yapılarda tamir kaynağı ve prosedürü*. https://www.documents.dgs.ca.gov/pd/pestatus/po_files/62056.pdf

BÖLÜM 24
KOMPOZİT MALZEMELERDE YAYGIN KULLANILAN TAKVİYE ELEMANLARI VE ÖZELLİKLERİ

Prof. Dr. Yusuf ŞAHİN
Nişantaşı Universitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İstanbul, TÜRKİYE

Öz: Geleneksel mühendislik malzemelerinin belli ihtiyaçlara cevap veremez hale gelmesi nedeniyle 1950'li yıllardan beri kompozit malzemelerin üretimi ve mekanik özellikleri üzerine araştırma faaliyetleri devam etmektedir. Üstün mekanik ve fiziksel özellikler elde etmek için çok değişik takviye elemanları bulunmaktadır. Bu elemanların seçimi çok önemli çünkü kompozit sistemde; sağlamlık/rijitlik/aşınma direnci gibi yapısal özelliklerin yaklaşık %90'nın üzeri takviye elemanı tarafından sağlanmaktadır. Takviye elemanı olarak; öncelikle sürekli elyaflar, kısa elyaflar, kırpılmış lifler, parçacıklar, kılcal kristaller, dokuma kumaşlar ve tabakalar kullanılabilmektedir. Bu çalışmada; kompozit malzeme yapımında yayın olarak kullanılan seramik takviye elemanlarının bazı özellikleri, üretimi, yapısı, mekanik ve fiziksel özellikleri, özgül dayanım ve özgül modülün önemi üzerinde durulmuştur.

GİRİŞ

Kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak seramik elyaflar veya parçacıklar kullanılmakta olup, bunlar plastik ve metal esaslı malzemelerle elde edilemeyen yüksek özgül dayanımlı malzemelere olan talep nedeniyle son yıllarda yaygın olarak tercih edilmeğe başlanmıştır. Bir kaç yıl önce elyaf terimi tekstil malzemelerle sınırlandırılmıştı ve kompozitler için cam elyaf kullanılırdı. Bu gün özellikle, mühendislik kullanımı için çok değişik elyaflar bulunmaktadır. Organik sentetik elyaflardan çok farklı türde olan bu takviye elemanı seramiklerin başlıcaları; cam, karbon, bor, aluminyum oksit ve silisyum karbür olup değişik morfolojik şekilde olabilmektedir. Ancak kompozitlerde takviye elemanı olarak elyaf

veya kılcal kristalli formu kullanıldığı zaman optimum özellikleri elde edilebilmekte fakat bunlar ekonomik olarak diğer kısa/parçacık, whisker türlerinden daha pahalıdır. Kompozit malzemeler seçilen matris malzemelerine göre; metal, polimer ve seramik matriks kompozitler olarak guruplandırılabilir. Takviye elemanı olarak ise değişik seramik elyaflar kullanılmakta ve kompozit malzemeyi oluşturan temel bileşenlerden biri olup bunlar; parçaçıklı, kılcal kristalli, kısa ve uzun elyaflar dahil değişik morfolojik şekilde bulunmaktadır (Şahin, 2015). Bir kompozit malzemede takviye elemanın esas fonksiyonu; yükü taşıyarak matriksin rijitliği ve dayanımını artırmaktır. Burada parçacıklarla dayanımı artıran elyaflar ihmal edilecek ve ince elyaflar üzerinde durulacaktır. Yani, ASTM'ye göre elyaf uzunluğunun enine oranı en az 10/1 ve kesitin ≤ 0.05 mm^2'den küçük olduğunda elyaf olarak adlandırılmaktadır. Teorik olarak malzemelerde aranan özellikler; yüksek dayanım ve düşük yoğunluk, kovalent veya kovalent-iyonik bağların karışımına sahip yapı olmasıdır. Arzulanan ise cam, karbon, bor ve silisyum karbür ile aluminyum oksit, bor nitrür ve silisyum nitrür bileşikleri yarış halinde elyaf malzemelerdir. Bunların hepsi de düşük yoğunluklu ve gevrek, kütlesel formdaki gevreklikleri nedeniyle, çok güvenilir değildir. Fakat bunlar ince elyaflar halinde üretildiği zaman yüzeylerde daha az kusurlar oluşur ki pratikte elyaf boyunca daha yüksek dayanım ve modülün elde edildiğini göstermiştir. Metal tellere ek olarak silikat esaslı camlar ve hayli çekilmiş polimerler de elyaf takviye elemanı olarak kullanılmaktadır.

Mühendislikte kullanılan takviye elemanlarının pek çoğu elyaf şeklinde üretildiklerinden dayanım ve rijitlikleri katı haldeki konumlarından yaklaşık 30-50 kat daha dayanıklı ve 3 kat daha rijit olduklarından kütle halindeki gösterdikleri özelliklerinden daha üstün performans gösterirler (Şahin,2015; Hull, 1992). Örneğin, karbon elyaf kütle halindeki grafitten yaklaşık 50 kat daha fazla mukavemete sahip bulunmakta, ama bu özellik, bilhassa whiskerlerde daha belirgindir. Çapları, genellikle 5-20 μm olan elyafların, kompozitlerin mühendislik performansını etkileyen en önemli faktörler arasında olduğu bilinmektedir. Bunun dışında elyafların şekli, boyu, yönlendirilmeleri matriksin mekaniksel özellikleri ile yeterli elyaf/matriks ara yüzey bağına sahip olmaları da gerekmektedir. Takviye elemanı kompoziti oluşturan en önemli elemanlardan biri olup kompozit üzerine gelen yükün büyük bir kısmını taşımaktadır. Yükün elyaflara iletilebilmesi için fazlar arasında fiziksel ve kimyasal uyumun iyi olması, ara yüzey bağının güçlü olması gerekir. Takviye elamanı ile matriksin ısıl genleşme katsayıları arasındaki

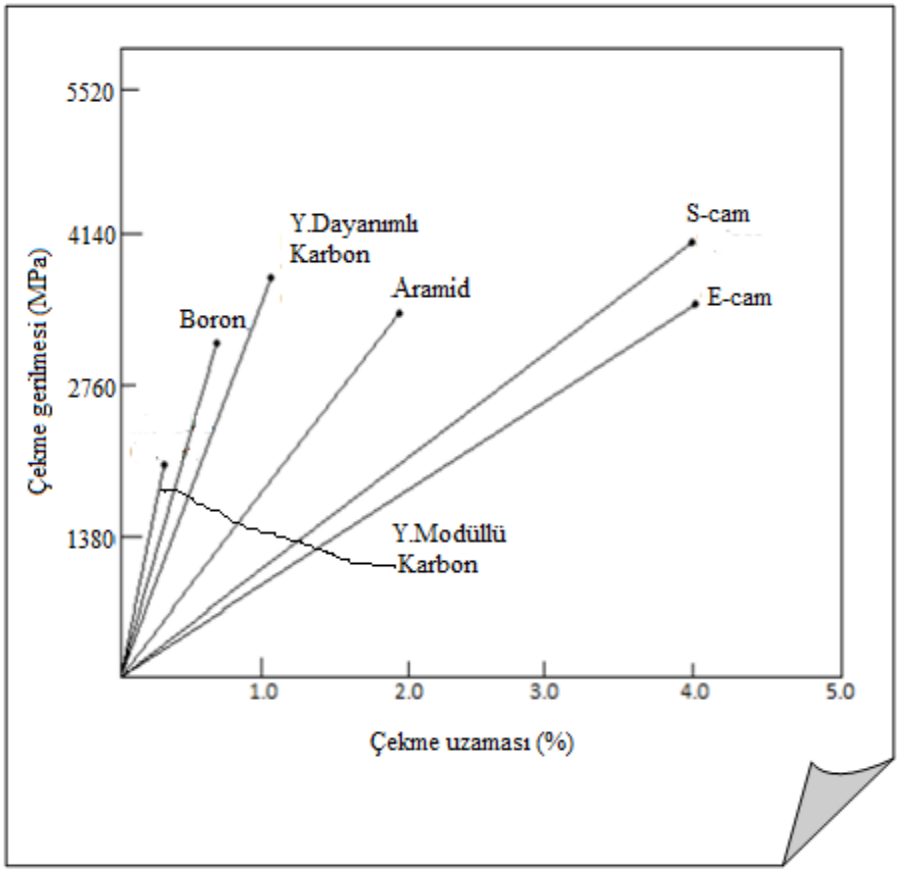
uyum, kalıcı yapısal gerilmelerin oluşması yönünden önemlidir. Kompozit üretilirken; takviye elemanı seçimi, üretim tekniği, üretim esnasında elyafların matriks tarafından ıslatılabilmesi, yönlendirilmeleri, elyaf içeriği kompozitin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirler. Bu nedenle takviye elemanı seçimi ve özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir. Elyaflardan aranan temel özellikler kısaca şöyle özetlenebilir:

- Yüksek elastik modülü,
- Yüksek dayanım,
- Düşük yoğunluk,
- Kimyasal uyumluluk,
- Üretim kolaylığı,
- Isıl direnç gibi kriteri.

Bununla beraber, metal ve seramik matriksli kompozitlerde elyafların yüksek sıcaklıklarda dayanımlarını muhafaza etmeleri, takviye elemanın kimyası, morfolojisi, mikro yapısı ve fiziksel özellikleri yanında maliyet gibi diğer önemli faktörlerin de dikkate alınması gerekmektedir. Mühendislikte yaygın olarak kullanılmakta olan malzemeler, genelde metaller, plastikler ve seramiklerden oluşur. Bunların birbirine göre zayıf ve üstün yanlarını tek bir malzemede görmek için kompozit (karma) malzemeler geliştirilmiştir. Kompozit malzemeler, normal olarak düşük elastik modül ve nisbeten düşük çekme dayanıma sahip matriks ile düşük özgül ağırlıkta, yüksek elastik modül ve yüksek dayanıma sahip olan elyaf veya parçacık formunda takviye elemanlarının birleştirilmesiyle oluşmaktadır (Şekil 1). Pratik uygulamalar için elbette sadece elyaf özellikleri değil keza kompozitlerin özellikleri de önemlidir. Bu bölümde; kompozit malzemeleri üretmek için takviye elemanı olarak yaygın kullanım alanı bulan bazı seramik elyaflar, bunların üretimi, yapısı, mekanik ve fiziksel özellikleri özetlenmiş ve özgül dayanım/modül kavramları üzerinde durulmuştur.

Şekil 1'de takviye elemanı olarak kullanılan bazı seramik elyafların çekme gerilmesi - uzama miktarlarının değişimi gösterilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi çok yüksek elastik modüle sahip olan karbon ve bor gibi elyafların uzama miktarları yaklaşık %1 veya daha az olarak ortaya çıkmıştır. S ve C-Cam elyaflar yaklaşık % 3-4'e kadar uzama miktarına sahip olabilmektedir. X ekseni çekme uzama miktarını,(%) gösterirken düşey sütün ise çekme gerilmesini (MPa) göstermek-

tedir. Fakat kompozit malzemelerde burada olduğu gibi aynı doğrusal ilişki, matriks malzemesinin doğrusal olmayan davranışı nedeniyle elde edilmeyebilir. Pratik olarak çekme dayanım değerlerini (MPa) karşılaştırdığımızda yüksek dayanımlı karbon cinsi, bor elyafın yaklaşık 4000 MPa, 3000 MPa'a ulaşırken Aramid fiberde ise bu değer yaklaşık 3100 MPa'den aşağı olmadığı görülmektedir.

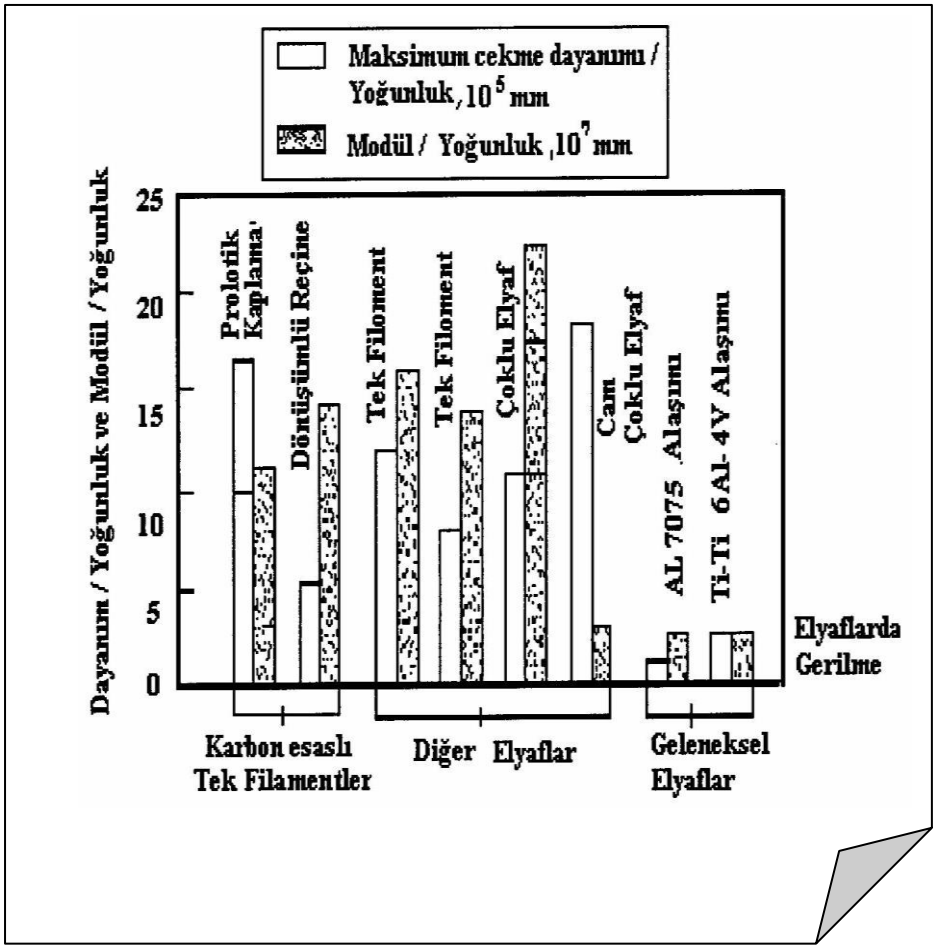


Şekil 1. Bazı Elyafların Tipik Çekme Gerilmesine Karşı Uzama Miktarlarının Değişimi

Özgül Dayanım/Özgül Modül

Uzay sanayi için çok önemli olan malzeme özelliklerinin, özgül dayanıma ve özgül modül değerlerinin yüksek olmasıdır. Özgül modül elastik modülü/yoğunluk oranı iken özgül dayanım da çekme dayanımı/yoğunluğa oranıdır. Tasarımcı, uygulanan yükün türü ve onun ağırlığının fonksiyonu olarak dayanım ve rijitliğini hesaplayarak kuvvet altındaki elemanın nasıl davranacağını tayin eder. Bu nedenle, çekme yüküne maruz kalan çubuklar için birim yoğunlukta rijitliğin doğru

tasarım kriterinin, E/ρ olduğu gösterilebilir. Bu durumda yapı malzemesi olarak aluminyumun seçiminin, çelik, titanyum, nikel ve tahta arasında karşılaştırmaya bakılacak olursa, Tablo 1'de gösterildiği gibi, farkın çok az olacağı açıktır. Fakat bunlar yerine karbon elyaf takviyeli kompozitlerin kullanılmasında hayli avantajlı olacağı görülmektedir çünkü tasarım kriteri E(1/3)/ρ olduğu için uniform basınç altında panelleri kullanmanın en iyi malzeme olacağı açıktır çünkü yaklaşık 5.4 kat (135/25=5.4) daha az kütle kullanılacak demektir. Mekanik avantaj bununla ölçülür çünkü belirli bir yük altında belirli bir uzama için en hafif çubuk, en yüksek E/ρ değerine sahip olandır. Kesit alanları aynı ise kompozit yapının, çeliğe göre kütlesi 1/3 kat daha azdır. Benzer şekilde bir kritik yüke maruz kalan bir çubuk/kolonda Eulor formülünü kullanın ($Pcr = II^2*E*I / L^2$). Burada malzemenin kütlesi hesaplanabilir. Ama esas olan belli bir rijitlik için en hafif çubuk ne olmalıdır? Elbette, hangi malzemede en yüksek $E^{1/2}/\rho$ değeri elde edilmişse cevap o olacaktır. Buna benzer, tahta gibi hücreli malzemelerin hem kuvvetli hem de hafif oluşu, bu gibi uygulamalarda, çok önemli özgül rijitliğe sahip olmasından dolayıdır (Şahin,2015). Makina tasarımında kesin olarak düşünülmesi gereken bir çok faktör yanında özgül modül, değişik türdeki malzemelerin karşılaştırılmasına müsade ettiğinden tasarımcı için çok faydalıdır. Elbette malzemenin üretim maliyeti de dikkate alınması gereken diğer bir etkendir. Örneğin, büyük yapılar için beton ve çeliğin yerine karbon elyaf takviyeli kompozitlerin kullanılmasında maliyet dikkate alınmayacaktır. Fakat tenis raketleri ve uçak kanadı dış yüzeyleri/çerçevesi yanında diğer kritik parçalar gibi karmaşık ürünlerde karbon elyaf takviyeli kompozitler metallerin yanında yer almış olabilir. İlginç olan sorun, yoğunluğun nasıl azaltılacağı, yapısal malzemelerde yine çok yüksek dayanım elde etmek için mümkün olan en yüksek özgül dayanımı sağlamaktır. Bunun da uygun sentetik ve doğal fiber malzemelerden (flax,jute,hemp,kenaf, banana ve basalt) veya hücreli yapı (petekli yapı), tahta ve kemik gibi malzemeleri seçerek görebileceğiz. Hücreli malzemelerin çok yüksek özgül modülü ve dayanımlara sahip olmaları, bunların muhtemelen ağırlığı azaltarak enerji maliyetini düşürme ihtiyacı olan yerlerde, özellikle, ulaşım endüstrisinde bir çok uygulama alanları bulabilecektir yakın gelecekte. Bazı genel mühendislik malzemeleri ile elyafların özgül dayanım ve spesifik modül özellikleri Şekil 2'de gösterilmiştir (Şahin,2015).



Şekil 2. Yapısal Malzemeler İçin Özgül Dayanım ve Özgül Rijitlik Değerleri

Bu şekilde, bütün geleneksel metallerin özelliklerinin birbirine çok yakın olduğunu gösterirken kompozit malzemelerde ise çok geniş aralığa sahip olduğunu göstermektedir. Bu da seçilecek bir uygulama için optimum özelliklerin elde edilmesini sağlayacaktır. Özgül ağırlık ihmal edilirse böyle bir karşılaştırma karbon fiber takviyeli plastik kompozitleri (KFTP) yüksek dayanımlı çeliğe yaklaştıracaktır. Ancak uzay malzemeleri ağırlığa karşı çok hassas olduğundan dolayı son yıllarda kompozit malzemelerde bu alanda çok fazla olarak tercih edilmektedir.

TAKVİYE ELEMANI TÜRLERİ

Bir malzemenin yoğunluğu, onu meydana getiren atomların, atomik ağırlıklarını takip etme eğiliminde olduğu için bunun da H, B, C, N, Si, Al gibi hafif atomların araştırılmasına odaklanmayı gerektirmektedir. İkinci olarak, dayanım

ve rijitliğin esası, atomlar arasındaki bağ'da yatar. Maksimum özellikler, bağların sadece uygulanan yük doğrultusunda uygulandığı zaman elde edilir. Bütün bağlar uniform şekilde yüke maruz kaldığında birlikte kırılır. Atom yapısı ile ilgili olarak 4 temel bağ türü mevcuttur. Bunlar da; iyonik bağ, kovalent bağ, metalik bağ, hidrojen ve Van der Waals bağdır. Birbirine göre enerjileri sırasıyla 2-10, 1-5, 03-05, 01 olarak azalırlar. En dayanımlı ve en rijit elyaflar, temel gerilme doğrultularında düzenlenmiş olan iyonik veya kovalent bağları ile olacağı açıktır. Moleküler yapı tek boyutlu lineer (1 B), rastgele düzlemsel (2 B) veya izotropik (3 B) olabilir. Örneğin, polietilen, naylon, aramid gibi organik polimerler tek boyutlu (1 B), karbon elyaflar (2 B) grafit yapısı ve SiC, SiO_2 gibi camlarda (3 B)'dur.

Elyaf üretim işlemi 3 guruba ayrılabilir. Bunlar;

- Ergiterek liflendirme,
- Katı hal dönüşümü,
- Kimyasal buhar biriktirme usülu'dur.

Katı hal deformasyonu; karbon, silisyum karbür, alumina silisli camlar ve zirkonyum elyaflar için hem sürekli hem de kırpılmış olarak elde edilebilir. Bu işlemde, ergitilebilen veya çözünebilen precursör fiberleştirildikten sonra yüksek sıcaklıkta ısıtma çevriminden önce çapraz bağ oluşturularak elde edilir. Kimyasal buhar birikimi yolu ile tungsten veya karbon çekirdek üzerine kaplama yapılarak silisyum karbür ya whisker veya tek filamentli olarak üretilirken bor elyaflar ise sadece tek filamentli olarak üretilir. Bu teknikle ince bir katman oluşturmak nisbeten kolay bir işlemdir. Son zamanlarda takviye elemanı olarak kullanılan seramiklerin başlıcaları; cam, karbon, bor, alüminyum oksit ve silisyum karbüre ilaveten basalt ve aramid sayılabilir. Bu seramik elyafların tipik bazı mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir (Şahin,2015).

Kompozit malzemelerde kullanilan baslica takviye elemanı türleri; ·

- Cam (E-camı,S-camı, C-camı,R-camı-AR camı),
- Karbon (Graphite) elyafi, (PAN - polyacrylonitrile- ve zift kökenli),
- Aramid (Aromatic Polyamid) elyafi, (Ticari ismi; Kevlar-DuPont)
- Bor elyaf,
- Oksitli elyaf,
- SiC elyafı.

Tablo 1. Kompozitlerde Kullanılan Bazı Seramik Elyafların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

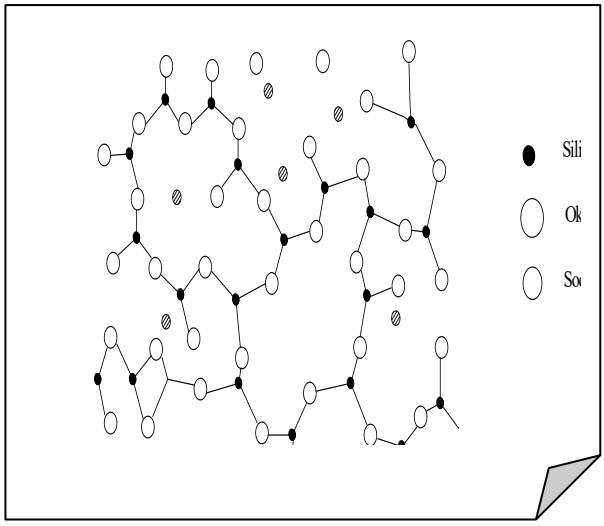
Malzeme Cinsi	Yoğunluk (kg/m^3)	Elyaf çapı (µm)	Elastik modülü (GPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Özgül elastik modülü ($GPa-m^3/kg$)	Özgül çekme dayanımı ($MPa-m^3/kg$)
E-camı	2500	12	70	1500-2000	0.0280	0.700
S-camı	2600	10	90	4600	0.0346	1.7692
Karbon (PAN)	1800	7-10	400	2000-2800	0.2222	1.3333
Karbon (YD)	1700	7-10	200	3000-3500	0.1176	1.9117
Karbon (Mesafaz)	1900	7-10	220	3200	0.1157	1.6842
Basalt	2700	10-17	89	2800-4800	0.032	1.037-1.777
Bor	2600	140-160	400	3400	0.1538	1.3076
Al_2O_3 (FP)	3950	20	380	1400-2100	0.0962	0.4050
Al_2O_3	3300	3.0	300	2000	0.0909	0.6060
Al_2O_3/SiC	3100	10	206	1700	0.0664	0.5483
Silisy. Karbür	3200	1-50	480	7000	0.1500	2.1875
SiC (Nicalon)	2250	12	200	2500	0.0888	1.1111
Aramid fiber	1400	12	124	1379	0.08857	0.985

Kevlar-29	1400	12	62	3100	0.04428	2.2142
Kevlar-49	1400	12	131	3620	0.09357	2.5857
Alumin-yum	2700	-	69	276	0.02555	0.102
Çelik	7800	-	207	648	0.02653	0.083
Cam-epoksi kompozit (Tek yönlü takviyeli)	1800	10	38.60	1062	0.02144	0.590
Grafit-epoksi kompozit (Tek yönlü)	1600	7-10	181	1500	0.1131	0.937

Yapısal, üretim metotları ve özellikleri bakımından bu elyafları sırasıyla biraz daha ayrıntılı inceleyelim.

Cam

Cam elyafın esasını; silis-kum (SiO_2) meydana getirmekle beraber belirli oranlarda sodyum, kalsiyum, aliminyum, bor ve demir gibi elementlerin oksitlerinden oluşur. Polimer esaslı kompozitlerde yaygın olarak kullanılan ve en ucuz olan takviye elemanıdır. Silis atomları üç boyutlu rastgele bağlanmış polihedra/çokyüzlü ağını oluşturmak için oksijen atomlarına kovalent bağla bağlanır. Değişik valansın katyonları oksijen atomlarına bazıları ile iyoniksel olarak bağlanır. Bu nedenle, dengeyi daha küçük birimlere ayırır. Şekil 3'de sodyum silikat camın yapısı iki boyutlu olarak gösterilmiştir. Farklı kimyasal bileşimlerinden oluşan daha çok uygulanan cam elyafların tipleri ve özellikleri aşağıda Tablo 2'de gösterilmiştir.



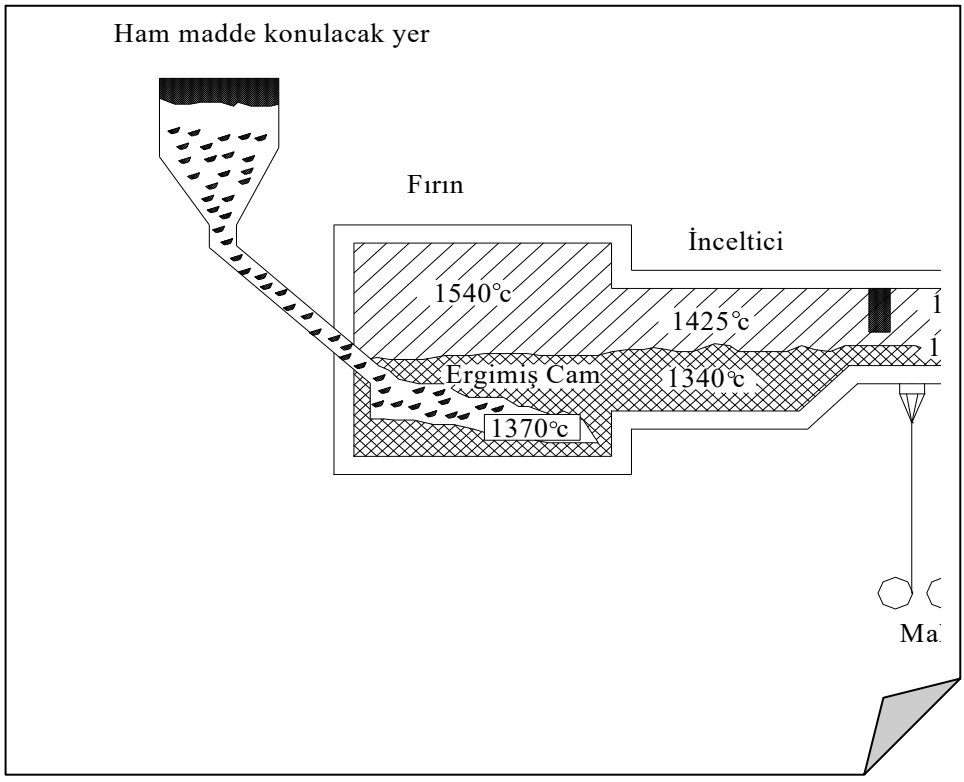
Şekil 3. Sodyum Silikat Camı Yapısının İki Boyutlu Gösterilmesi

Tablo 2. Cam Türleri ve Özellikleri

Malzeme cinsi	Formülü	E-camı	S-camı	C-camı
Kum	$Si0_2$	52.4	64.4	64.6
Al ve demir oksit	$Al_20_3.Fe_20_3$	14.4	25	4.1
Kalsiyum oksit	Ca0	17.2	--	14.3	--
Magnezyum oksit	Mg0	4.6	10.3	3.3
Sodyum ve				
Potasyum oksit	$Na_20.K_20$	0.8	0.3	9.6
Baryum iki oksit	B_20_3	10.6	--	4.7
Baryum oksit	Ba0	--	--	0.9

Plastik esaslı kompozitlerde kullanılan genellikle, E-Camı alkali olmayan bor silikat olup iyi elektrik yalıtım özellikleri için geliştirilirken,1976'dan beri Şişe Cam A.Ş. tarafından üretilmektedir. S-camı daha pahalı fakat daha yüksek modüle sahip magnezyum ve aluminyum silikat 'da ihtiva eder. C-camı ise oldukça iyi korozyon direncine sahip, kimyasal özellikleri iyi olduğu için depolama tanklarının yapımında ancak mekanik özellikleri düşüktür. Camların dayanımı, özellikle, yüzey üzerinde kusurlara ve mikro-çatlaklara bağlıdır. Yüksek kaliteli elyafları üretmek için yüksek saflıktaki malzemelerin homojen şekilde ergimiş olması,

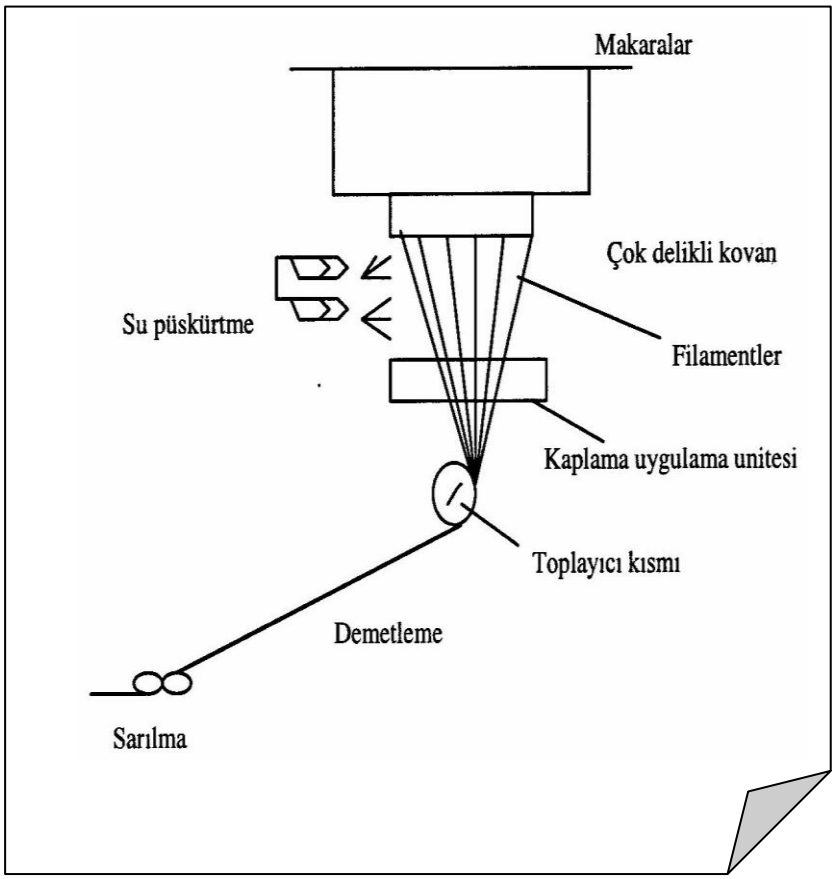
yüksek sıcaklıkta çekilmesi ve hemen koruyucu kaplama uygulanmış olması gerekmektedir. Cam elyaflar, camı oluşturan bileşenlerin elektrik fırınında yaklaşık 1200-1500 ^{o}C de ergitilmesi ve ergiyen camların bir platin alaşımlı olan potanın tabanındaki binlerce delikten hızlı şekilde aşağı doğru çekilerek ve soğutma bölgesinden geçirilir (Şekil 4). Sonra işleme uygun olarak yerleştirilmiş bir sarma sitemi ile lifler yüksek hızlarda çekilerek 5-20 mikron kalınlığında lifler elde edilir. Daha sonra kaplama uygulanması ve demetler halinde makaralara sarılarak yaklaşık 3 kg'lık halinde depolara gönderilir. Kaplama işlemi bu elyafları hasardan korur çünkü kaplama maddesi, genellikle Silane ihtiva eder (Deak,Czigancy,2009).



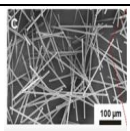
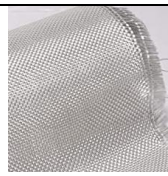
Şekil 4. Cam Elyafın Üretimi İçin Ergitme İşlemi

Bu elyaflar karbon kadar hafif ve rijit olmamasına rağmen oldukça ucuzdur. Bu elyafların ergitilmesi için fırın dahil diğer aşamalar Şekil 4' de gösterilirken üretim sonrası aşamalar ise Şekil 5'de gösterilmiştir. Şekil 6'da ise değişik formatta üretilmiş olan cam elyafların türleri gösterilmiştir. Bunların başlıcaları sırasıyla; (a) rastgele yönlendirilmiş kırpılmış elyaf fiber, (b) choped/parçalanmış ve büyük parçacıklardan oluşan elyaflar, (c) tek uçlu surekli elyaf, ve (d) dokuma

türü cam elyaf olmak üzeredir. Her birinin farklı özellliği bulunmaktadır, ona göre seçim yapılmalıdır. Örneğin, şayet çekme dayanımını artırmak mı istiyorsunuz? Korozyon direncini mi artırmak istiyorsunuz? Ya da aşınma direncini mi iyileştirme istiyorsunuz? Hedefiniz ne ise ona ona uygun takviye elemanı seçimi yapılmalıdır. Aksi halde doğru seçim/ karar verilmeyebilir ve deneysel elde edilen sonuçlarda istenilen beklentiler sağlanamayabilir.



Şekil 5. Cam Elyafın Üretim Sonrası Aşamaları

			
a) Kısa elyaf takviyeli – rastgele yönlendirilmiş cam elyaflar	b) Büyük (6mm/12mm) parçacık boyutlu cam	c) Tek uçlu sürekli elyaf bandı	d) Dokunmuş/kumaş cam elyaf

Şekil 6. Değişik Formatta Üretilmiş Olan Cam Elyaflar. (A) Rastgele Yönlendirilmiş Kırpılmış Fiber, (B) Büyük Parçacıklı Elyaf, (C) Tek Uçlu Surekli Elyaf, (D) Dokuma Türü Cam Elyaf

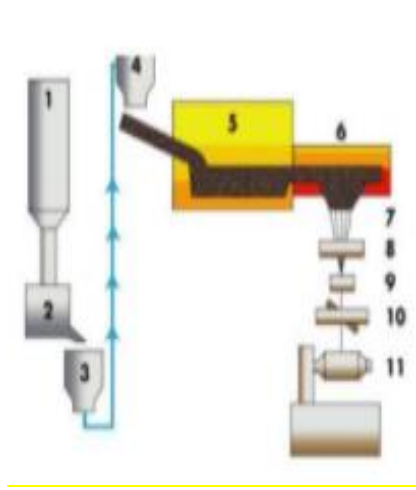
Basalt fiber

Basalt fiber; yapısal kompozitler ve elyaf takviyeli plastik kompozitler için oldukça yenidir. Cam elyaf ile benzer bileşime sahip olmasına rağmen daha yüksek dayanım özellikleri gösterir. Çoğu cam fiberler gibi davranmıyor alkali metal, asidik ve bazik ortamlara karşı direnci daha iyi olduğundan köprü, beton ve sahilde kullanım alanı uygulamalar için daha çekici olmaktadır. Ayrıca karbon ve aramid elyafla karşılaştırıldığında daha geniş sıcaklıkta kullanım alanı sağlamaktadır (-269 ^{o}C'den 650 ^{o}C'e kadar). Bu yüzden de; oksidasyon direnci, radyasyon direnci, basma dayanımı ve kayma dayanımı daha yüksektir. Once ABD ve Sovyetler Birliğinde basalt üretim işlemi başlatılmış, bazalt elyafları ekstrüzyon yöntemi ile havacılık, uzay ve askeri alanlarda kullanmışlardır.

Bazalt, donmuş lav olan volkanik kayaçlardan elde edilen koyu altın renginde veya siyah renkte, tok ve dayanaklı olan bir malzemedir. Sürekli elyaflar, kırılmış bazalt kayaçların 1350 ^{o}-1700°C sıcaklıkları arasında platin/rodyum ateşe dayanımlı potalarda ergitilerek, alt haznede bulunan yüzlerce meme deliklerinden akıtılıp iplik haline getirilerek üretimi sağlanmaktadır (Şekil 7). Sonra bu iplik haline getirilmiş olan elyaflar tamburlara sarılarak depolara gönderilmektedir. Elbette bazalt elyaflar da hızlı soğutulma ve kaplama işleminden geçirilmektedir. Bazalt elyafların üretiminden daha iyi sonuçlar elde edilmektedir çünkü cam elyafların üretiminde kullanılan ilave katkı maddeleri içermemesi, fazladan ek maliyet getirmemesini ve çevre atığının az olmasını sağlamaktadır. Bu nedenledir ki üretim maliyetleri açısından bakıldığında, karbon ve cam elyaflara göre avantajlı olurken %100 doğal, çevreci ve ekolojik güvenlikte sunmaktadır (Sfarra ve ark., 2013).

E-Camın bileşiminde genellikle; SiO2, Al2O3, CaO ve B2O3 vardır. Bazalt elyaflarda ise SiO2, AlO3,CaO, Fe2O3,K2O,MgO, Na2O ve TiO2 içerikleri mevcuttur. Örneğin, bazalt elyafların renklerinin koyu olmasının nedeni içerdiği Fe ve miktarından kaynaklanmaktadır (Deak ve Cizigany, 2009). Bazalt elyafların ısıl dirençlerinin çok yüksek olması nedeni ile ısı yalıtım malzemesi ve yangın yalıtım malzemesi olarak kullanılabildiği gibi gürültü izolasyonunda da iyi performanslar sergilemektedir. Yine elektrik yalıtımında kullanılabilir olması sayesinde yer altı döşemelerinde kullanılabilmesi diğer elyaflara göre avantajını ortaya çıkarmaktadır.

Basalt fiberin çekilme diyagramı:
1.Hammaddeyi oluşturan taşların ezilmesi, Siloya yerleştirilmesi,
2. Parçaların/işin yüklenmesi,
3. Taşıma işlemi/sistemi,
4. Demet boşaltma istasyonu,
5. İlk ergitme bölgesi,
6. İkinci kontrollü ısıtma bölgesi,
7. Filament/tel oluşturma aşaması,
8. Kaplama uygulanması,
9. Strand/fiber demeti oluşumu,
10. Fiber olarak gerginleşmesi,
11. Sarma işleminin gerçekleşmesi.



a) Basalt fiberin çekim işlem sırası. b) Yapılacak işlerin uygulanması/fırın ve diğer kısımları.

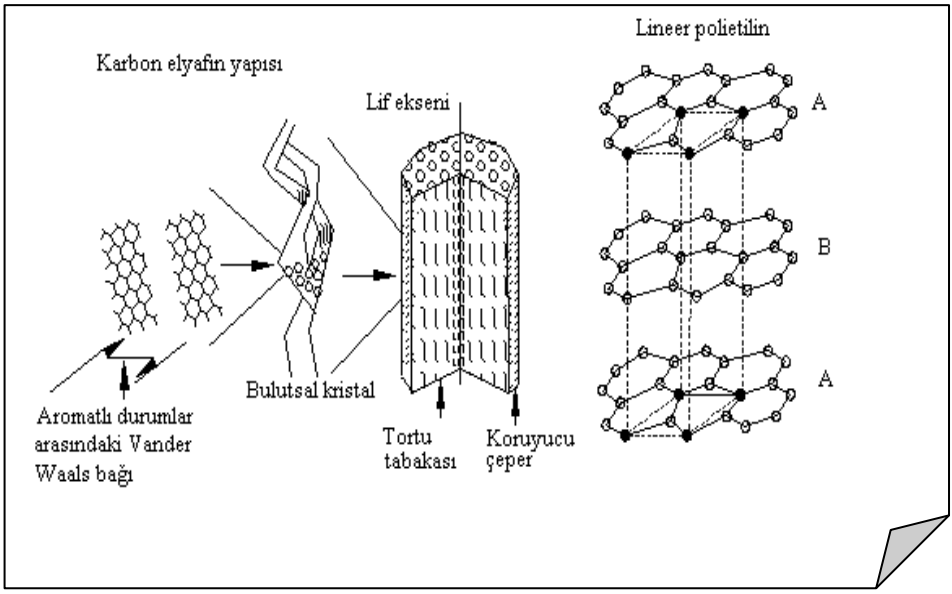
Şekil 7. Basalt Fiber Üretim Ünitesi ve Aşamaları (A) Çekim İşlem Sırası, (B) İşlemin Uygulanması

Bazalt kayaçları sadece elyaf olarak sanayide kullanılmamakta, toz olarak otomotiv sanayisinde balatalarda kullanılmaya başlanmıştır. Balatalarda kullanılan zehirli ve insan sağlığına zararlı olan asbesto'nun yerini, aşınma direncinin yüksek olması nedeni ile almaktadır. Ayrıca yalıtımda kullanılan asbesto'dan tam 3 kat daha iyi ısı yalıtımı sağladığı rapor edilmiştir (Colombo ve ark., 2012). Ayrıca unutulmamalıdır ki, bazalt elyaflar polimer matrikslerle iyi bir ara yüzey bağı oluşturarak elyaf /matriks arasında iyi yapışma kuvveti sağlamaktadır. Şekil 7'de ol
chopped, hortum üretmek amacıyla tasarlanmış olan silindirik içi boş elyaf örgü sarmalı, tek uçlu surekli fitil elyaf, ve nihayet dokuma türü basalt elyaf şeklinde olabilimektedir. Her birisi farklı bir amaç ile kullanılmalıdır. Örneğin, chopped

fiber, genellikle inşaat işlerinde, yol yapımı esnasında denegeyi sağlamakta tokluk özelliği nedeniyle çok fayda sağlarken diğer içi boş formatta olan elyaf türü ise söndürme aygıtlarında ve ateşe karşı koruyucu amaçlı cihaz ve ürün geliştirmek için daha çok seçilmelidir. Fiyat bakımından E camdan pahalı S cam'dan, aramid ve karbon fiberden daha ucuz, ancak dünyada üretim arttıkça fiyatı da düşmektedir. Koruyucu havlu, tüp şeklinde istenilen profilde üretimi mümkün olup motor ve genaratörlerde termal koruma sağlarken temel amaç; ısıya karşı direnci artırmak olduğu için basalt elyafların son yılllarda daha çok uygulandığı görülmektedir. Chopped şeklinde olan basalt lifler ise inşaat yapımında daha fazla kullanım alanı bulmaktadır çünkü yalıtım özelliği iyi olan bir elyaf türüdür. Keza bunlar köprü yapımında da daha çok tercih edilmektedir.

Karbon

Bu elyaflar, takviye elemanı olarak yüksek çekme dayanımı ve yüksek elastik modülüne sahip olan karbon elyaflar, turbostratik grafitin küçük kristallerinden oluşan karbonun allotropik formundan biridir. Grafit, karbon atomlarının hegzogonal düzlem katmanında ABABAB sırasıyla düzenli olarak dizilmesiyle oluşur. Tabakalar içinde atomlar arasında kuvvetli kovelant bağlar mevcut iken katmanlar arasında çok zayıf bağlar meydana gelir. Grafit düzlem tabakasında karbon atomlarının moleküler düzeni örümcek ağı oluşturması ile yağlayıcı özelliklere sahip olmakta olup Şekil 8'de altıgen grafit yapısı gösterilmiştir. Karbon elyaflarda elyaf eksenine normal yönlenmiş C-doğrultusu mevcut olup düzlem katmanı kötü olarak yığılmış ve pek çok kusurlarla katlanmış yanlış düzenlenmiş veya eksik karbon atomları ile mükemmel olmayan yapıya sahip olabilir. Bu nedenle, bu doğrultuda elastik modül değeri çok düşmektedir.

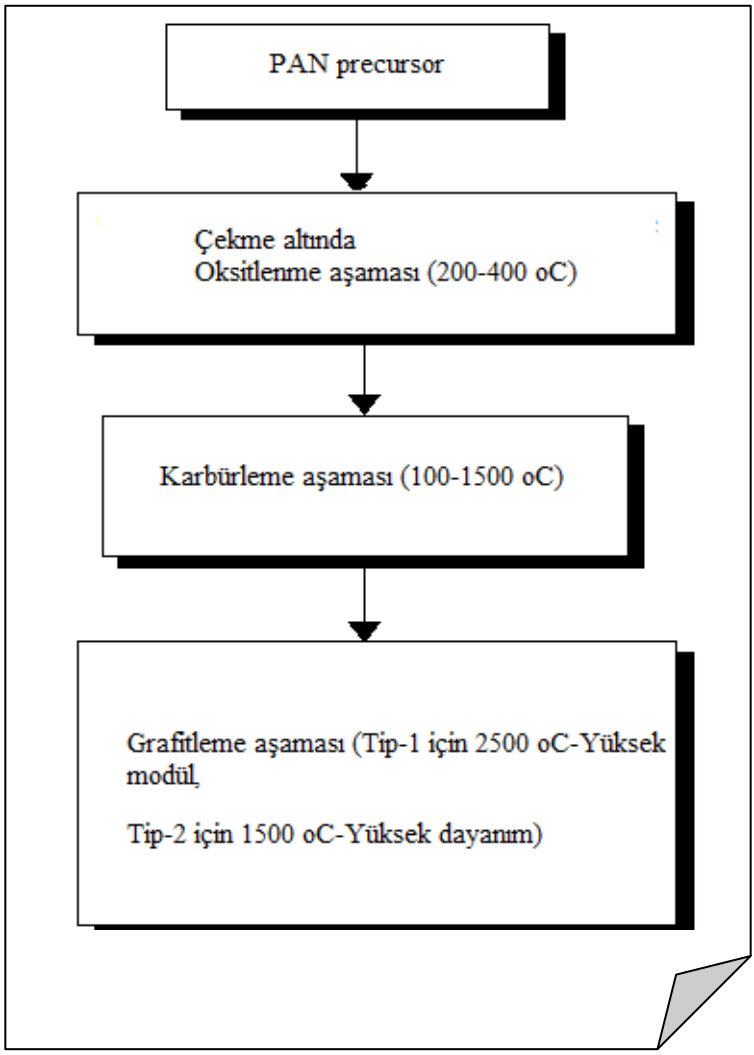


Şekil 8. Grafit Katman Düzleminde Karbon Atomlarının Düzenlenmesi

Karbon ve grafit elyaflar organik maddelerden üretildikleri için "organik fiber" olarak da adlandırılırlar. Grafit fiber, 1960'lı yıllardan beri ham madde olarak poli-akro-nitril (PAN), Selüloz (Rayon) ve Zift (Pitch) 'den üretilir. Çok yaygın olarak kullanılanı PAN olup mekanik özellikleri artırmak için 5-10 kez çekilmeye maruz tutulur ve daha sonra ise ısıl işlemden geçirilir. Günümüzde rayon sadece çok düşük modüllü elyaflar için kullanılır. Precursor polimer ya ıslak ip şeklinde liflendirme ya da ergimiş liflendirilmiş halde ekstrüzyon işlemi ile elyaf (fiber) şekline dönüşür. PAN esaslı karbon elyaflar, %93-95 arasında karbon içerirken üretim işleminin farklı oluşu nedeniyle grafitlerde %99'ın üzerindedir. Karbon ve Grafit aynı mıdır? sorusunun cevabı da verilmiş oldu. Ayrıca, karbon 1300 ^{o}C' de üretilirken grafit ise 2000 ^{o}C 'nin üzerinde üretilir. Karbon elyafın gerçek özellikleri, üretim metoduna bağlıdır. Endüstriyel olarak karbon elyaf üretim metotları; termal oksidasyon ve organik precursor kullanılarak grafitleme işlemleridir. Bu işlemler üç aşamada gerçekleşir. Bunlar:

- Havada oksitlenme sıcaklığı (200-400 ^{o}C),
- Soygaz atmosferi altında karbonlama aşaması (1000-1500 ^{o}C),
- Soygaz atmosferi altında grafitleme aşaması (2000-2500 ^{o}C).

olmak üzeredir. Daha yüksek elastik modülü veya kristalliği elde etmek için 2000 ^{o}C'nin üzerinde bazen 3000 ^{o}C' de son ısıl işlem uygulanır. PAN karbon esaslı elyafların fabrikasyonu şematik olarak Şekil 9'da gösterilmiştir. Rayon başlama ham-maddesi içinde benzer akış diyagramı çizilebilir fakat burada oksitlenme aşaması yaklaşık 200-400 ^{o}C sıcaklık altında yapılır.



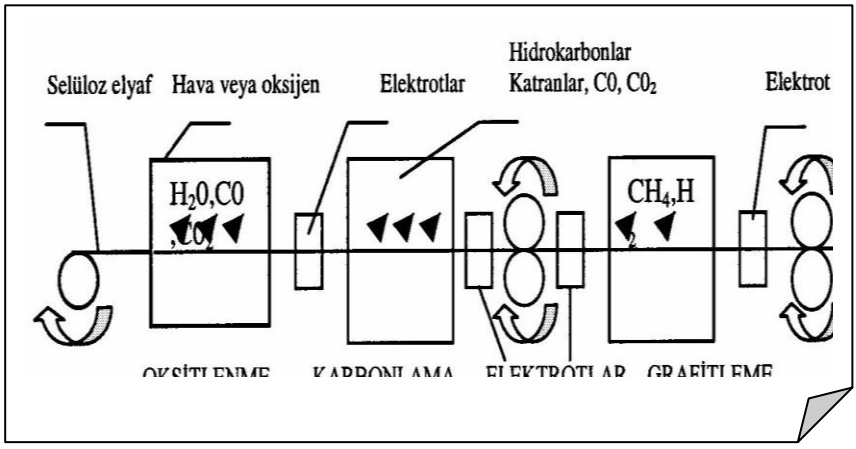
Şekil 9. PAN Esaslı Karbon Elyafın Üretimi

İlk basamakta elyaf oksijeni emerek kısalma önlenir ve polimer kararlı olarak çapraz bağ sağlanırken ikinci aşamada ise elyaf (azot, hidrojen, CO atomları) dışarı atılır, katranlar ve gazların dışarı çıkması ile kütlenin yarısı kaybolarak filament kristalleri karbonlaşır. Son aşamada ise kristalimsi bölge, 2000 ^{o}C de büyür

ve grafitleşir. Halkalarda yer alan nitrojen atomlarının uzaklaşarak halka yapısının daha fazla sıkılaştığı yapı demektir. Dolayısı ile elastik modülü;

- Son işlem sıcaklığı,
- Başlangıç ham maddesi türü,
- Kristalin mükemmelliği,
- Boyut etkisine, bağlıdır.

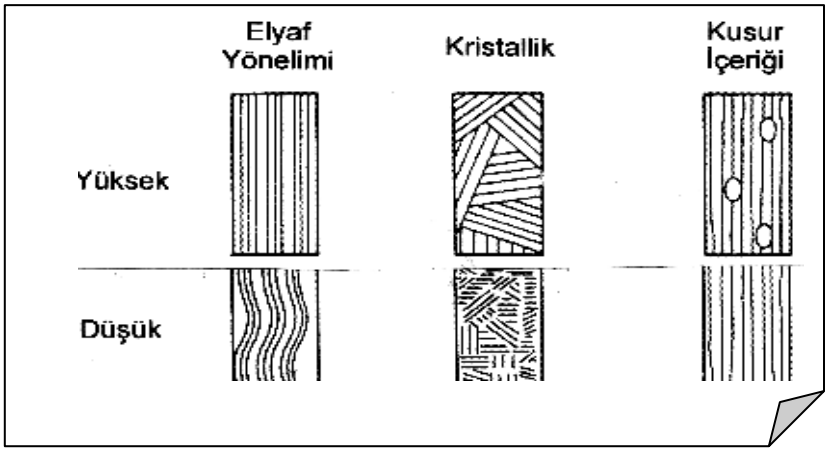
Genelde PAN ham-madenin daha basit termal çevrimi nedeniyle daha iyi özellikleri vermektedir. Selüloz ve Zift esaslı karbon elyafların işlem sırası Şekil 10' da verilmiştir. PAN işleminde karbonlama öncesi polimer zincirlerinin sıcak olarak çekilmesiyle oldukça yönlenmiş karbon halkalar sağlanırken Zift işleminde mesafazın doğal bir sonucu olarak yüksek derecede yönlenme gerçekleşebilmektedir.



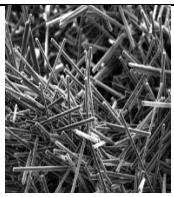
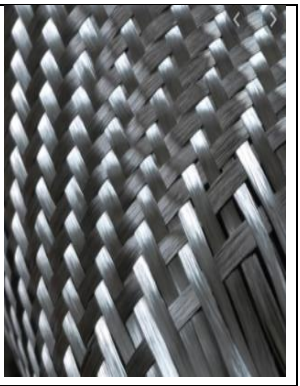
Şekil 10. Selüloz Aracılığı ile Karbon Elyafların İşlemleri

Karbon elyaflarda elyaf doğrultusu/yönelimi yüksek veya düşük olabilir. Katmanların elyaf eksenine paralel veya düz olup olmadığına göre değişir. Diğer önemli bir parametre de kristalliği'dir. Mükemmel kristal bölgelerin lineer boyutları büyükse yapının yüksek dereceli kristalliğe sahip olduğu söylenebilir. Bu gibi bölgeler mükemmel grafit kristaline benzer davranış sergileme eğilimindedir. Son olarak da özellikle elyaf dayanımına bağlı olarak kusur ihtiva etmesi çok önemli bir özelliktir. Şekilde görüldüğü gibi, grafit katmanları mükemmel grafit kristali tabakalı düzlem yönünde için elastik modülü 1020 GPa'dır. Tabakalar mükemmel değilse çapraz bağ mevcutsa bu değer 4.1 GPa 'a kadar düşebilmektedir (Şekil 11).

Zift ham maddesinden oluşan elyaflarda ergitme ve iplik veya lif şeklindeki malzemelerinin aşağı doğru akıtılmasıyla gerekli düzenleme sağlanır. Karbon elyaflar, ölçülen özelliklerinde hayli değişkenlik gösterirler. Örneğin, bir elyaf demetinin dayanımı 0.5 GPa 'dan 4.3 GPa'ya, elastik modülü de 270 GPa'dan 580 GPa arasında değişiklik gösterir. Keza ölçülmüş özellikler kullanılan ölçme uzunluğu ile değişmektedir. Küçük ölçme uzunlukları gözle görülebilir derecede daha iyi özellikler verir çünkü dayanım yüzeydeki kusurların azalması ile azalır. Daha uzun ölçme uzunluğu ise daha yüksek olasılıklı yüzey kusurunun mevcut olduğunu ve bundan dolayı da erken kırılmaya yol açtığını gösterir. Şekil 12'de değişik formatta üretilmiş olan karbon elyaflar gösterilmiştir. Bunlar sırasıyla; (a) rastgele yönlenmiş kesikli karbon elyaflar, (b) tek/çok uçlu sürekli fitil ve kırpılmış karbon elyaflar, (c) karbon reçine emdirilmiş tabaka ve son olarak (d) dokuma/keçe karbon elyaf olmak üzeredir.

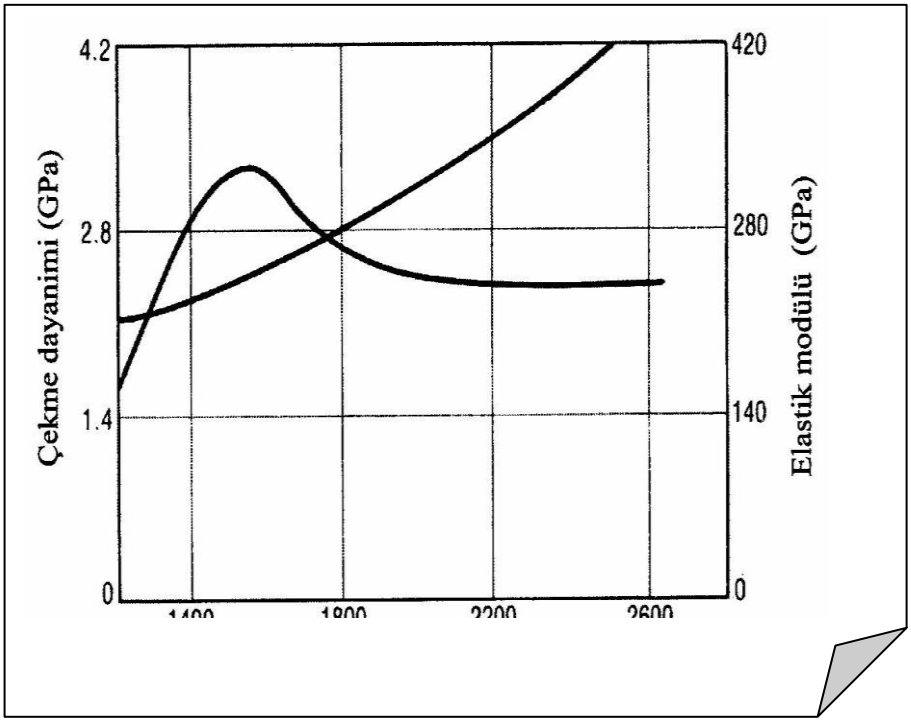


Şekil 11. Karbon Elyafların Temel Yapısal Özellikleri. (A) Elyaf Doğrultusu, (B) Kristalliği, (C) Kusur İçeriği

			
a) Rastgele yönlendirilmiş -kesikli karbon elyaflar	b) Çok uçlu sürekli fitil bobin ve kırpılmış takviye elemanı	c) Reçineye gömülmüş elyaf demeti (prepreg)	d) Dokunmuş/kumaş şeklinde elyaf

Şekil 12. Değişik Formatta Üretilmiş Olan Karbon Elyaflar. (A) Kesikli Elyaflar, (B) Çok/Tek Uçlu Sürekli Fitil Bobin Ve Kırpılmış Karbon Elyaf, (C) Karbon Reçine Emdirilmiş Tabaka, (D) Dokuma Veya Keçe Karbon Elyaf

Kompozit malzemelerde karbon ve grafit elyaflar, çeşitli şekilde, örneğin, sürekli lifler ve demetler, kırpılmış elyaflar, örgü ve dokunmuş elyaflar, öğütülmüş elyaflar olarak, kullanılmaktadır. Sürekli elyafların çapları, genellikle 8-10 μm ve iplik demeti şeklinde yaklaşık 12-120 000 sayıdan oluşabilmektedir. Örgü şeklindeki elyaflar kompleks şekilli parçaların kalıplanarak üretilmesine daha uygundurlar. Şekil 13' de tipik bir grafitleme çevirimi ve sıcaklığın çekme dayanımı ve çekme modülü üzerine etkisi gösterilmiştir. Ticari olarak PAN karbon elyafın iki tipi mevcut olup bunlar; yüksek elastik modüllü (Tip-1) yüksek dayanım (Tip-2)' olanıdır. En yüksek modül 2500-3000 ^{o}C 'de üretilir. Ancak, dayanım ince yapının elde edilmesi ile/ve çatlakların dağılımı ile ilgilidir. Organik matriksler ile en iyi yapışma sağlaması ve elyaf özelliklerini muhafaza etmesi için bir kaplama uygulanmalı veya bitmiş elyaf yüzeyi oksidasyon işlemine tabi tutulmalıdır. Ancak uçak frenlerinde olduğu gibi yüksek sıcaklıklarda 1000 ^{o}C'nin üzerinde karbon elyaflı karbon kompozitler dayanıklı olduklarından karbon elyafların kullanımı bu alanda hızla artmaktadır (Şahin,2015).



Şekil 13. Çekme Dayanımı ve Elastik Modülü Üzerine Sıcaklığın Etkisi

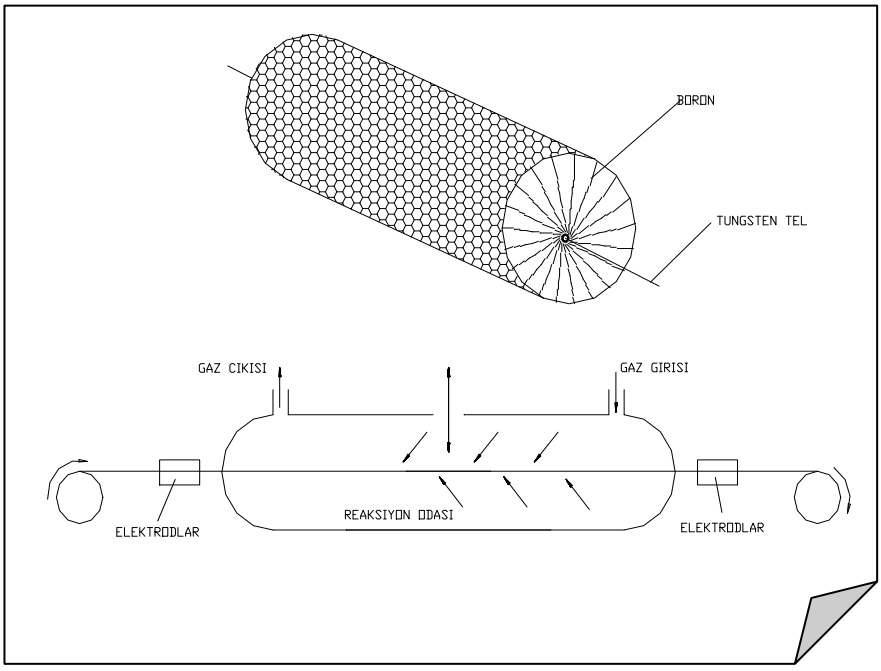
Bor

Boro n(bor) elyaf, oda sıcaklığında katı durumda olan hafif elementlerden biri olup çok gevrek olduğundan klasik tekniklerle üretmek mümkün değildir. Bu nedenle; bor, hidrojen ile bor triklorürün reaksiyonu ile elektriksel olarak yaklaşık 1300 ^{o}C'e sıcaklığa kadar, ısıtılmış tungsten (w) teli veya son zamanlarda karbon (c) üzerine çökeltilmesiyle elde edilir. Bor elyafın üretimi Şekil 14'de gösterilmiştir.

$$BCl_3 + 3\ H_2 \text{---------} 2\ B + 6\ HCL \qquad (2)$$

Kaplama yapılmadan önce hidrojenle ısıtılarak tungstenin dikkatlice temizlenmesi gerekir. Elyafın dayanımını azaltabilecek aşırı kristal büyümesini önlemek için sıcaklık dikkatlice kontrol edilmelidir. Tungsten tel yaklaşık 15 μm çapında iken, bu çökeltme istemiyle elyaf çapı 100-140-200 μm civarında gerçekleşir, özellikle yüksek basma kuvvetinin gerekli olduğu yerlerde faydalıdır. Bor'un yapısı 2-3 nm çaplı oldukça küçük kristallerden oluştuğu için genellikle şekilsiz olarak adlandırılırlar. Ancak elementin üç yapı değişimi mevcuttur. Sıcaklık 800-1100 ^{o}C'de hazırlandığında α-rombohedral sıcaklık 1250 ^{o}C'nin üzerinde ise ß-

rombohedral son olarak 1300 ^{o}C'de hidrojenle indirgenmesiyle tetragonal formları oluşur. Fakat sadece α ve tetragonal formları uygulanmaktadır. Bundan dolayı bu elyaflarda yüksek modül, dayanım ve ergime noktası elde edilmektedir. Bu elyaflar, genellikle, yüksek elastik modüllü ve çekme dayanımlı kompozit malzemelerin üretiminde tercih edilmektedir.

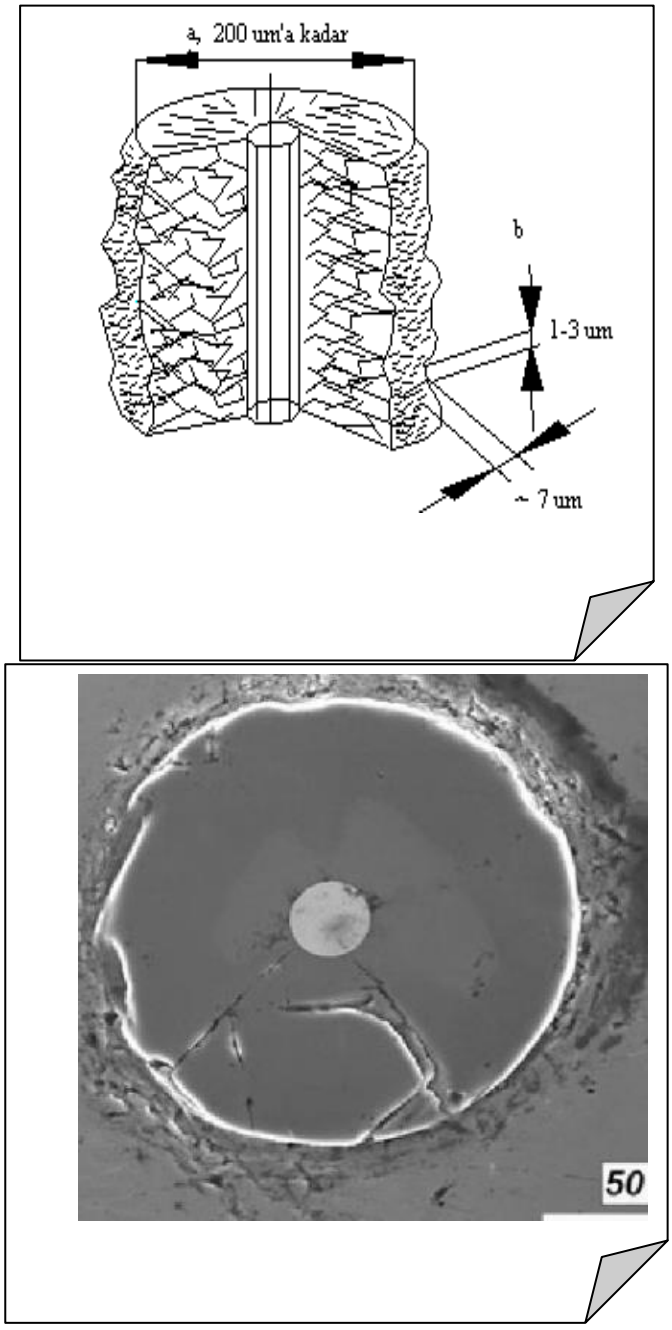


Şekil 14. Bor Elyafın Elde Edilişi

Yukarıdaki açıklanan avantajlarına rağmen bor elyaf içindeki tungsten tel nedeniyle yoğunluğu yüksek (19.3 gr/cm^3) için, son yıllarda tungsten çekirdek yerine karbon çekirdek kullanılmaktadır çünkü karbon çekirdek düşük yoğunluğa sahiptir (1.8 gr/cm^3). Fakat tungsten çekirdek bor ile reaksiyona girebilir, tungsten bor oluşturur ki çok kristalli bor ile kaplanır. Karbon çekirdek ise bor ile reaksiyona girmez. Özgül özellikleri normal olup izotropik olduğundan enine özellikler iyi, özellikle de basma dayanımı mükemmeldir (Trumper,1987). Başlıca avantajları/dezavantajları;

- Yüksek dayanım, rijitlik ve yüksek sıcaklık direnci (çekme, basma ve yüksek sıcaklıkta),
- Yüksek yoğunluk,
- Yüksek maliyet, şeklinde sıralanabilir.

Kompozit üretimi sırasında bor elyafların Al ve Ti gibi metallerle hızla reaksiyona girmesi, tungsten telle bor kaplama sırasında reaksiyon oluşması, difüzyonla tungsten boride dönüşmesi ve dolayısıyla bor'un dış yüzeyine yakın yerde eksenine dik şekilde basma oluşur ki bu mekanik davranışlara karşı daha hassas yapar. Bunu önlemek için bor üzerine kimyasal buharlaştırma metoduyla silisyum karbür (SiC) veya bor karbür (B_4C) kaplanır, kaplama kalınlığı yaklaşık 2.5 μm kadardır (Şekil 15). Elyaf 400 ^oC üzerinde oksitlenir ve 1000 ^oC'de bütün dayanımını kaybeder fakat SiC ile yüzey kaplanırsa veya bor karbür oluşturulursa bu sıcaklıkta dayanımın %50'ini muhafaza eder. Bundan dolayı bu elyaflar metalik matriksler için uygundur. Yüksek dayanımlı metallerle birleştirilmesi kolay olduğundan ilk bor takviyeli aluminyum esaslı MMK'ler, uzay mekiği dış yörüngesinde tüp şeklinde parçaların yapımı yanında turbo uçaklarda pervane yapımında yoğun olarak araştırılmıştır. Bunlar düz paralel filamentler şeklinde üretilir ve ince titanyum tellerle birlikte bağlanarak epoksiler arasında muhafaza edilir. Farklı formatta üretilmiş olan bor elyaflar mevcuttur, özellikle bor bileşik halinde çok kullanıldığı için sırasıyla Bor nitrür (BN) ve bor karbür (B2C4) tozları, reçine emdirilmiş bor tabakasına (prepreg) yanında tek uçlu/çok uçlu sürekli bor fitili ve dokuma türü bor fiberlerde üretilmektedir. Burada yer verilmemiş diğ oluper bölümde bunlara yer verilmiştir. Bu elyaflar pahalı olmasına rağmen uzay sanayinde kullanılır. Bunlar pazara girdiklerinden dolayı dayanımları da yükselmiştir. Fiyat konusu elbette tamamen daha çok tüketime bağlı bir olaydır.

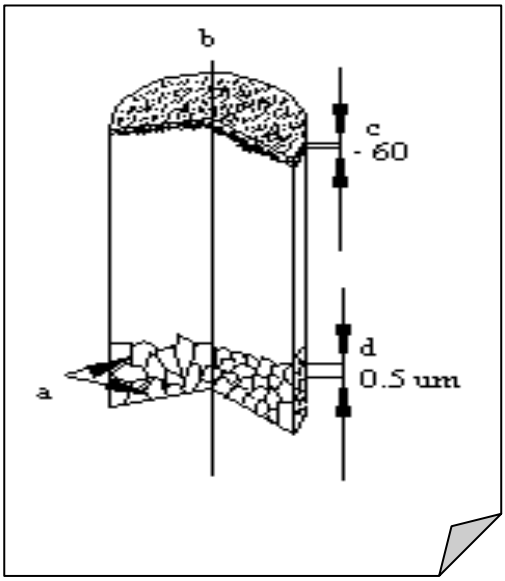


Şekil 15. Tungsten Çekirdek (15 µM) Üzerine Bor Elyaf (Elyaf Çapı 100-140-200 µM) (A), Bor Takviyeli Kompozitte Enine Kesit Görünümü (B).

Aluminyum Oksit

Alümina, korund minerali seklinde bulunur. Aluminyum oksit "alumina" elyaflar; prensip olarak metal matriksli kompozit malzemeler için kullanılır. Farklı allotropik yapılarına bağlı olarak iki tipi mevcuttur. Bunlar α-alumina olup Du Pont firması tarafından üretilen ve ticari ismi "FP" olan bu elyaflar ortalama 20 μm çapında sürekli olarak elde edilir. Yoğunluğu 3300 kg/m³ ve elastik modülü 380 GPa'dır (Tablo 1). Bu çok kristalli elyaflar, % 99 saf aluminyum oksit'den oluşur (Şahin,2015). Yaklaşık 900-1000 ^{o}C'e kadar dayanımını korur. FP elyaf ince 10 μm kalınlığında silis ile kaplanarak epoksi, polimid gibi polimer matriks kullanıldığı zaman dayanımı artırır. Fakat Al, Mg gibi metaller kullanıldığında silis kaplama maddesi kaybolarak metalle reaksiyona girebilmektedir. Diğer türü olan"Safimax" veya "Saffil'olarak bilinir, ticari ismi Imperyal Kimya Endüstrisi (ICI)'dir. Çok kristalli yapıya sahip olup temel faz ise δ-alumina olup "RF" ile temsil edilir. Bu elyaflar kesilmiş, kırpılmış formda üretilir. Tipik boy/çap oranı 100-200 arasındadır. Kompozit üretiminin çoğunda bu malzeme dolgu veya keçe preformu şeklinde bir bağlayıcı içine konulur. Uzun elyaflar da aynı firma tarafından geliştirme aşamasındadır. Bu elyaflar % 95 alumina ila birlikte % 5 silis'den oluşan çok kristalli malzeme olup ortalama tane boyutu 0.05 μm mikro kristalli formdadır. Bu silis; aluminyum alaşımları ile elyaflar arasında bağlama kabiliyetini iyileştirir ve ikinci faz tane büyümesini önler. Termal kararlılığı ise yaklaşık 1230 ^{o}C olup mükemmeldir (Taya, Arsenault,1988). Islanabilirliği iyileştirmek için etkili yolardan birisi de; elyaf üzerine kaplama uygulanması veya alaşımlı malzeme kullanmaktır. Alaşım elementleri, elyaf ve ergimiş metal arasında kimyasal reaksiyona uğrayabilir veya kimyasal bağ oluşturabilir. Saffil esaslı takviye elemanlarında; elyaf çapı 3 μm, ortalama uzunluk 500 μm ve yoğunluğu 3950 kg/m³'dür. Bu takviye elemanı metal matriksli kompozit malzemelerde daha sık kullanılmaktadır. Alumina elyaf için tipik kristal ölçüleri de Şekil 16'da gösterilmiştir. Ancak bunlar izotropik olup mükemmel basma ve çekme dayanımları yanında yüksek elastik modülüne sahiptirler. Bununla birlikte seramik olarak yüksek sıcaklık özelliğine sahip olduğu için sürekli alumina elyaflardan daha yüksek çekme dayanımına sahiptir. Bunlar yaklaşık hacimce % 30 elyaf içerikli kompozit oluşturmak için sıvı metalle infiltre edilir. Aluminyum oksitin son şekli ise whisker/kılcal kristal'dir. Yaklaşık 1650 ^{o}C sıcaklığa iki saat süreyle dayanabilmektedir. Vista kimyasal A.Ş. tarafından çapı 0.5 μm'den 30 μm'ye kadar boy/çap oranı 3-10 olan whisker üretilmiştir. Tabular alüminalar; tipik olarak

%99.5 'un üzerinde alümina içerirler. Na20 içeriği %2'den az olabilir. Şekil 17'de farklı formatta üretilmiş olan Al_2O_3 elyaflar gösterilmiş olup bunlar; (a) α-Aluminyum oksit, (b) beyaz Al_2O_3 tozları, (c) kahverengi/siyah Al_2O_3 tozlar ve (d) rastgele yönlendirilmiş elyaflar, formunda olabilmektedir.



Şekil 16. Aluminyum Oksit Elyaf İçin Tipik Kristal Ölçüleri, α-Alumina



a) α-Aluminyum oksit	b) Beyaz Al_2O_3 tozlar	c) Kahverengi/Siyah Al_2O_3'ler	d) Rastgele yönlendirilmiş kesikli elyaf takviye elemanları

Şekil 17. Değişik Formatta Üretilmiş Olan Al_2O_3 Elyaflar. (A) Beyaz Al_2O_3 Tozları, (B) Kahverengi/Siyah Al_2O_3 Tozlar, (C) Rastgele Yönlendirilmiş Kesikli Elyaflar, (D) Sürekli Al_2O_3 Zımparalama Kayışı

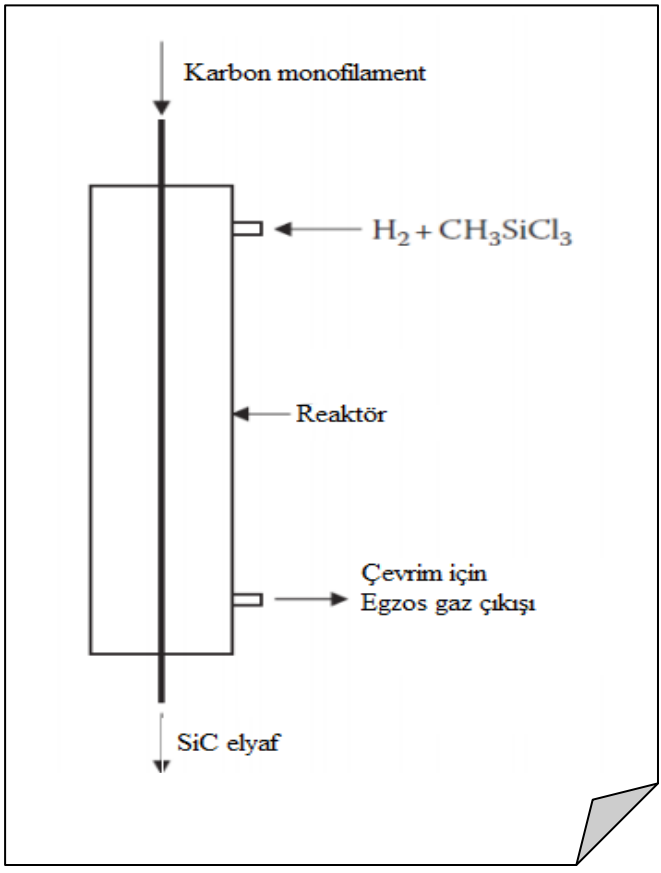
Silisyum Karbür

1960'lı yıllarda plastik ve metal matriksli kompozitler için takviye fazı olarak yüksek özgül dayanım ve elastik modülüne sahip malzemeler üzerinde oldukça yoğun çalışmalar yapılmıştır. Bunlar arasında bor, SiC ve bor karbür gibi malzemeler geniş olarak yer almış ve deneysel araştırmalar bor üzerine de odaklanılmıştır. "General Teknoloji Şirketi (GTŞ)" deneysel çalışmalarını 1966 yılında SiC filamentlerin ortalama çekme dayanımını 2756-3445 MPa kadar çıkarabilmiştir. 1966 yılından sonra da "Avco Şirketi" tungsten ana malzemesi üzerine SiC filamentleri daha ekonomik olarak yapmak için işlem geliştirmiştir. Bor elyaf ergimiş aluminyum metali ile hızla reaksiyona girmekte, 480 ^{o}C'den daha büyük sıcaklıklarda mekanik özelliklerini azaltmaktadır. Bu dezavantajlar SiC elyafın da geliştirilmesine yol açmıştır. Tungsten veya karbon ana malzemesi üzerine kaplanmış SiC kristalin ölçüsü bor'dan daha büyük olup β şekilli çok kristaldir. SiC'ün yüzey yapısı çok düzgündür. SiC karbon filamentlerin ekstra avantajı, maruz kaldıkları yüksek sıcaklık şartları altında bunların özellikleri ile ilgilidir. Çünkü karbon ana malzemesi kimyasal olarak soy gaz olduğu için SiC ile reaksiyona girmez. Dolayısı ile filamentin çekme dayanımı özellikleri yüksek sıcaklık şartları altında 1000 ^{o}C de çok daha uzun süre özelliğini muhafaza eder. Bu da, özellikle, metal matriksli kompozit malzemelerin uygulamaları için önemlidir. Bu elyafların; (a) oksidasyon direnci, (b) yüksek sıcaklıkta rijitlik ve (c) mukavemet özelliğini koruması ve ergimiş aluminyum içindeki etkisi bakımından bor elyaflardan daha iyidir. Bundan dolayıdır ki aluminyum esaslı kompozitlerin takviyelendirilmesinde bor elyaflar SiC ile kaplama yapılır. Diğer bir avantajı ise;

- Çekme dayanımı yanında ekonomik olması,
- SiC'ün çok sert olması,
- Yüksek ısı iletkenliğine sahip olması,
- Yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemete sahip olması.

1600 °C ye kadar mukavemetinde bir azalma olmaz. Malzeme bir yarı iletken olup aside karşı dayanıklıdır. Son yıllarda SiC'ün 2 türü üretilmektedir. Birisi 100-150 μm çapında SiC tek filamet olup çekirdek olarak karbon elyaf CVD metodu ile üretilir (Şekil 18). Bu SiC filament 140 μm çapında Avco sistemleri tarafından üretimi gerçekleştirilir. Diğer türü ise çekirdeksiz olup sürekli SiC çok filament şeklinde polikarbon silane'nin ergitilerek çekilmesi ile üretilir. Daha sonra ise ısıtılır. İlk önce son tip SiC elyaf yaklaşık 600 mm uzunluğunda elde edilmiştir. Son

zamanlarda 300-500 m uzunluğunda sürekli SiC fiber Nippon Carbon Co. Şirketi tarafından üretilmiş olup "Nicalon"olarak adlandırılır. Bu SiC elyaf yüksek sıcaklıklara kadar dayanımını korur ve metallerle iyi uyumluluk gösterir. Ergitilip çekildikten sonra elyaf 1200-1400 ^{o}C de ısıl-işleme tabi tutulur ve SiC elyafa dönüşür. Elde edilen SiC'ün çapı 13 μm iken yoğunluğu 2.55g/cm^3 ve ısıya dirençlidir. Bu elyafın çekme dayanımı, 2450 MPa ve elastik modülü,196 GPa 'a ulaşmaktadır. Whiskerlerin(kılcal kristal) elastik modülleri ve yüksek sıcaklık özellikleri çok iyi fakat pahalı olup metaller, oksitler, karbürler ve organik bileşiklerin whiskerleri'de üretilmektedir. Değişik şekil, biçim ve formatta üretilmiş olan SiC elyaflar/parçacıklar mevcut olup bunlar; SiC tozları ve parçacıkları, kesikli rastgele yönlendirilmiş SiC parçacıkları, sürekli tek veya çok uçlu iplik şeklinde elyaflar ve dokuma kumaş SiC'ler formunda olabilmektedir.



Şekil 18. Sic'ün Üretim Şeması

Bor ile SiC'ün karşılaştırılması

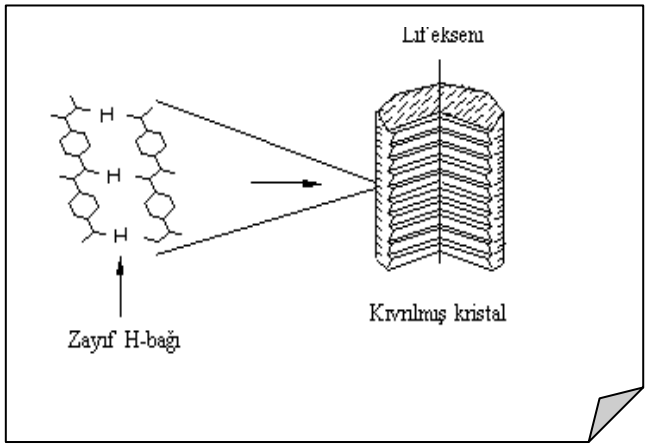
Takviye elemanı olarak son zamanlarda SiC'e ilgi öncelikle ekonomikliği nedeniyle artmaktadır. Ancak bunlar daha yüksek sıcaklıklarda MMK uygulamalarında alternatif olanak sağlamaktadır. Çünkü bor elyaf ergimiş alüminyum ile hızla kimyasal reaksiyona uğrayarak mekanik özelliği düşmektedir. Burada özellikle bor elyaf ile SiC'ün karşılaştırılmasına bir göz atalım.

SiC elyafların daha düşük maliyette olmasının temel sebepleri şöyle özetlenebilir:

- 1 kg bor için yaklaşık 15 kg BCl_3 gerekli iken 1 kg SiC için yaklaşık 8 kg silanenin gerekli olması,
- Silanenin maliyetinin BCL_3'ün maliyetinden kg başına yaklaşık 1.5 kat daha düşük olması,
- SiC elyaflar tungsten ana malzemesinden ziyade karbon ana malzemesi ile üretildiğinden bor elyafların aksine daha düşük ana malzemesi maliyeti ile reaktördeki işletme hızının artması dolayısı ile daha ekonomik avantaj sağlanabilmesi,
- Saat başına kg'daki üretim miktarı SiC kaplama reaktörü, bor kaplama reaktöründen 2 kat daha büyük olduğu için, her birim üretim için daha az sermaye ve para ile neticelenmesi,
- Silaneler BCl_3'den daha az buharlaştığı için SiC filamentlerin üretimi için daha düşük soğutmanın gerekli olmasıdır.

Organik Moleküller (Aramid elyaflar)

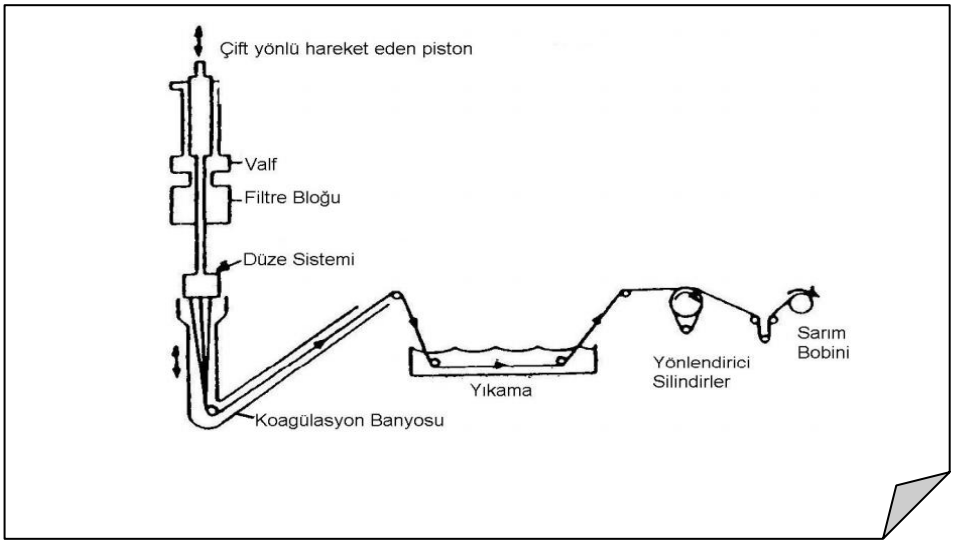
Organik moleküllerden olan Kevlar gibi aramid elyaflar takviye elemanı olarak pazara şok etkisi yapmıştır. Aramidler, -Co-NH- gurupları ile aromatik karbon halkaları zincirlerinden oluşur. Kevlar'ın son versiyonu aromatik poli amid,"paraphenylene telephthalamide" diye adlandırılır. Aromatik halkalar zincir üzerindeki rijitliği sağlar. Moleküler zayıf bağlı levhalarla birlikte eksenel olarak katlanmış levhanın radyal olarak düzenlenmesiyle Şekil 19' da gösterildiği gibi oluşur. Bu aromatik poli amid elyafların zayıf (sapro) molekülsel yapısı şematik olarak (Kevlar-49) gösterilmiştir.



Şekil 19. Aromatik Polamid Elyafın (Kevlar-49) Zayıf Molekülsel Yapısının Gösterilmesi ve Radyal Olarak Kıvrılmış Levha Sistemi

Kevlar para-phenylene diamine ve terephthaloyl klorit'ten üretilmektedir. Bu maddeler önce bir çözücü ile eritilir, sonra üzerlerine H2SO4 ilave edilir. Fakat dayanım üzerine çekme işlemi ve viskozite oranı çok önemlidir. Bu eriyikten 70 – 90 ^{o}C sıcaklıkta filamentler çekilir. Havalandırma sonrası su / sülfürik asit banyosundan geçirilir (25 ^{o}C). Bu banyo sonrası elyaflar yıkanır, kurutulur ve depoya gönderilmek üzere bobine sarılır ve çekme altında 550 ^{o}C sıcaklıklarda azot içinde ısıtılır. Şekil 20'de kuru-jet yaş çekim sistemi ile aramidlerin üretimi gösterilmektedir (Çelikkanat, 2002). Son ürün kahverengi renkte olup yaklaşık 12 μm çapında olup, yüksek çekme dayanımı/elastik modülüne sahiptir. Daha düşük modül versiyonu keza lastik ve halat üretiminde kullanılır. Kevların iki versiyonu mevcuttur, bunlar; Kevlar 29 ve 49'dur. Kevlar 29, esas olarak örme veya dokuma, veya çaprazlanmış tipiyle kurşun geçirmez koruyucu yelek ve sürtünen malzemelerde halat ve kablolarla otomobil araba lastiğinde kullanılır. Kevlar 49 ise yüksek modüle sahip olduğundan takviye elemanı olarak yorulma ve kimyasal etkilere karşı özelliği iyi olup özellikleri daha iyileştirmek için cam ve karbon elyaflarla birlikte kullanılabilmektedir. Dezavantajları ise suya olan ilgisidir ki bunların normal atmosferde %3 nem veya su olması onları kimyasal ortamda ve yüksek vakumda uygunsuz yapar. Korunmadıkça UV ışığına maruz kaldıktan sonra özellikleri azalır. Ancak poli etilenin düzenlenmesi aynı prensipler uygulanırsa çelik kadar dayanıklı yapılabilir. Çeliğin yaklaşık 1/2'si kadar rijit ancak yoğunluğu yaklaşık 1/8 kadar düşük olur. Değişik formatta üretilmiş olanları mevcuttur. Bunlar; küçük parçacık/büyük parçacıklar, uzun elyaflar, tabaka şeklinde elyaf ve kumaş

şeklinde Kevların üretilmekte olduğunu, burada sadece renginin açık/koyu sarı şeklinde olduklarını hatırlatalım.



Şekil 20. P-Aramid Üretimi İçin Kuru-Jet Yaş Çekim İşleminin Şematik Gösterimi

Reçine emdirilmiş takviye elemanlarını (Prepreg) tekrar hatırlatalım. Reçine emdirilmiş takviye (resin-impregnated fiber) malzemelerine (fiber, kumaş vb.) verilen bir isim "Prepreg"dir. Bunlar, tek-yönlü bant (unidirectional tape), iki-yönlü takviyeli bant (bi-directional), örgülü-kumaş (woven-fabrics) veya bükülmüş iplik (single/multi-fiber roving) şeklinde üretilmektedir. Elbette benzer şekilde termoset ve termoplastiklerin'de prepregleri mevcuttur.

SONUÇLAR ve GELECEK ÇALIŞMA

Üstün mekanik ve fiziksel özellikler elde etmek için çok değişik takviye elemanlarının seçimi çok önemli çünkü kompozit sistemde kuvvetlerin yaklaşık %90'dan fazlası takviye elemanı tarafından taşınmaktadır. Takviye elemanı olarak; öncelikle sürekli elyaflar, kısa elyaflar, kırpılmış lifler, parçacıklar, kılcal kristaller, dokuma kumaşlar ve tabakalar kullanılabilmektedir. Bu çalışmada; kompozit malzemelerin yapımında genel olarak kullanılan seramik takviye elemanlarının bazı özellikleri, üretimi, yapısı, mekanik/fiziksel özellikleri, birbirlerine göre karşılaştırılması yapılmıştır. Bu alanda tahrik edici güç; yüksek dayanım/yoğunluk ve yüksek elastik modülü/yoğunluk oranı olduğu için farklı uygulama alanlarında kullanımları hızla artmaktadır.

Ayrıca, yakıt maliyetinin artması ile, uzay/uçak üreticisi firmalar uçağın performansını artırmak için ana faktörün ağırlığın azaltılması fikrini benimsemişlerdir. Kompozit üretim tekniklerinde yapılan gelişmeler, geleceğin uçağıda çok muhtemeldir ki kompozit malzemelerden yapılmaya devam edecektir. Ama kompozit teknolojisi, karbon nanotüpler ve basalt gibi yeni takviye türlerini uygulamaya sokarak gelişmeye devam edilecek ve kompozit kullanımını hızlandırılacaktır. Havacılıkta son yıllarda kompozit malzemeler için yeni gelişmelerin, bilhassa turbo jet motorların iç sıcak-kesitlerinde ve uçakların oturma yeri / uçak içi alanında olması beklenmektedir. Özellikle uzay sahasında karbon fiber takviyeli plastik kompozitler (CFRP) ile daha sık karşılaşılacaktır çünkü bu kompozitler; geniş sıcaklık aralığında çok yüksek rijitlik ve mükemmel termal kararlılık sergiledikleri için daha çekici hale gelmektedir. Metal matriks bazlı kompozitlerin bu alanda yerini geleceği elbette görünmektedir. Diğer uygulama örnekleri olarak; manipülatör kolları, kaplamalar, anten yansıtıclar, güneş enerji panelleri, optik platformlar ve masalar şeklinde sıralanabilir. Buna ilaveten, doğal takviye elemanlarının (flax, jute,hemp,kenaf,coir gibi) çevre dostu elyafların/parçacıkların tekstil/otomative/enerji/paketleme/spor sanayi gibi yerlerde kullanımı artıracağı sanılmaktadır.

KAYNAKÇA

Aricasoy, O., Kompozit Sektör Raporu, İstanbul, Aralik, 2006.

Çelikkanat, A. B. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Bölümü, No: 503981110, Aralık 2002.

Czigany T, Vad J, Poloskei K. (2015). Basalt fiber as a reinforcement of polymer composites. Period. *Polytech Mech Eng*.;49(1):3–14.

Colombo, C., Vergani, L., Burman, M., (2012). "Static and fatgiue characterization of new basalt fibre reinforced composites", *Composite Structure* 94, 1165-1174.

Deak, T., and Czigany, T. (2009). "Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers: A Comparision*", Textile Research Journal* 79(7), 645-651.

Dorigato, A., and Pegoretti A. (2012). "Fatigue resistance of basalt fibers-reinforced laminates", *Journal of Composite Materials* 46(15), 1773-1785

Fiorre, V., Bella, G.D., Valenza, A. (2011). "Glass-Basalt/Epoxy hybrid composites for marine applications", *Materials and Design* 32, 2091-2099.

Mallick, P.K. (1988). "Fibre *reinforced composites: Materials, manufacturing and design*", Marcel Dekkery Inc.New York, USA, 1988

Hull, D.(1992). "An introduction to composite materials", Cambridge Solid State Science Series, Cambridge University Press, 1992.

Sfarra, S., Ibana-Castanedo, C., Santalli, C., Paoletti, A., Paoletti, D., Sarasini, I., Bendada, A., Maldague, X. (2013). "Falling weight impacted glass and basalt fibre woven composites inspected using nondestructive tehcnigues", *Composites: Part B Engineering* 45, 601-608.

Sur, G., Sahin, Y., Gökkaya, H.,(2003)."Ergimiş metal karıştırma ve basınçlı döküm yöntemi ile alüminyum esaslı tanecik takviyeli kompozitlerin üretimi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20 (2) (2005) 233-238.

Sahin, Y.(2003). "Preparation and some properties of aluminium alloy composites", *Materials and Design*, 24 (2003) 671-679.

Sahin, Y.(1998). "Wear of planar-random oriented metal matrix composites*", Wear*, 216, 112, 1998.

Şahin, Y., Murphy S.(1996)."Friction and wear behaviour of Saffil reinforced Zinc-Alüminium alloy composites", *7th Int.Machine Design and Production Conf.,* Sept. 11-13, 996, METU, Ankara

Şahin Y. (2015). "Kompozit Malzemelere Giriş", Mukavemet - Hafiflik - Özgül Modül / Dayanım, Güncellenmiş 3. Baskı, Seçkin Yayıncılık San.Tic.A.Ş., Ekim 2015, Ankara.

ISBN 978-975-02-3463-7.

Sahin, Y. (1996). "Wear performance of aluminium alloy composites containing unidirectionally-oriented silicon carbide coated bor fibres", *Wear* 197, 248-254, 1996.

Seo Young H., Kang Chung-Gil.(1995). "The effect of applied pressure on the particle-dispersion characteristics and mechanical properties in melt-stirring squeeze-cast SiCp/Al composites", *J. Mate. Process. Techn.*, 55, 370, 1995

Taya, M., Arsenault, R.J.(1988). "Metal matrix composites-thermal and mechanical behaviour", Pergamon press, 1988.

Trumper, R.L.(1987). “Metal matrix composites, applications and prospects”, J. *Int. Metals, Metals and Materials*, 3-11, 663, 1987.

İNTERNET KAYNAKLARI

http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html

BÖLÜM 25
KURŞUNLU VE KURŞUNSUZ PİRİNÇ ALAŞIMLARINDA İŞLENEBİLİRLİK YAKLAŞIMI

Serap ÖZHAN DOĞAN
Aktif Analiz Mühendislik Hizmetleri San. ve Tic. Ltd. Şti. İstanbul/ TÜRKİYE

Öz: Pirinç, bakır elementine çinko ilave edilerek elde edilen alaşımdır. Pirinçler, endüstriyel uygulamalar ve estetik amaçlı uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan alaşımlar arasındadırlar. Özellikle, mühendislikte çok kullanılan demir dışı malzemedir. Pirinçler eriyebilme özelliğine sahiptirler. İşlenebilirlik açısından bakıldığında ise, yeterince tok ve daha kolay işlenebilir bir alaşım malzemesidir. Bakır-çinko alaşımlarına çeşitli nedenlerden dolayı alaşım elementleri ilavesi yapılır. Pirinç esasen bakır ve çinko alaşımları olmasına rağmen; alaşımın varlığı ve içeriğinde kendine özgü geniş özellik çeşitliliğinden sorumlu olan kurşun, silikon, alüminyum, demir, kalay, manganez, nikel veya arsenik gibi diğer alaşım elementlerini de içerir. Sebepleri; işlenebilirliğin artırılması, mukavemet ve aşınma direncinin artırılması, korozyon direncinin artırılması istenir. Pirinç alaşımlarında genellikle, %4 oranına kadar kurşun elementi ilave edilmektedir. Ancak, kurşun elementinin özellikle insan sağlığını tehdit edici bir yapısı olması sebebiyle bahsedilen bu oranlar oldukça yüksek ve olumsuz etkilenmelere sebep olmaktadır. Bu yüzden alaşımlarda olabildiğince kurşun element oranı azaltılmak istenmektedir. Alaşım kompozisyon yüzdesinde %1.6 ve daha az kurşun içeren pirinçler "Kurşunsuz Pirinç Alaşımları" olarak adlandırılmaktadır. Çalışma kapsamında; sıcak dövme ile şekillendirilen kurşunlu CW614N ve kurşunsuz CW622N pirinç alaşımlarından delme metodu ile talaş kaldırılmıştır. Dövme sıcaklığı 725ºC seçilirken dövme basıncı 250ton ve 270ton olarak iki farklı parametre kullanılmıştır. Üretilen her test numunesi için aynı delme parametreleri uygulanmıştır. Numunelerin kompozisyon değerlerine, yüzey sertlik değerlerine, talaş yapıları, yüzey pürüzlülük değerleri ve kesme kuvvetleri elde edilerek kıyas-

lanmıştır. Her iki alaşımda; kabul edilemeyecek farklı bir talaş yapısına sahip olmadığı görülürken, diğer işlenebilirlik değerlendirme parametrelerinde kurşunlu pirinç alaşımına ait değerler daha düşük yani daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

GİRİŞ

Pirinçler, M.Ö. 500'lü yıllarda bulunmuştur ancak nerede ve hangi tarihte gerçekleştiği kesin olarak bilinmemektedir. Pirinç alaşımları M.S. 16. yüzyıl dönemlerinde bakır ve çinko cevheri karıştırılarak alaşım elde edilmiştir. Alaşımın kendine has özelliklerinden dolayı ayrıştırmasında sıkıntılarla karşılaşılmıştır. Bu nedenle çinko elementi 16. yüzyılın başlarına kadar cevherinden ayrıştırılamamıştır. M.S. 16. yüzyılın öncesinde, pirinç alaşımını elde etmek için potaya metalik bakıra ilaveten toz haline getirilmiş ve dövülmüş çinko cevheri konularak; ısıyla buharlaşması sağlanmıştır. Böylece buharlaşan çinko, bakırın içine difüzlenerek pirinç alaşımı elde edilmiştir.

Pirinç alaşımları, birçok mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir. Endüstriyel uygulamalar ve estetik amaçlı uygulamalarda alaşımlar arasında en yaygın olarak kullanılan pirinçlerdir (Fan, Li, Zhao, Wang, Shi, Zhang; 2011). Pirinçler yaygın olarak açık uygulamaları ve aşındırıcı ortamlara maruz kalan sıhhi tesisat için kullanılır (Caron, Sharif; 2017). Pirinçlerin başlıca temel özellikleri sıralanacak olursa; döküm kolaylığı, kolay dövülebilirlik, derin çekilmeye uygunluk, haddelemeye uygunluk, sıcak ve soğuk şekillendirilmeye uygunluk, kolay kaynak olabilme, iyi ısı ve elektrik iletkenlik özelliği, iyi mukavemet özellikleri, mükemmel korozyon direnci, üstün işlenebilirlik özelliği, aşınma dayanımı, alaşım özelliklerinde azalma olmadan tekrar kullanılma özelliği olarak sıralanabilir.

Saf bakır ve çinkoya ait bazı fiziksel özellikler Tablo-1'de paylaşılmıştır.

Tablo 1. Saf Bakır ve Çinkonun Bazı Fiziksel Özellikleri

Fiziksel Özellikler	Saf Bakır	Saf Çinko
Atom numarası	29	30
Atom ağırlığı	63,54	65,57
Yoğunluğu (g/ cm^3)	8,933	7,134
Ergime sıcaklığı (°C)	1083	419,47
Kaynama noktası (°C)	2500	906

Kafes sitemi (20°C)	YMK (Yüzey Merkezli Kübik)	sdh

Cu-Zn alaşım diyagramı incelendiği zaman görülüyor ki Cu ve Zn' nin ergime sıcaklıkları farklıdır. Farklı kimyasal bileşimdeki pirinç alaşımlarının ergime sıcaklığı içerisindeki Zn miktarının artması ile birlikte düştüğü aşağıdaki Tablo-2'de paylaşılmıştır.

Tablo 2. Alaşımdaki Çinko Oranına Bağlı Olarak Değişen Ergime Sıcaklığı

Ergime Sıcaklığı (°C)	0% Zn	20% Zn	40% Zn	60% Zn	80% Zn	100% Zn
	1083	995	900	820	700	419

Pirinçler alaşımlarının sahip oldukları mukavemet değerleri 200°C'ye kadar önemli ölçüde değişme olmaz. 300°C değerlerine ulaşıldığında ise, mukavemetinde %30 civarında bir düşüş görülebilir. Pirinçlerin özellikleri alaşımdaki Zn miktarına bağlıdır. Kompozisyon içerisindeki çinko (Zn) oranının artması ile birlikte mukavemeti artar. En fazla mukavemet değeri kompozisyon içerisindeki Zn oranının %40'lara ulaştığında elde edilebilmektedir.

PİRİNÇ ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI

Pirinçler kimyasal ve fiziksel yapılarına göre Alfa (α) , Alfa-Beta (α + β), Gama (γ) ve Karma (Yüksek mukavemetli) pirinçler olmak üzere dört gruba ayrılırlar. Alfa (α), Alfa-Beta (α + β) ve Karma (Yüksek mukavemetli) pirinçler ticari amaçlarla kullanılırken Gama (γ) pirinçleri gevrekliklerinden dolayı ticari amaçla kullanılmamaktadır.

Alfa (α) Pirinçleri

Alaşım içerisindeki çinko element miktarı %35' den azdır. En önemli özelliği eriyebilme kabiliyetidir. Aynı zamanda soğuk işlenebilir ve dövülebilir pirinçlerdir. Sadece tek faz yapısı (YMK) içerir.

Alfa – Beta Pirinçleri (Dubleks Pirinçler)

Dubleks pirinçler, iki fazlı pirinç alaşımı olarak da isimlendirilirler. Bu alaşımlar %35-45 arasında çinko elementi bulundururlar ve sıcak işlemeye oldukça yatkındır. Kompozisyon hem alfa fazı hem beta fazı ihtiva eder.

Beta fazları, yapı olarak şekil merkezli kristal yapıya sahiplerdir. Alfa fazı ile kıyaslandığında daha güçlü ve daha serttir. Dubleks pirinçler çoğunlukla sıcak işlemeye tabi tutulurlar. Alfa beta pirinç alaşımlarına kurşun eklenmesiyle "Kurşunlu Pirinç" elde edilmektedir. (Heidarzadeh, Saeid; 2015).

Gama (γ) Pirinçler

Alaşım %55 oranını aştığı zaman gama (ϒ) fazı ortaya çıkar. Gama fazı çok gevrektir ve bu nedenle ticari pirinçler içerisinde istenmez.

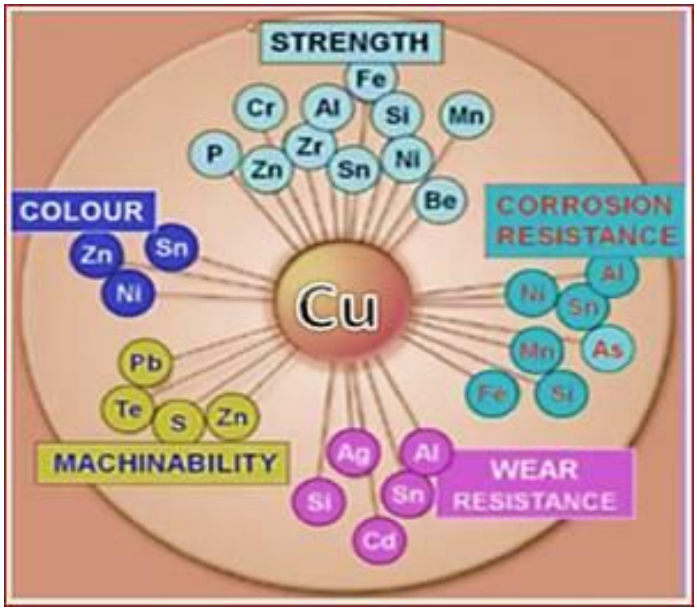
Karma Pirinçler (Yüksek Mukavemetli Pirinçler)

Pirinç alaşımlarının mekanik özelliklerini arttırmak maksadıyla, bakıra çinkonun dışında demir, mangan, nikel, silisyum veya kalay elementleri eklenerek ilave özellikler elde edilebilir. Bu alaşımların önemli üstünlükleri ise, döküm yoluyla elde edildiğinde gözeneksiz yapıda olmasıdır. Dövme yoluyla elde edilen parçalara ilave mekanik özelliklere sahip olabilen gruptur. Bu alaşımlar, mukavemetin gerekli olduğu alanlarda kullanılabilir.

BAKIR-ÇİNKO ALAŞIMLARINA İLAVE EDİLEN ELEMENTLERİN ETKİLERİ

Çok çeşitli imalat yöntemlerinin uygulanması mümkün olan ve her bir metotta istenilen farklı özelliklerde sonuçlar elde edilebilir. İstenilen farklı özellikler için farklı kompozisyonlardan oluşan pirinç alaşımları seçilerek elde edilebilir. Kompozisyon içerisine sertlik, mukavemet, şekillendirebilirlik, süneklik, iletkenlik, renk, aşınma dayanımı ve korozyon dayanımını artırıcı elementler ilave edilerek yeni ve istenen özellikte alaşımlar elde edilebilir.

Bu açıdan saptanan alaşımların yanı sıra, yeni alaşımlar için bilimsel çalışmalara ve incelemelere geniş alan olduğu kadar yeni nesil alaşımların çalışmalarına ihtiyaç vardır. Aşağıda paylaşılan Şekil-1 incelendiğinde; endüstriyel pirinçlerin kompozisyonunu oluştururken bakır ve çinko ilavelerinin yanı sıra istenen özelliğe sahip olunacak elementleri göstermektedir.



Şekil 1. Pirinç Alaşımına İlave Edilen Elementler Ve Etkileri

Bazı elementlerin ilavesinde kompozisyondaki etkileri özetlenirse;

Çinko Elementi

Kompozisyondaki çinko artışı, pirincin çekme mukavemetini artırır ve % uzamayı düşürür. İyi dayanım ve yüksek süneklik özelliklerini sapladığından özellikle tel formu imalatı için tercih sebebidir. Aynı zamanda, çinkonun bakıra ilavelerinin elektriksel direnç ve ısıl iletkenliği üzerinde sahip olduğu önemli etkiler vardır.

Kalay Elementi

Kalay ile alaşımlandırılmış pirinç malzemeler geleneksel pirinç malzemelere göre malzemenin korozyon direncini ve sertliğini arttırır (Claesson, Rod; 2016).

Aşınmaya dayanıklı hale getirir. Ayrıca, dezinsifikasyonu[1] (çinkosuzlaşmayı) azaltır. Bir dereceye kadar, renk iyileştirmesine rağmen işlenebilirliğini değiştirmez.

[1] Çinkosuzlaşma (Dezincification): Alaşım içerisindeki çinko elementinin sıcaklık etkisi ile seçici korozyona uğramasıdır.

Silis Elementi

Kompozisyona silis ilavesi ile pirinç alaşımında dayanımını ve aşınma mukavemetini artırır. Ayrıca bazen gaz kaynağı için çinkonun oksitlenmesini azaltmak ve akışkanlığa yardım etmek amacıyla döküm pirinçlerine ve dolgu alaşımlarına dâhil edilir.

Arsenik Elementi

Arsenik ve antimon, sarı pirinç alaşımlarındaki korozyonun dezinfikasyon tiplerini önlemek için, %80' den daha az bakır içeren tüm pirinç alaşımlarına az miktarda ilave edilebilir.

Bakır-Nikel-Çinko (Nikel Gümüşleri) Elementleri

%10-20 oranında nikel içeren ve nikel gümüşleri olarak bilinen bakır-nikel-çinko alaşımlarının dizisi, özel pirinçler olarak kabul edilebilir. Ekstra mukavemet elde etmek için kullanılırlar.

Alüminyum Elementi

Alüminyum Cu-Zn alaşımlarında beta fazını destekleyen olarak bilinir. Alüminyum %9,5'e kadar bakır içerisinde katı çözelti formundadır. Sarı pirinçlere sertlik kazandırır. Ayrıca, spesifik pirinç alaşımlarında (70-30 pirinç alaşımı) eklenen Al dezinsifikasyonu (çinkosuzlaşmayı) engellemektedir (Lovisek, Liptakova, Dundekova, Katarina; 2016).

Silikon Elementi

Yüksek mukavemetli ve tokluğa sahip alaşımlar, özellikle asitli ortamlarda geliştirilmiş korozyon direnci, silikon bakır üzerine ilave edildiğinde ortaya çıkar. Az miktarda silisyum akışkanlığı artırabilir.

Kurşun Elementi

İşlenebilirliği etkileyen en önemli elementlerden biridir (Nobel, Klocke; 2014). Kurşun, bakıra maksimum %40 oranında eklenir. Kurşun, bakır ve çinko ile katı bir çözelti oluşturmaz fakat dağılmış bir süreksiz faz olarak alaşımın her tarafına yayılmış bir şekilde bulunur. Kurşunlu bir pirinç alaşımın mikroyapısı incelendiğinde; kurşun elementinin yapı üzerine dağılmış damlacıklar olarak görünmektedirler.

Kurşun (Pb), düşük maruziyet seviyelerinde bile toksik olan ve insan sağlığı üzerinde akut ve kronik etkileri olduğu bulunan ağır bir metaldir. Ayrıca kurşun

bitkiler, hayvanlar ve mikro organizmalar içinde zehirlidir (UNEP; 2010). Bu bağlamda, önceki araştırmaların, örneğin sıhhi tesisat uygulamalarında kullanılması halinde kurşunun kurşun içeren pirinç bileşenlerden sızacağını bulunması ilginçtir (Lytle ve Schock; 1996). Bu nedenle, kurşun içeren pirinç parçalar kullanıldığında içme suyunu kirletme riski vardır. Uluslararası Kurşun ve Çinko Çalışma Grubu (ILZSG), 2003 yılında Örgüt'e rapor veren ülkeler tarafından farklı alaşımlarda 115.000 ton kurşunun kullanıldığını tahmin etmiştir ki bu aynı zamanda Dünya tüketiminin kabaca% 80'ine eşdeğer olduğu tahmin edilmektedir (UNEP; 2010).

Kurşun, vücuda girdiğinde hücreler onu demir zannedip emilimine başlamaktadır ve bu durum hem o hücrelerin ölmesine hem de vücudun ihtiyacı olan sağlıklı metalleri alamamasına sebep olmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO), insan sağlığına zararlı kurşun elementlerinin kullanımına ilişkin kısıtlamalar talep etmektedir.

Alaşımlarda; özellikle de sıhhi tesisat uygulamalarında kurşunun kullanımına ilişkin yeni çevresel gerekliliklerin yanı sıra yukarıda bahsedilen sağlık endişeleri sebebiyle, geleneksel kurşun içeren işleme pirinçlerin kullanımını kısıtlamaktadır ve kurşunsuz alternatif bir serbest işlenebilen bakır bazlı alaşımlara ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Tipik olarak; bir malzemenin performansını iyileştiren faktörler, genellikle işlenebilirliğini bozmaktadır. Bu nedenle performansa zarar vermeden alaşımın işlenebilirliğini iyileştirmenin yolları düzenli olarak aranmaktadır (Degarmo, Black, Kohser; 2003) (Vilarinho, Davim, Soares, Castro, Barbosa; 2005).

Dünya Sağlık Örgütü (WHO); pirinçlerin kullanım yerlerinden özellikle insan sağlığına birebir etkisi olan uygulamalarda, alaşımdaki kurşun miktarını en fazla %1.6 istemektedir. Bu istek; kurşunsuz pirinç alaşımlarının kullanımını artırmak anlamına gelmektedir (Estelle, 2016).

Sonuç olarak, tüm üretim maliyetlerini artırmayacak şekilde elde edilebilen ve alaşımın sahip olacağı diğer özelliklerden minimum fedakârlık ile kolayca "işlenebilir" alaşımlar geliştirmek büyük önem taşımaktadır (Kuyucak, Sahoo; 1996).

TALAŞLI İMALAT İŞLEMLERİ

Talaşlı imalat sektöründe başlıca sorunlardan ilki işlenebilirliktir. İmalatçı firma elde etmek istediği ürünü; maliyeti düşük, hızlı, ve kaliteli nasıl üretilebileceği sorunsalını çözmeye çalışır. Literatürde işlenebilirliğin kesin bir tanımı ol-

mamakla birlikte bu konu ile ilgili çeşitli tanımlamalar yapılmaktadır. Bu tanımlamalar ışığında bir çıkarım yapmak gerekirse üretim sürecinde işlenebilirlik; nihai ürünün geometrisini elde edebilmek için kesici takımların ürünü kesebilme yeteneği denilebilir.

Farklı özellikteki ve farklı malzemeler üzerinde, kesici takımların sahip olduğu geometrik yapıda performanslarının değerlendirilmesi; kesici takım dizaynı ve geliştirilmesi bakımından önemlidir.

Yeni işleme metotları sayesinde; kesici takım değiştirme zamanı ve işleme maliyetleri minimize etmekle beraber, seri üretim için kullanılmaya uygundur.

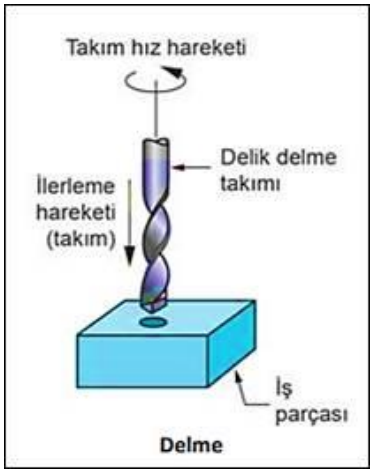
Deneysel amaçlı testlerin çoğu bu hedefe varmak için çalışılmaktadır. Her malzemenin sahip olduğu farklı kompozisyonlar sebebiyle; işlenebilirlik deneyleri yapılarak hem o malzemenin uygun işlenebilecek parametrelerin bulunması hem de gerek işleme metodunda gerekse malzemede iyileştirme yapılabilmesi adına çözümler sunacaktır.

Delik Delme İşlemi

Talaşlı imalat işlemleri içerisinde "delik delme prosesi" önemli bir yere sahiptir. Delme prosesi sırasında üründen talaş kaldırılırken; çapak oluşumu, yüzey pürüzlülüğünde fazlalık, eksenel kaçıklık, hızlı takım aşınması ve dairesellik gibi diğer metotlarda olduğu gibi istenmeyen neticelerle karşılaşılmaktadır. Bu neticeler; üretim maliyetlerinin belirlenmesinde ve nihai ürün kalitesinin oluşumunda önemli bir yere sahiptir. Bu problemlerin en aza indirgenmesi için makine parçalarının birbirleri arasında çok hassas çalışabilmeleri ve üretimde verimliliğin artırılması gerekmektedir. (Bayraktar, Siyambaş, Turgut; 2016).

Ürün üzerinde delik kalitesini olumsuz etkileyen nedenlerden bir tanesi de kesme parametrelerinin yanlış seçiminden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, delme işlemine başlanırken yüzeyin hassas olarak doğru parametrede işlenmesi gerekmektedir. Bu parametreler, yukarıda bahsedildiği gibi malzeme türüne ve içerdiği kompozisyon değerine göre ve hatta ilaveten kullanılacak takım kalitesine ve geometrisine bağlıdır.

Aşağıda Şekil-2'de paylaşılan delme prosesine ait parametrik gösterimler bulunmaktadır.



Şekil 2. Delme Proses Tanımı

Kesme parametrelerini oluşturan unsurlar; kesme hızı, ilerleme hızı, delme (ilerleme) derinliği, matkap malzemesi ve işleme sırasında kullanılacak soğutma sıvısı ve hatta çevre koşullarından oluşmaktadır denilebilir.

PİRİNÇ ALAŞIMLARINDA İŞLENEBİLİRLİK

Esasen tüm pirinçler kolay işlenebilir oldukları halde, alaşımın içine ilave edilen kurşun bu özelliklerini daha da artırarak pirinci diğer bütün metallerin önüne geçirerek kolay işlenebilirlik standardını oluşturmuş ve bu olgu dünya çapında kabul görmüştür (Garcia;2010).

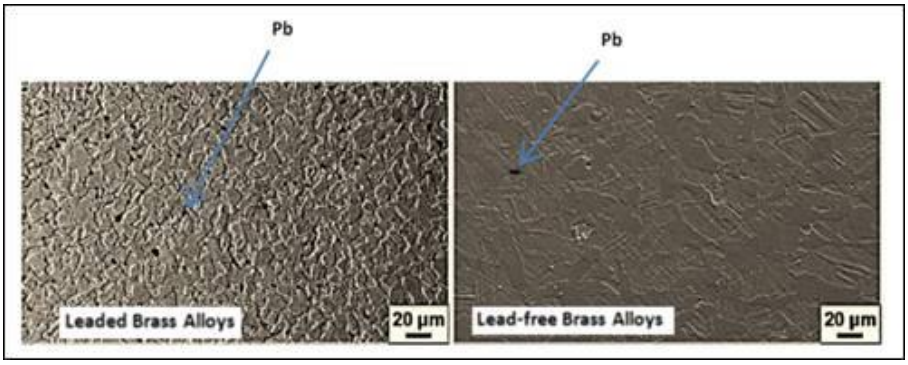
Pirincin iyi bir işlenebilirliğe sahip olması için özellikle yaplayıcı etkisinden dolayı kurşun elementi ilavesiyle iyileştirilir. Kurşunlu pirinç alaşımları mükemmel işlenebilirliğe sahip, yüksek dayanım ve yüksek korozyon direncine sahiptirler. Her pirince işlenebilirliğini artırmak ve malzeme yüzeyindeki gözeneklerde sızdırmazlık sağlamak için alaşıma %4'e kadar istenilen oranda kurşun elementi eklenebilir.

Kurşun elementinin işlenebilirliği arttıran etkisinin yanı sıra metali soğuk biçimlendirilmesini azaltıcı etkisi de vardır. Bu sebeple; kompozisyona kurşun eklemesi yapılırken, alaşımın sahip olduğu istenen özelliklerin kaybedilmemesi için saptanan bir optimizasyonuna bağlı kalınarak eklenmelidir. İyi işlenebilir pirinçler genel olarak % 58 bakır ve %39 çinko elementleri içerirler diye tanımlanır. Alaşım içerisindeki bakır element oranı ile kurşun element oranları arasındaki ilişki ve talaşlı imalata etkisi aşağıda Şekil-4'de paylaşılmıştır.

Kurşun yokluğunun alaşımın iletkenliğini önemli ölçüde artırması ve ardından işlenebilirliğinin bozulması beklenmektedir. Diğer yandan, pirinç alaşımlarının mikro yapısının kontrolü, kurşunlu alaşımlara benzer özelliklerin elde edilmesine yönelik kırılma davranışının uyarlanması için kullanılabilir (Toulfatzis, Pantazopoulos and Paipetis; 2014).

Alaşım içerisindeki kurşun parçalarının dağılım yapısı da pirincin işlenme kabiliyetinin arttırmasında önemli bir etkendir. Kurşun elementleri, talaşlı imalat sırasında takım ile malzeme arasındaki sürtünme katsayısını düşürürken, kesici takımın aşınma miktarını ve kesme kuvvetini düşürmektedir. Bu sayede, talaşlı üretimde kullanılan kesici takımların ömrünü artırmaktadır.

Aşağıda mikroskopla mikroyapısı incelenen CW614N ve CW622N alaşımlarında; kurşun elementinin alaşımın her tarafına dağılmış bir şekilde olduğu elde edilmiştir. Nikon LJ80 optical microscope görüntüler aşağıda Şekil-3'te paylaşılmıştır.



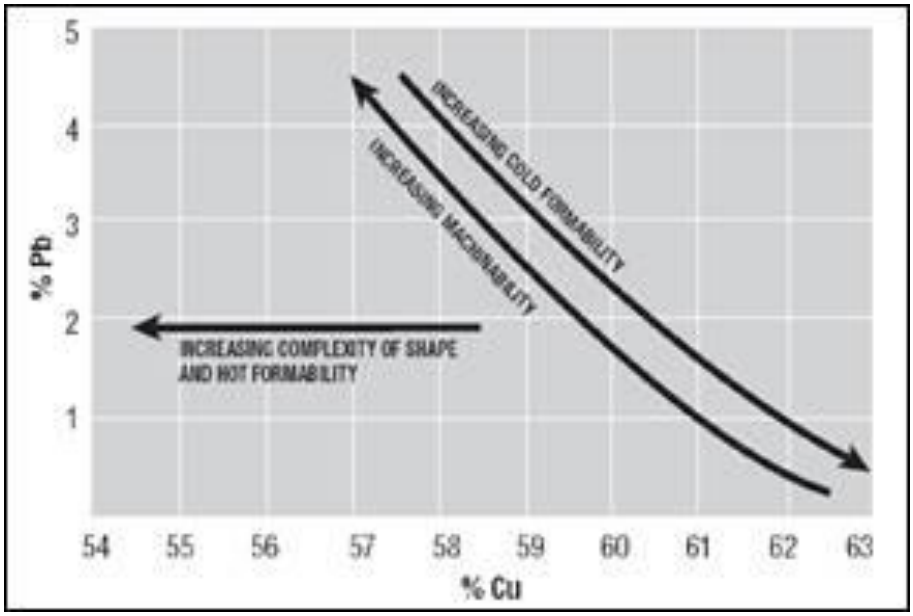
Şekil 3. CW614N Ve CW622N Alaşımlarına Ait Mikro Yapıda Tespit Edilen Kurşun Tanecikleri

Şekil-3'te görüldüğü gibi mikroyapısı incelenen kurşunlu pirinç alaşım olan CW614N'e ait olan yapı içerisindeki kurşun element dağılımına bakıldığında bu alaşım grubunun diğer yani kurşunsuz alaşım olan CW622N'e göre daha üstün işlenebilirliğe sahip olması gerektiği söylenebilir. Elbette ki alaşım kompozisyonundaki her türlü element oran değişimleri bu yorumu destekleyici ya da eleştirici duruma sebep olabilir.

Pirincin mükemmel işlenebilirlik özelliğinden yararlanabilmek için doğru işleme takımı ve teknikleri uygulandığında ürünün işleme maliyeti en alt düzeye inecektir. Bu faydayı artırmak için işleme takımının geometrisi, hızı, besleme ve

kesme derinliği parametreleri doğru belirlenmelidir. Pirinç malzemelerin işlenmesinde, malzemede yüksek sıcaklık artışı ve kesme gerilimlerinde artışlar sık görülmektedir.

İşleme; nihai şekillendirme işlemi olarak yaygın olarak kullanılır ve üretilen bir ürünün maliyetine önemli katkıda bulunur. Sonuç olarak, ilgili imalat maliyetlerini azaltmak için diğer özelliklerin en az oranla kolayca "işlenebilir" alaşımlar geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır (Callcut , 1996). Kurşun elementinin işlenebilirliğe etkisi aşağıda Şekil 4'te paylaşılmıştır.



Şekil 4. Alaşıma Katılan Kurşun (Pb) Elementinin İşlenebilirliğe Etkisi (Copper, 1998)

Yukarıda Şekil-4'te paylaşılan grafik incelendiğinde işlenebilirliğin alaşım içerisinde kurşun miktarının artışıyla orantılı olduğu görülmektedir.

Kurşunsuz pirinçlerin işlene bilirliği, uzun talaş oluşumu ve azaltılmış takım ömrü nedeniyle kurşunlu alaşımlara kıyasla önemli ölçüde daha kötüdür, bu da düşük üretkenlik ve proses stabilitesine yol açar. Geçmişte, selenyum ve bizmutun yanı sıra grafit eklenmesinin kurşunsuz pirinçlerin işlenebilirliğini artırdığı bulunmuştur (Vilarinho, Davim, Soares, Castro and Barbosa; 2005). Bununla birlikte, malzemelerin üretim süreci çok karmaşık ve maliyet yoğundur. Dahası, bizmut yalnızca sınırlı miktarlarda mevcuttur. Bu materyallerin kullanımı bu nedenle seri

üretimde uygulanabilir değildir. Ticari olarak temin edilebilen kurşunsuz pirinç alaşımlarına ilişkin araştırmaların çoğu yirmi yıldan daha uzun bir süre önce gerçekleştirilmiştir. Değişen mevzuatla hareket edilerek, son yıllarda maksimum kurşun içeriği konusunda yasal olarak öngörülen gereksinimleri karşılayan yeni kurşunsuz pirinç alaşımları geliştirilmektedir. Araştırma çalışmalarında, geliştirilen alaşımların işlenebilirliği sistematik ve kapsamlı bir şekilde araştırılmamıştır.

PİRİNÇ ALAŞIMLARINDA TALAŞ KALDIRMA

Üretilen ürünlerin son geometrilerini verebilmek için kullanılan talaşlı imalat işlemleri oldukça önemli ve oldukça yaygın olarak kullanılan yöntemlerinden biridir. Talaşlı imalat prosesi; haddelenerek, dökümü yapılarak veya dövülerek elde edilen yarı mamul olan iş parçasını, gerekli nihai geometriye getirmek için kullanılır. Ürün üzerindeki fazlalıkları ve ilave işlemleri uygun takım tezgâh seçimi (torna, freze, matkap) ile uygun kesici takım seçilerek üründen talaş kaldırılarak nihai ürüne ait boyut ve yüzey kalitesi sağlanmış olur (Nobel, Klocke, Lung , Wolf ;2014).

Talaş oluşumu, talaş kaldırma teorisinin odak noktasıdır. İşlenen malzemeden plastik şekil değiştirmenin sonucu talaş oluşmaktadır. Kesici takım; talaş kaldırma esnasında, malzemeye nüfuz ederek hareket ettiğinde, malzeme ile temas edilen bölgede malzemenin plastik şekil değiştirmesine sebebiyet vermektedir. Bu temas noktasında, yüksek gerilmeler ve sıcaklıklar oluşmaktadır. Oluşan gerilmeler, malzemenin akma sınırını aştığı anda talaş olarak tanımlanan yüzey tabakası, işlenen parça boyunca kesici takımın kesme yüzeyinden kayarak uzaklaşır. Oluşan talaşlar; kesici takımın kesme yüzeyinden kayarak, yüksek basınçlar altında meydana geldiğinden sürtünme sebebiyle takım yüzeyinde istenmeyen sıcaklıklar ölçülür.

Fiziksel bakımdan talaş kaldırma kabiliyeti irdelenirse; elastik ve plastik şekil değiştirme prensibine dayanmaktadır. İşlenen parça ve kesici takım arasında oluşan sürtünme, sıcaklık artışı, çıkan talaşın kırılması ve büzülmesi, işlenen parça yüzeyinde sertleşme, takım ucunun aşınması vb. olayların meydana geldiği karmaşık bir fiziksel olaydır.

Talaş kaldırma prensiplerinden bazıları şunlardır;

- Kesici takımın işlediği parçadan daha sert bir malzeme olmalıdır,
- Doğru talaşlı imalat metodu ile istenen talaş yapısı elde edilerek nihai ürünün elde edilmesi sağlanmalıdır.

- Kesici takımın rijit bağlanması (eksenel kaçıklık yaşanmaması) ve talaş kaldırma işlemi esnasında oluşacak aşırı basınca dayanabilmesi gereklidir,
- Optimum kesme etkisini yakalamak için, işlenen parça ve kesici takım ucu arasında uyumlu (bağıl) hareketin olması gereklidir,
- Uzun takım ömrü ile yüksek kesme etkisi için, kesici takımın uygun geometride olmalıdır.
- Kesme sıvısının doğru seçilmesi ve viskozite değeri uygun olmalıdır.
- Kesici takımın, uygun açıda iş parçasından talaş kaldırması gerekir.
- Nihai ürün için birden fazla ve farklı talaşlı imalat metodu uygulanması gerekebilir. Bu sebeple uygun işleme sırasının doğru belirlenmesi gerekir.

DENEY ÇALIŞMASI

Çalışma kapsamında; kurşunlu pirinç alaşımı olan CW614N (CuZn39Pb3) ve kurşunsuz pirinç alaşımı olan CW622N (CuZn43Pb1Al) malzemeleri kullanılarak her iki malzemenin İşlenebilirliği kıyaslanmak istenmiştir. Sıcak dövmeye uygun olan bu alaşımlar işlenebilirlik parametreleri aynı ancak dövülerek şekillendirilme parametrelerinde birden fazla parametre tercih edilmiştir. Böylelikle her iki alaşım arasındaki en büyük fark kurşun elementinin kompozisyon içerisindeki oran farklılığının yanında diğer faktörlerde işlenebilirliğe direk ya da dolaylı olarak etkisi olup olmadığı araştırılmak istenmiştir. Bu seçimlere ait detay bilgiler ilgili alanlarında detaylandırılmıştır.

Çalışmada kullanılan bu alaşımlara ait EN 12167:1998 standardında belirtilen kompozisyon değerleri aşağıda Tablo-1'de paylaşılmaktadır.

Tablo 3. EN 12167:1998 Standart Kapsamında Test Alaşımlarının Kompozisyon Değerleri

Kullanılan Alaşımlar	ALAŞIM İÇERİSİNDEKİ ELEMENT MİKTARI (%)							
	Cu	**Pb**	**Al**	**Fe**	**Sn**	**Ni**	**Zn**	**Kalan**
CW614N	57,0 – 59,0	2,5-3,5	Mak. 0,5	Mak. 0,3	Mak. 0,3	Mak. 0,3	Kalan	Mak. 0,2
CW622N	55,0 – 57,0	0,8 – 1,6	0,05 – 0,5	Mak. 0,3	Mak. 0,3	Mak. 0,3	Kalan	Mak. 0,2

Yukarıda yer alan alaşım standart değerleri göz önünde bulundurularak alaşımlar elde edilmiş olup 5,5m boyundaki ekstrüzyon yolu ile üretilen çubuklar bu çalışmada kullanılmıştır.

Her iki alaşım için; sıcak pres ile dövme parametreleri belirlenerek test numuneleri şekillendirilmiştir. Aynı parametreye ilişkin 3'er adet test numunesi elde edilmesi planlanmıştır. Aynı zamanda çalışmaların etkin ve doğru takip edilebilirliği açısından elde edilen her bir test numunesine kod verilmiştir. Verilen kod sistematiği ve test numune üretim planı aşağıda Tablo-2'de paylaşılmıştır.

Tablo 4. Test Numuneleri Üretim Planı ve Numunelere Verilen Kodlar

Test Numunesi Üretim Planı						
Alaşım Adı	**Verilen Test Numune Kodu**	**Dövme Parametresi**		**Delme Parametresi**		
		Sıcaklık (ºC)	**Basınç (Ton)**	**Matkap Çapı (mm)**	**İlerleme Hızı (mm/sn)**	**Dönme Hızı (rpm)**
CW614N	a.1	725ºC	250ton	Ø10mm	300mm/sn	1000rpm
	a.2					
	a.3					
	a.4		270ton			
	a.5					
	a.6					
CW622N	b.1	725ºC	250ton	Ø10mm	300mm/sn	1000rpm
	b.2					
	b.3					
	b.4		270ton			
	b.5					
	b.6					

Sıcak dövme yolu ile elde edilen numuneler sakin havada (oda koşullarında) sepet içerisinde soğutulmuştur. Soğuyan her bir numune için şu çalışmalar yapılmıştır;

- Isıl işlem uygulanması
- Her bir numune parçasının alaşım kompozisyon değeri
- Matkap ile talaş kaldırma (işlenebilirlik)
- Talaş kaldırırken oluşan delme kuvvetinin ölçümü
- Talaş kaldırılan yüzeyin, yüzey pürüzlülük ölçümü ve
- Delme prosesi sırasında elde edilen talaş yapılarının incelenmesidir.

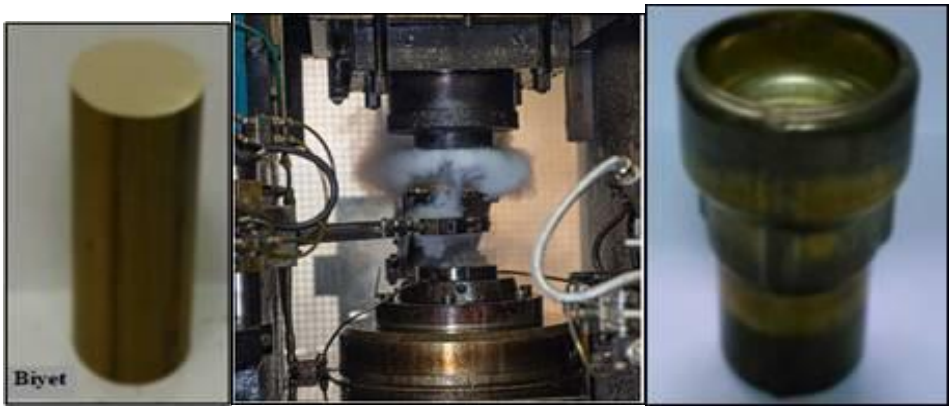
BULGULAR

Şekillendirilen test parçaları üzerinde yapılan işlenebilirlik testleri ve elde edilen test sonuçları aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Test Numunelerinin Şekillendirilmesi

400 ton basma kuvvetine sahip Farmbrass marka hydraulik pres kullanılmıştır. Öncelikle 5,5m boyundaki çubuklar 35cm uzunluğunda olacak şekilde (biyetler)[2] kesilmiştir.

Test numuneleri TS EN 12165 and TS EN 12420 standartları kapsamında şekillendirilmiştir. Dövme parametreleri; sıcaklık için 725°C, basınç değeri için 250ton ve 270ton olarak belirlenmiştir. Toplamda 12 adet elde edilen parçanın sahip olduğu geometrisi aşağıda Şekil-5'te paylaşılmıştır.



Şekil 5. Sıcak Dövülen Pirinç Alaşımlarına Ait Geometri

Soğuyan test numunelerine 550°C ve 2 saat süresince ısıl işlem uygulanmıştır. Alaşımların kompozisyon değeri incelendikten sonra işlenebilirlik test çalışmaları başlatılmıştır.

[2] Biyet: Ara mamül olarak üretilen çubuklardan kesilerek ürünün uygun geometriyi alacağı boyuta (kalıp geometrisine bağlı olarak hesaplanarak) elde edilen parçadır.



Şekil 6. Çalışmada Kullanılan AFC Holcroft CQI9

Marka Isıl İşlem Fırını

Endüstride, sıcak dövme ile şekillendirilen pirinç alaşım ürünlerine ısıl işlem uygulanmaktadır. Sonrasında talaşlı imalat proseslerine tabi tutulurlar. Isıl işlemin uygulamanın en büyük sebebi; korozyonu önlemek yani çinkosuzlaşma direncini artırarak, korozyon derinliğini azaltarak ürünlerin standartlar kapsamında kalması sağlanmaktadır. Bu çalışmada bu sebeple ısıl işlem uygulanması gerçekleştirilmiştir (Özhan Doğan; 2020).

Kimyasal Kompozisyon

Thermo Scientific Niton XL2 980 Goldo model spektral analiz cihazı ile 6 test numunesinin kimyasal kompozisyon değerleri elde edilmiştir. Aşağıda yer alan Tablo-6'de test numunelerine ait verilen kodlar ve her bir numunenin kompozisyon içeriği paylaşılmıştır.

Tablo 5. Ölçülen Kimyasal Kompozisyon Değerleri

Alaşım Adı (EN No)	Test Numune Kodu	ALAŞIM İÇERİSİNDEKİ ELEMENT ORANLARI (%)							
		Cu	**Pb**	**Al**	**Fe**	**Sn**	**Ni**	**Zn**	**Other**
CW614N	a.1	58,025	2,129	0,037	0,214	0,126	0,261	39,020	0,188
	a.2	58,011	2,127	0,036	0,223	0,132	0,259	39,023	0,189
	a.3	58,024	2,125	0,036	0,221	0,127	0,258	39,031	0,178
	a.4	58,014	2,125	0,038	0,219	0,128	0,257	39,035	0,184
	a.5	58,019	2,130	0,034	0,224	0,132	0,258	39,023	0,180
	a.6	58,022	2,127	0,033	0,223	0,133	0,256	39,021	0,185
CW622N	b.1	55,067	1,274	0,058	0,189	0,155	0,171	43,005	0,089
	b.2	55,063	1,285	0,059	0,181	0,156	0,168	43,010	0,087
	b.3	55,054	1,281	0,058	0,194	0,152	0,175	43,007	0,087
	b.4	55,049	1,257	0,146	0,164	0,132	0,175	43,001	0,076
	b.5	55,051	1,255	0,152	0,162	0,130	0,168	43,005	0,077
	b.6	55,048	1,257	0,153	0,161	0,132	0,171	43,003	0,075

Delme Prosesi

İşlenebilirlik testi için FELLER C-30 CNC Torna cihazı kullanılmaktadır. Ø10mm matkap çapı ile 1000rpm dönme hızı ve 300mm/sn ilerleme parametreleri belirlenerek tüm test parçalarına delik delme işlemi uygulanmıştır. Her numune için tek kullanılacak yani toplamda 12 farklı karbür matkap ucu kullanılmıştır. Bunun yanı sıra; kesme kuvvetini cihaz üzerine entegre edilmiş Smart-ESIT marka Load-Cell kullanılmıştır.

35cm uzunluğundaki parça geometrisine 30cm ilerlenerek delme işlemi esnasında ölçülen delme kuvveti aşağıda Tablo-7'da paylaşılmıştır.

Tablo 6. CW614N Alaşımında Delme Prosesi Esnasında Ölçülen Delme Kuvveti

Alaşım İsmi	Test Numune Kodu	Ölçülen Delme Kuvveti (kgf)
CW614N	a.1	0,87
	a.2	0,92
	a.3	0,89
	a.4	0,94
	a.5	0,97
	a.6	0,96
CW622N	b.1	2,17
	b.2	2,09
	b.3	2,15
	b.4	2,24
	b.5	2,26
	b.6	2,26

Yüzey Pürüzlüğü

Mitutoya SJ-400 marka yüzey pürüzlülük ölçme cihazı kullanılmıştır. Talaşı kaldırılan yüzey üzerinde ölçülen pürüzlülük değerleri aşağıda Tablo-7'de paylaşılmıştır.

Tablo 7. Ölçülen Pürüzlülük Değerleri

Alaşım Adı	Test Numune Kodu	Ölçülen Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra, µm)
CW614N	a.1	1,49
	a.2	1,53
	a.3	1,47
	a.4	1,14
	a.5	1,17
	a.6	1,16
CW622N	b.1	2,53
	b.2	2,62
	b.3	2,57
	b.4	2,23
	b.5	2,19
	b.6	2,26

Talaş Yapısı

Her bir numuneye ait delme prosesi ile elde edilen talaş yapıları incelenerek en büyük ve en küçükleri ölçümlenmiştir. Kurşunlu pirinç alaşımına (CW614N) ait talaş yapıları aşağıda Tablo-9'da paylaşılmıştır.

Tablo 8. CW614N Alaşımına Ait Elde Edilen Talaş Yapıları

Ala-şım Adı	TALAŞ YAPILARI					
CW614N	**a.1**	**a.2**	**a.3**	**a.4**	**a.5**	**a.6**
						

Kurşunsuz pirinç alaşımına (CW622N) ait talaş yapıları aşağıda Tablo-10'da paylaşılmıştır.

Tablo 9. CW622N Alaşımına Ait Elde Edilen Talaş Yapıları

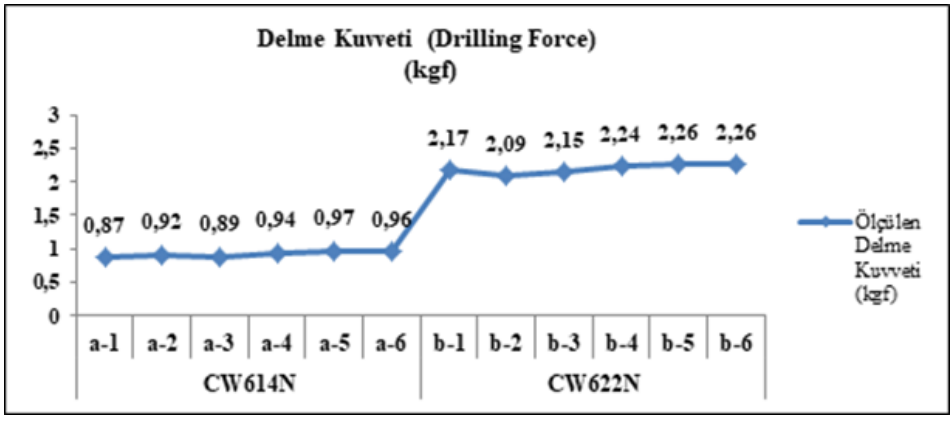
Ala-şım Adı	TALAŞ YAPILARI					
CW622N	**b.1**	**b.2**	**b.3**	**b.4**	**b.5**	**b.6**
						

TARTIŞMA

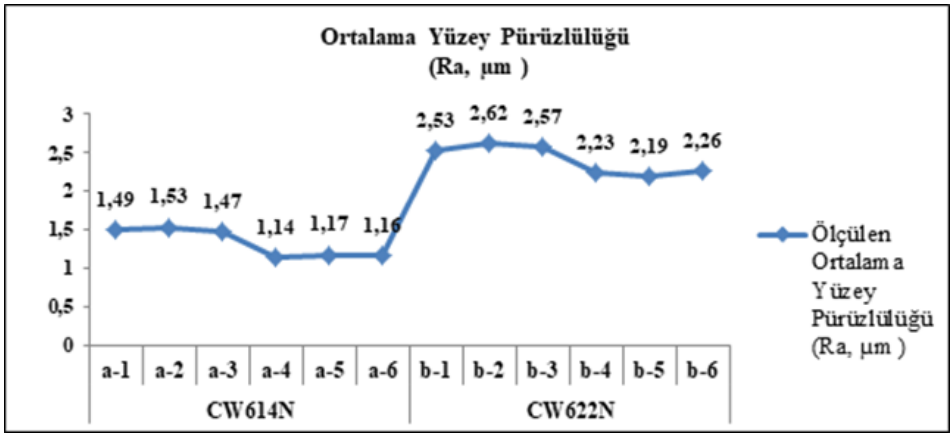
Tablo-6'da elde edilen element değerleri Tablo-3 ile karşılaştırıldığında; tüm numunelerin sahip olması gereken alaşımları içerisindeki element yüzde değerleri arasında olduğu yani standart kapsamında bulundukları tespit edilmiştir. Tablo-7'de elde edilen delme kuvvetleri kıyaslandığında; kurşunlu pirinç alaşımlarında oluşan delme kuvvet değerlerinin kurşunsuz alaşımlara göre daha az olduğu tespit edilmiştir.

Tablo-8 incelendiğinde; yüzey pürüzlülük değerleri, kurşunlu pirinç alaşımlarının daha az değerlerde olup yüzey düzgünlüğü açısından çok daha iyisi elde edildiği saptanmıştır.

Tablo-9 incelendiğinde; elde edilen talaş yapılarının uzun olmadığı ve 2.5-6mm arasında değiştiği elde edilmiştir. Tablo-7 incelendiğinde; elde edilen talaş yapılarının uzun olmadığı ve 2.3-5mm arasında değiştiği elde edilmiştir. Kurşunsuz pirinç alaşımın talaş açılarının, kurşunlu pirinç alaşımına göre daha geniş olduğu görülmüştür. Talaşlı imalat bakımından en uygun talaş yapıları, kısa spiral, geniş açılı olmayan ve helisel şekilli olanlardır. Elde edilen bu yapılar işlenebilirlik açısından kabul edilebilmektedirler. Aşağıda verilen Grafik-1 ve Grafik-2'de, elde edilen işlenebilirlik test verilerinin kıyaslanması mevcuttur.



Grafik 1. Delik Delme Prosesi Sırasında Ölçülen Delme Kuvvet Değerleri



Grafik 2. Delme Sonrası İşlenen Yüzeyde Ölçülen Ortalama Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Grafik-1 ile daha net kıyaslanacak olursa; kurşunlu pirinç alaşımı olan CW614N (CuZn39Pb3) ve kurşunsuz pirinç alaşımı olan CW622N (CuZn43Pb1Al) malzemelerde talaş kaldırma sırasında ölçülen değerlerde yaklaşık %13 farklılıklar vardır. CW614N kurşunlu alaşımların daha rahat yani az kuvvet uygulanarak talaş kaldırıldığı elde edilmiştir. Dövme basıncı 270 değerinde elde edilen test numuneleri kendi grubunda değerlendirildiğinde; ölçülen delme kuvvetinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde; kurşunsuz pirinç alaşımı olan CW622N malzemesinde elde edilen değerlerin daha yüksek olduğu yani, kurşunlu alaşımların yüzeylerine göre yaklaşık %0,7 oranında daha pürüzlü olduğu tespit edilmiştir. Yine dövme basıncı yüksek olarak (270ton basınç altında üretilen) şekillendirilen numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin kendi alaşımı içerisinde değerlendirdiğimizde daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu düşük değer onların daha pürüzsüz olduğu anlamı taşımaktadır.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Kurşunlu ve kurşunsuz pirinç alaşımlarının talaş yapıları karşılaştırıldığında; birbirlerine karşı üstünlükleri bulunamadı. Bununla birlikte, kurşunlu pirinç alaşımı CW614N, ölçülen delme kuvvetinin küçüklüğü ve küçük yüzey pürüzlülük değerleri açısından üstündür.

Alaşımın işlenebilirlik kabiliyetini; alaşım içerisindeki kurşun element miktarının artışı doğrudan olumlu etkilemektedir. Bu sebeple işlenebilirlik açısından kıyaslandığında alaşım içerisindeki kurşun eksikliği; yüzey pürüzlülüğü ve delme

kuvvetini olumsuz etkilemektedir. Kurşunsuz pirinç içerisindeki Al elementi alaşıma sertlik kazandırmış olup talaş yapısında kurşunlu pirinç alaşımının önüne geçemese de kabul edilebilir bir yapıya sahip olmuştur.

Kompozisyonlar değerlendirilirken tüm numuneler standart kapsamında olmasının yanında özellikle Sn, Fe ve Al element oranlarında oldukça farklılıklar tespit edilmiştir. Bu farklılıklar göz önünde tutulduğunda; dövme basıncının, delme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğündeki farklılıklara doğrudan etkisi bu çalışmada tespit edilememiştir.

İnsan sağlığına zararlı olan kurşun element en aza indirilmelidir. Bu doğru yaklaşımla kurşunsuz alaşımlarda bulunan element oranları üzerine çalışmaların yoğunlaştırılması ve geliştirilmesi (veya yeni alaşımların elde edilmesi) gerekir. Yeni ve mevcut kurşunsuz pirinç alaşımlarında kompozisyon içerisindeki oranlarının etkileri; hem üretilebilirlik, hem çinkosuzlaşma direnci, hem de işlenebilirlik açısından ayrı ayrı incelenmelidir.

KAYNAKÇA

Bayraktar Ş., Siyambaş Y., Turgut Y.; (2017); "Delik Delme Prosesi: Bir Araştırma"; Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi; Cilt 21, Sayı 2, Sayfa 120-130.

Callcut V.; (1996); "The Brass Properties&Applications"; CDA Publication; No. 121, P 42.

Copper – The Vital Metal; Copper Development Association; 1998; 121.

Caron RN., Sharif A.; (2017); "Alloy and Temper Designation"; Materials Science and Materials Engineering.

Claesson E., Rod O.; (2016). Claesson, E.Rod, O., "The effect of alloying elements on the

corrosion resistance of brass", Materials Science and Technology (United Kingdom); 32(17):1794-1803).

Degarmo P.E., Black J.T., Kohser R.A.; (2003); "Materials and Processes in Manufacturing" (9th ed.); pp.16.

EN 12167:(1998), "Copper and Copper Alloys": Profiles and Rectangular Bar for General Purposes.

Estelle A.A.; (2016); "Drinking water lead regulations: impact on the brass value chain"; Materials Science and Techonology, Pages 1763-1770.

Fan L., Zhao S., Wang, H., Zhang S.; (2011); "Inhibition of brass corrosion in sodium chloride solutions by selfassembled silane films"; Corrosion. Science.; Volume 53, Pages 4273–4281.

Garcia P.; (2010); "Comparative study of the parameters influencing the machinability of leaded brasses". J. Eng. Fail. Anal. 17, 771-776 .

Heidarzadeh A., Saeid T.; (2015); "On the effect of β phase on the microstructure and mechanical properties of friction stir welded commercial brass alloys"; Volume 5, Pages 1022–1025.

Kuyucak S., Sahoo M.,; (1996); "A Review of the Machinability of Copper-Base Alloys"; Canadian Metallurgical Quarterly; Volume 35, Issue 1, Pages 1–15.

Lovisek, Liptakova, Dundekova, Katarina; (2016); "Characteristics of Al-brass Affecting Degradation Process", In 32nd Danubia Adria Sysposium on Advanced in Experimental Mechanics, Materials Today: Proceedings 3(4):1051-1055.

Lytle, D.A., Schock, M.R.; (1996); "Stagnation Time, Composition, Ph, and Orthophosphate", Effects on Metal Leaching from Brass. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US EnvironmentalProtection Agency, Cincinnati, Ohio, USA.

Nobel C., Klocke F., Lung D., Wolf S.; (2014); "Machinability Enhancement of Lead-Free

Brass Alloys; 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting"; HPC; Procedia CIRP 14 95 – 100.

Özhan Doğan S., Ekici B.; (2020); "The Effect of Hot Forging Pressure and Heat Treatment on CW625N Lead Free Brass Alloy Dezincification Resistance"; Acta Physica Polonica A; Volume 137 (4) Pages 545-550

Schultheiss F., Johansson D., Bushlya V., Jinming Z., Nilsson K., Ståhl JE.; (2017); "Comparative study on the machinability of lead-free brass", Journal of Cleaner Production V:149 P:366-377.

Toulfatzis A.I., Pantazopoulos G.A., Paipetis A.S.; (2014); "Fracture Behavior and Characterization of Lead-Free Brass Alloys for Machining Applications", Journal of Materials Engineering and Performance; V 23, P 3193-3206.

TS EN 12420, “Bakır Ve Bakır Alaşımları Dövme Standartları”

TS EN 12164, “Bakır ve Bakır Alaşımları – Otomat Çubukları”

TS EN 12165, “Bakır ve Bakır Alaşımları – Biçimlendirilmiş ve Biçimlendirilmemiş Dövme Taslağı”

UNEP, (2010)., “Final Review of Scientific Information on Lead. United Nations Environment Programme”, Chemicals Branch DTIE.

Vilarinho C., Davim J.P., Soares D., Castro F., Barbosa J.; (2005); “Journal of Materials Processing Technology”; Influence of The Chemical Composition on the Machinability of Brasses; Volume 170, Issues 1–2, Pages 441-447.

BÖLÜM 26
MARMARAY DEMİRYOLU HATTINDA RAY KUSURLARININ ULTRASONİK YÖNTEMLE İNCELENMESİ VE RAY KUSURLARININ YOĞUNLAŞTIĞI HAT KISIMLARININ TESPİTİ

Mak. Yük. Müh. Osman KILIÇ[1], Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA[2]
[1]TCDD Marmaray İstanbul / TÜRKİYE.
[2]Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İstanbul / TÜRKİYE

Öz: Demiryolu trafiğinin yoğunlaşması, trenlerin daha hızlı olması ve dingillerin üzerlerine düşen kuvvetlerin artması ile raydan artan bu yük ve kuvvetler karşısında beklentilerde artmıştır. Raylardan ileri gelen kusurlar çok önemli hale gelmiş; rayların kusurlara ve süreksizliklere karşı kontrol altına alınması ve düzenli olarak bakımlarının olması gereken zamanda yapılma zorunluluğu doğmuştur. Düzenli kontrolleri veya kusurlarının tespitleri yapılamamış raylardaki bu kusurlar; yatay, düşey ve boyuna kuvvetler etkisinde ilerleyerek, rayların kırılmasına bunun sonucu olarak ölümlü kazalara kadar birçok problemlerin nedeni olmaktadır. Bu sebeple güvenli bir demiryolu işletmeciliği için rayların kontrollerinin belli bir sisteme göre yapılması gereklidir. Raylarda oluşabilecek kusurların tespiti kullanılan en önemli yöntem raylara zarar vermeden uygulanacak kontrol yöntemleridir. Yüksek güvenirliği, yaygın kullanımı, kolay uygulanabilir olması ve etkin olması gibi nedenlerden dolayı ultrasonik muayene yöntemi tercih nedeni olmaktadır. Ultrasonik yöntem kullanılarak Marmaray hattında (Kazlıçeşme - Ayrılık Çeşmesi) oluşan ray kusurlarının tespit edilmesi ve bu tespit edilen ray kusurlarının özelliklerini ve rayın hangi kısımlarında oluştuğu ve hattın hangi kısımlarında yoğunlaştığı incelenmiştir. Ayrıca ray kusurlarının oluşmasına sebep olan raya etkiyen yükler ve ray gerilmeleri hakkında bilgi verilmiştir. Ray kusurlarının neler olduğu detaylı bir şekilde resimlerle desteklenerek açıklanmış ve bu kusurların tespitine yönelik yöntemlerden bahsedilmiştir. Ray kusurlarını tespit etmek için yaygın bir şekilde kullanılan tahribatsız muayene yöntemleri anlatılmıştır. Tahribatsız muayene yöntemlerinin tanımı, önemi ve neler olduğu detaylı bir şekilde

açıklanmıştır. Tahribatsız muayene yöntemlerinden ultrasonik muayene yönteminin temel prensibi ve muayene tekniklerinden bahsedilmiştir. Marmaray hattında, Kazlıçeşme – Ayrılık Çeşmesi arasında rayların ultrasonik muayenesi Roger 400 adlı demiryolu hata tespit aracılığıyla yapılmış ve ultrasonik ölçümün sonuçları istasyonlar arasındaki demiryolu hat kesimi bazında değerlendirilmiştir. Tespit edilen ray ve kaynak kusurlarının boyutu, bulunduğu bölge ve hat üzerinde hangi kilometrelerde gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu kusurların hangi tür ray kusurları olabileceği hakkında değerlendirmeler yapılmıştır.

GİRİŞ ve KURAMSAL ÇERÇEVE

Raylar demiryollarının esas bileşenini oluşturmaktadır. Raylarda oluşan aşınmalar demiryollarının performansını, kalitesini ve bakım maliyetini önemli ölçüde tesir etmektedir (Esveld, 2001). Rayların sistemli olarak kontrol edilip bakımının yapılması durumunda, raylarda oluşan aşınma ve bozulmalar tehlikeli hale gelmeden belirlenmekte ve bu bozulmalara erken müdahale edilebilmektedir (Sadeghi, Akbari, 2006). Aynı zamanda düzenli kontrol ileri bakım planı yapılabilmeyi mümkün kılmaktadır. Bu şekilde demiryollarının güvenliği temin edilip ve bakım maliyeti düşmektedir.

Tüm çalışan malzemeler gibi, demiryollarında çalışan rayların da zamanla işlerliğini kaybedecek şekilde ciddi bir şekilde eğilmelere, kaymalara ve tekerlekler ile raylar arasındaki temasların yol açtığı gerilmeler, plastik deformasyonlara ve aşınmalara uğramaktadır (Ferreira, Murray, 1997). Raylara etki eden bu tip kuvvetli gerilmelerin sonucu olarak raylardaki kusurlar oluşmaktadır (Integrated Study of Rolling Contact Fatigue, 1999). 1,5 asır öncesinden beri raylarda oluşan kusurlar demiryollarında ciddi bir sorun olarak görülmektedir. Hatlarda yapılan kontrollerin eksikliği yetersizliği veya hiç yapılmaması sonucunda özellikle yoğun demiryolu trafiği olan hatlardaki raylarda bulunan kusurlar her yönde ilerleyebilmekte ve raylarda kırıklar oluşturmaktadır. Raylarda oluşan bu kırıklar, nadir olarak trenin raydan çıkmasına (deray) neden olmaktadırlar (Papaelias, Roberts, Davis, 2008).

Rayda oluşan kusurların ilerlemesine engel olmak, raylarda oluşabilecek kırılmaları en aza indirebilmek, hatların güvenliklerini olabilecek en iyi noktalara getirmek, rayların periyodik kontrol ve bakım prosedürlerini verimli hale getirmek, bu konularda oluşabilecek tüm maliyetleri azaltmak veya kaza oluşmasını

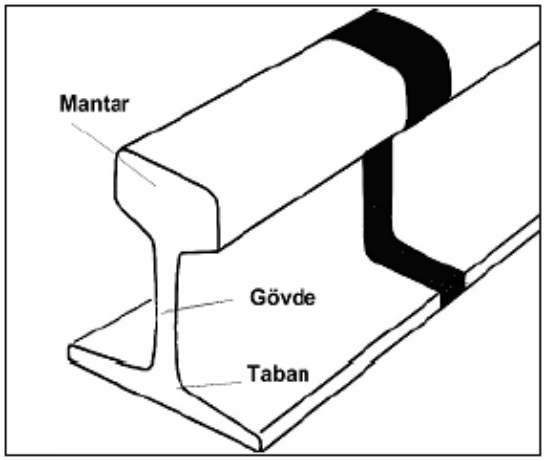
önlemek için rayların bir düzen içinde kontrollerinin yapılması gereklidir. Rayların etkin kontrol edilmesi, koruyucu ve kestirimci bakım prosedürlerinin uygulanması ile olası ray kırılmalarının ve trenin raydan çıkmasının riski en aza düşürülebilir (Papaelias, Roberts, Davis, 2008). Hatlardaki rayların kusurlarının ortaya çıkarılması için etkin olan yöntemler içinde en iyisi olan yöntem tahribata yol açmadan yapılan muayenelerdir. Tahribata neden olmayan yöntemlerin kullanılması ile rayların içlerinin ve yüzeylerinin tüm olası kusurları doğru, güvenilir ve etkin olarak kontrol edilebilir. Tahribata neden olmayan yöntemlerden ultrasonik yöntem kullanılarak hatlar arası ray kusurları net olarak tespit edilebilmiş ve sınıflandırılabilmiştir (Yalçınkaya, kılıç, 2019). Tahribata neden olmayan yöntemlerin kullanılmasının kuvvetli yanı ise demiryolları üzerindeki olağan akışı engellemeyecek şekilde trenlerin olmadığı veya çok seyrek olduğu saatlerde belli bir hızda seyir halinde yöntemin uygulanmasına olanak vermesidir (Federal Railroad Administration, 2015).

Raydaki kusurların belirlenmesi, demiryolu endüstrisinin karşılaştığı problemleri çözmesi açısından önemli noktalardan bir tanesidir. Muayene ve izleme ekipmanlarının kullanılmasının yaygınlaşması demiryolu güvenliğinin artırılması ve ömür maliyetlerini azaltarak demiryolları hatlarının gelişimine büyük katkı sağlamaktadır. Maksimum ve en güvenilir demiryolu işletimi, bakım ekipmanlarının doğru zamanda ve doğru yerde kullanılmasıyla sağlanabilir (Merve, Atila, Umut, Şenol 2013).

Geleneksel olarak raylardaki bozulmalar eğitimli bir kişi tarafından elle muayene edilerek tespit edilirdi. Bu muayene yavaş ve tehlikelidir. Aynı zamanda kişinin algısına göre değişebilir. Bu sebeplerden dolayı görsel ve ultrasonik sensörler kullanılarak raylardaki bozulmalar tespit edilmeye çalışılmıştır (Li, Ren, 2012).

Ray Gerilmeleri ve Raya Etkiyen Yükler

Günümüzde, trenlerin artan hızları ve sefer sayılarıyla beraber yükleri rayların karşı karşıya olduğu statik ve dinamik yükleri artırmıştır. Aynı doğrultuda rayların da bu yükleri kaldırabilecek şekilde olmaları gerekmektedir. Aşağıda Şekil 1'de ray bölümleri verilmiştir (Kökçe, 2002).



Şekil 1. Ray Bölümleri

Raylar, üretimleri ve demiryollarında kullanımları süresince yanal, boyuna ve dikey yönlerden gelen yüklere maruz kalırlar.

Tren raylarının, tüm süreçler boyunca karşılaştığı etki ve kuvvetler:

1. Ray üretimindeki doğrultma işleminden kaynaklanan iç gerilmeler,

2. Düşey dingil yükleri,

3. Tren hareketi doğrultusundaki kuvvetler,

4. Hat yüzeyi ve hat geometrisi bozulmalarından kaynaklanan dinamik kuvvetler,

5. Ortan sıcaklıklarının değişiminin yol açtığı boyuna kuvvetler,

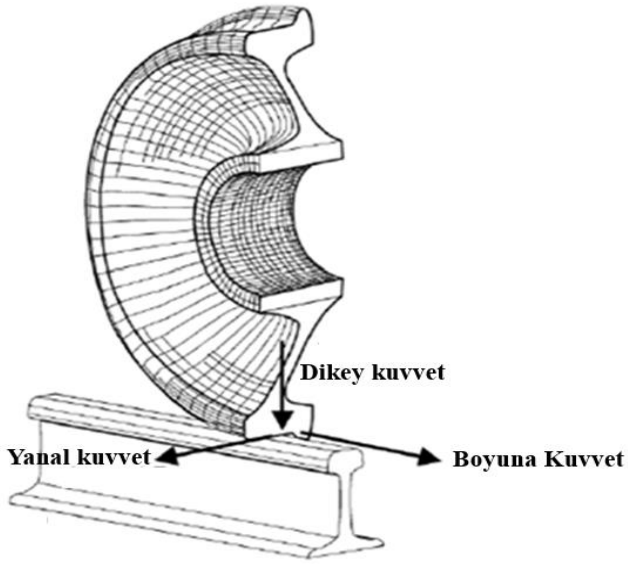
6. Trenin Hızlanması ve frenlemesinden kaynaklı boyuna kuvvetler,

7. Rayların bulunduğu iklim şartların yol açtığı etkilerdir.

Bu yüklerin yol açtığı gerilmeler; rayın üretimin aşamasında doğrultulması sırasında oluşan kalıntı gerilmeleri, düşey dingil yüklerinin neden olduğu eğilme gerilmeleri, uzun kaynaklı rayların sıcaklığın etkisi nedeni ile oluşan termal gerilmelerdir. Ayrıca tekerlekler ile raylar arasındaki temas kuvvetlerinin sonucunda rayların mantarında oluşan temas gerilmeleri ve yüksek frekanslı darbe yükleri nedeniyle oluşan dinamik gerilmeleridir (Esveld, 2001).

Raylara etki eden yükler ve raylarda ortaya çıkardıkları gerilmeler; bunlar rayların kesitlerinin üzerinde boyunca, dikey doğrultuda ve eni boyunca ilerler.

Bu kuvvetler aşağıda Şekil 2'de gösterildiği gibi; Boyuna doğrultu; raydaki yuvarlanmanın olduğu yüzeyin uzunluğu boyunca etkiyen kuvvetleri, enine doğrultu; rayın genişliğince etkiyen kuvvetleri ve düşey doğrultu; rayın dikine etki eden kuvvetleri tanımlamaktadır (Esveld, 2007).



Şekil 2. Raya Etkiyen Kuvvet Yönleri

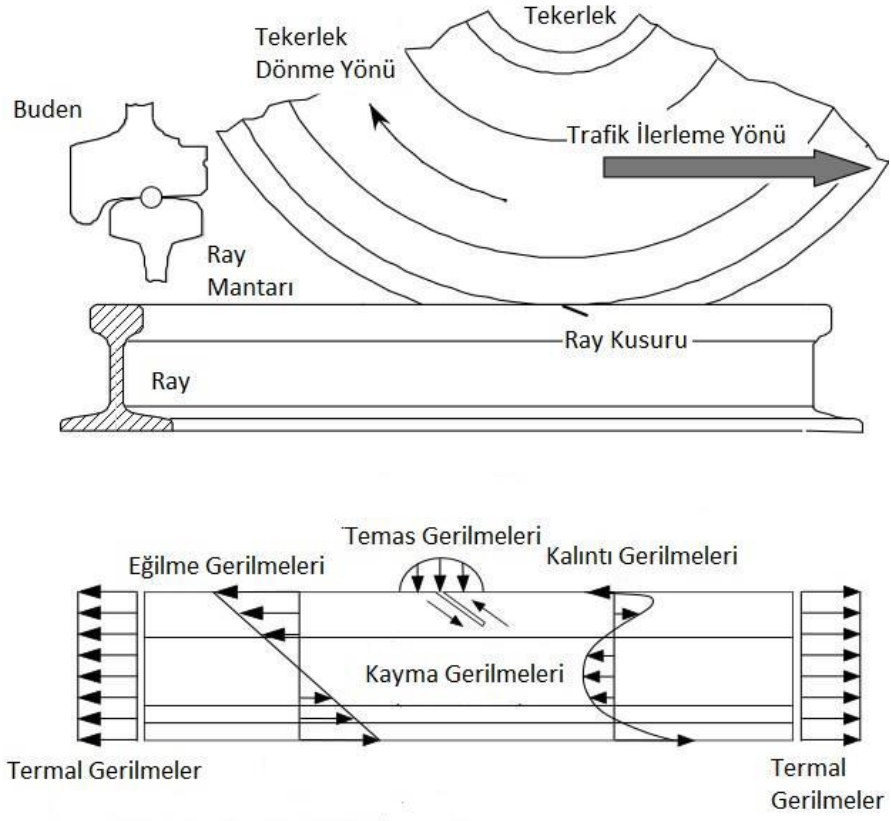
Raylara etki eden yüklerin, raydaki gerilmelerin ve bu gerilmelerin neden olduğu raylarda oluşan kusurların doğru olarak anlaşılmasının en iyi yöntemi raylarda oluşan kusurların en çok görüldüğü ray bölümlerinin incelenmesi ile mümkündür (Esveld, 2007).

Ray Gerilmeleri

Rayın imalatı esnasında ve sıcaklık değişimi gibi çevresel etkiler sebebiyle raylarda dikey, yanal ve boyuna olan kuvvetlerin sonucunda raylarda birçok gerilmeler meydana gelir.

Dikey yük rayda eğilme gerilmelerine neden olur; bunlar ray mantarında itme gerilimi, ray tabanında ise çekme gerilmeleridir. Dikey yük nedeniyle ray gövdesinin ezilmesi sonucu, ray mantarında ayrıca eğrilme-çekme gerilimleri oluşur. Yuvarlanma yüzeyi temas gerilimi, ek bir itme gerilimi olarak belirir. Isının normal ısının üzerinde veya altında oluşuna göre, rayda ayrıca itme veya çekme gerilimleri oluşur (Lichtberger, 2011).

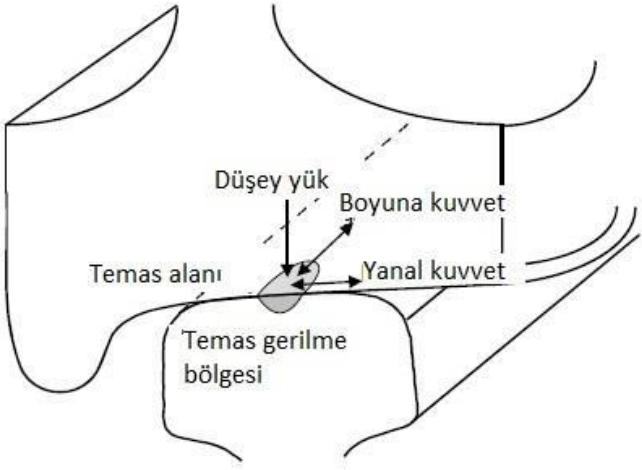
Rayda gerilmeler, özel olarak boyuna olan yönde birbirlerine eklenmek sureti ile raylarda önemli etkiler meydana getirir. Eğilme nedenli gerilmeler, kalıntı nedenli gerilmeler ve ısısal gerilmeler; demiryolunun tasarımında ciddi bir etkenken, tekerlek ile ray arasındaki temasın yol açtığı gerilmeler rayların bakımları süreçlerinde etkindirler. Rayların yorulmaları sonucu oluşan kusurlar esas olarak tekerlekler ile rayların temasları sonucu oluşan gerilmelerin, eğilme gerilmelerinin ve kayma gerilmelerinin etkilerinin sonucunda meydana gelir. Temas nedenli gerilmeler; raylarda yorulma kusurlarının, yüzey kusurlarının ve aşınma problemlerinin nedenidir. Raylarda oluşan kusurların oluşmasında etkin olan ray gerilmeleri aşağıda Şekil 3'te verilmiştir. (Zerbst, Lunden, Edel, Smith, 2009).



Şekil 3. Örnek Ray Kesiti Üzerinde Ray Gerilmeleri

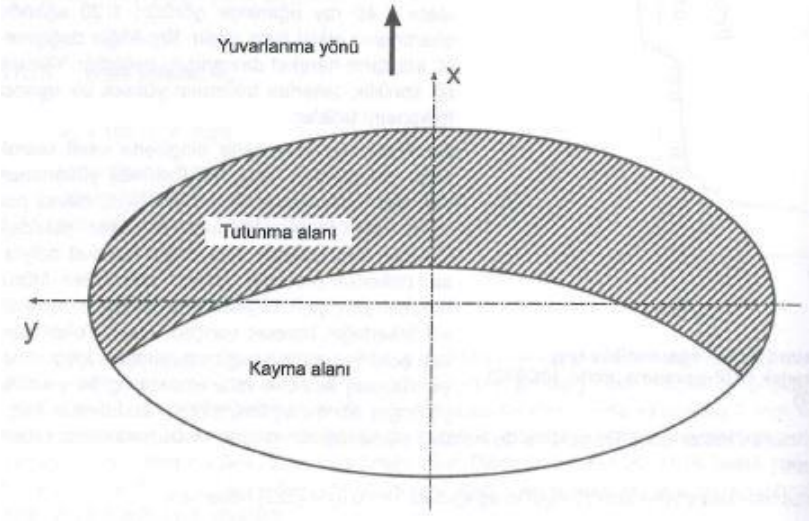
Tekerlek-ray temas gerilmeleri: Demiryolu araçlarının raydan geçişinde, tekerlekler ile ray arasındaki temastan dolayı oluşan Şekil 4'te gösterilen kuvvetler,

temas gerilmelerine yol açar. Bu temas gerilmeleri çok büyük değerlere ulaşabilir (Kerr, 2012).



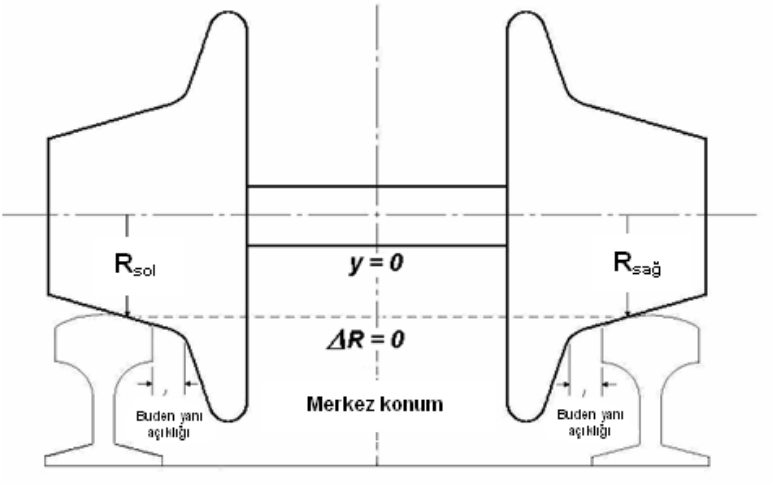
Şekil 4. Tekerlek-Ray Temas Alanı

Tekerlek ray üzerinde hem yuvarlanır hem de kayar. Temas alanlarının bir bölümünde bu çift birbirine tutunur, bir başka bölümünde ise kayar. Temastaki ikilinin malzemesi çok yüksek kuvvetlere maruz kalmaktadır; bunlar sınır alanlarda malzemede akma ve doku değişikliklerine neden olurlar. Bu durum aşağıda Şekil 5'te gösterilmiştir (Lichtberger, 2011). Bununla bağlantılı olarak ortaya çıkan malzemenin sertleşmesi olgusu, aslında demiryolu işletmeciliğini mümkün kılan olgudur.

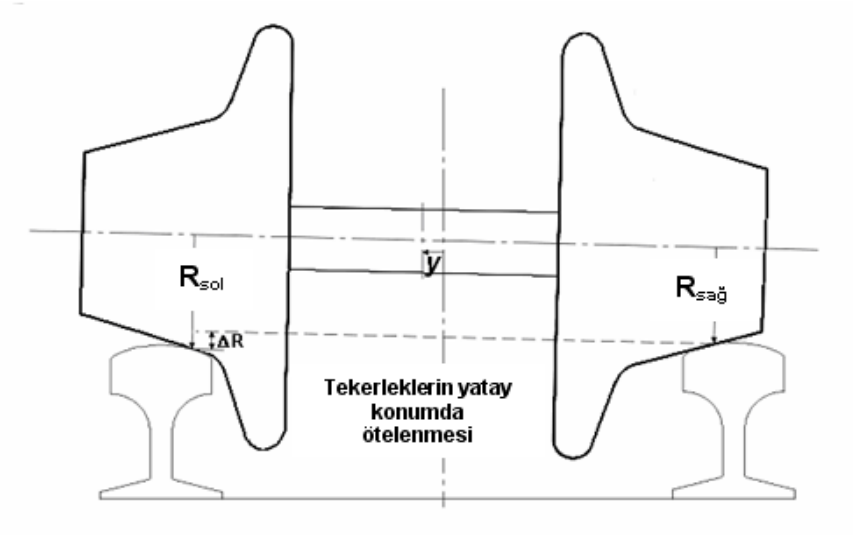


Şekil 5. Tekerlek Ray Temas Alanı Şematik Gösterimi

İlk olarak Hertz 1880 yılında tekerlek ile ray arasındaki temas alanlarını tanımladı. Temas alanını bir elips şeklinde olduğunu ortaya çıkardı. Tekerleğin, ray mantarının yarıçapı, her ikisinin birbirlerini etkiledikleri pozisyonu ve temasta bulundukları alanı dikey olarak etkiyen yüke bağlı olarak temas alanının boyutları farklılık göstermektedir (Doyle, 1980)



Şekil 6. Aliymanda Tekerlek-Ray Teması



Şekil 7. Kurbda Tekerlek-Ray Teması

Aliymanda (düz yol), tekerlek ray teması merkezidir. Yukarıda Şekil 6'da gösterildiği gibi tekerleklerle raylar arasındaki temas noktası tektir. Aliymanda

bulunan bir noktadan olan temas nedeniyle gerilmeler ray mantarı merkezine doğru artar. Demiryolu hattının kurblu taraflarında tekerleklerle raylar arası temas yukarıda Şekil 7'de gösterildiği gibi 2 noktada oluşabilir. Bu durumun sebebi, ortaya çıkan yanal kuvvetler nedeniyle tekerlek budeninin ray mantarına temasıyla meydana gelir.

Tekerlekler ile raylar arasındaki temastan kaynaklı gerilmeler, yorulmalar ray kusurunun oluşmasına neden olan unsurların en büyüğüdür. Sayısız defa olan tekerlekler ile raylar arası teması, ray malzemesinde yorulma kusurları oluşturur ya da raylardaki kusurlar yorulmanın sonucu zamanla büyür. (Esveld, 2007).

Eğilme Gerilmeleri: Tekerleğin rayın yüzeyinden geçtiği sırada oluşan kuvvet sonucunda raylarda dikey ve yanal eğilme gerilmeleri meydana gelir. Bu dikey yükler aynı zamanda tekerlek rayların hareketini engelleyen traverslerin arasındayken dikey yüne doğru eğilmesine sebebiyet verir. Eğilme gerçekleştiği zaman rayın taban bölümünde boyuna çekme gerilmeleri oluşur. Dikey kuvvetlerin sebebiyet verdiği başka etkisiyse ray mantarının, ray gövdesi üstüne dikey yönde eğilmesidir. Yanal tekerlek yükleri, ray mantarının, ray taban pozisyonuna nispetle yanlara doğru hareketlenmesine sebebiyet verir. Böyle bir hareket sonucunda ray gövdesinde çekme gerilmeleri oluşur. Yanal yüklerin sebep olduğu eğilme gerilmeleri ray yorulma kusurlarının oluşmasına sebep olabilir.

Termal Gerilmeleri: Termal etkiler, ortam sıcaklığındaki değişimlerle birlikte mekanik etkilere, tren hareketine bağlı olarak boylamasına kuvvetler meydana gelir. Absorbe edilecek olan mekanik kuvvetler ivmeyle, çekme kuvvetiyle veya trenin yavaşlaması veya fren yapması sırasında meydana gelir.

Ayrıca ray üzerinde çalışan trenler ek ray kaymasına neden olurlar. Bu kayma hareketi yoldaki birleştirmeler veya geçitler gibi sabit noktalarla engellendiğinde boylamasına yönde önemli basınç kuvvetleri meydana gelebilir. Raylar üzerindeki biriken gerilimlerin termal yüklere dönüşmesi ile ray üzerinde bağlı olan ray bağlantı elemanlarını zorlamaktadır. Özelikle balastlı hatlarda, yanal direncin az olan zayıf kesimlerinde sıcaklığın etkisi ile dirsekler yaparak tren seferlerinin yapılmasını engeller veya durdurabilir. Sert raylarda da conta kaynaklarının kırılmaları, atmosferik değişimlerden dolayı büyük değişimlere maruz kalırlar. Yüksek sıcaklıklarda uzamaya, düşük sıcaklıklarda ise büzülmeye meyillidirler. Bağlantılı yolun tersine uzun kaynaklı yol, uzunluktaki değişimi absorbe edemez. Bu nedenle sıcaklıktaki herhangi bir değişim gerilmeye dönüşür. Yapılan kaynakları nominal

sıcaklıkta yapmak gerekir. Nominal sıcaklık değeri İstanbul için 25°C aslında kaynakları bu sıcaklık değerine yakın derecelerde rayları birleştiren conta boşluklarını termit kaynak yapmak gerekirken, bu her zaman mümkün olmaz. Hava şartları, çalışma şartlarından dolayı, örneğin 10°C-15C° derecede farklı ray sıcaklıklarında kaynaklar yapmaktayız. Farklı ray sıcaklık değerlerinde yapılan termit kaynakları gerilmelere yol açar (Bozdağ, Ekşi,Gelişen, 2018).

Kalıntı Gerilmeleri: imalat yöntemleri, parçalarda kalıntı gerilmeler oluşturmaktadır. Kalıntı gerilmeler, parçaya etkiyen dış gerilmelerle toplam bir etkiye sebep olduğundan, imalat aşamalarında veya kullanım sırasında bozulma veya erken hasarlanma riskini artırmaktadır. Kalıntı gerilmelerini ölçmek için çeşitli tahribatlı ve tahribatsız teknikler geliştirilmiş, imalat işlemlerini modelleyerek kalıntı gerilme dağılımını tahmin eden ticari yazılımlar kullanılmaya başlanmıştır (Kaleli, Yelbay, Gür, 2017).

Kalıntı Gerilmeleri, rayların üretimi esnasındaki ısıl işlemler, doğrultma işlemleri ile rayların mantarının sertleştirilme safhalarında meydana gelebilir. Raylar birbirine kaynaklanırken, ray çeliğinin ve kaynak teli malzemesinin genleşme farkı ile büzülme yapılarından kaynaklanan rayların kaynaklanan kısımlarında kalıntı gerilmeleri meydana gelebilir (Kökçe, 2002).

Kalıntı gerilmeleri, rayın birçok kısmında görülebilir, ray kusurlarının oluşmasına sebep olabilir. Rayların taşlaması, ısıl işlem sürecinin neden olduğu ve ray mantarının yüzeyinde oluşan kalıntı gerilmelerini önemli oranda azalmasını sağlar. Rayların kaynaklanması işleminin yol açtığı kalıntı gerilmeleri, yapılan kaynak türü ve soğutma hızı gibi kaynak işlemi parametrelerinden meydana gelir. Tahribatsız ve tahribatlı kontrol yöntemlerinin kullanımı ile kalıntı gerilimlerinin ölçülmesi mümkün olmaktadır.

Kayma Gerilmeleri: Tekerlek yükleri, rayda eğilme gerilmeleri ile birlikte kayma gerilmeleri oluşumuna da sebep olabilir. Kayma gerilmeleri, rayların cebireli olarak bağlandığı durumlarda raylarda cebire delikleri civarındaki kusurların en önemli sebeplerinden biridir. Oluşan olumsuzlar yüzünden günümüzde demiryollarında uzun kaynaklı raylar tercih edilmektedir.

Raylara Etki Eden Yükler

Demiryollarının üst yapısında rayların üzerlerine etki eden yükleri statik ve dinamik olarak iki başlıkta görmekteyiz. Statik olan yükler demiryolu aracının

ağırlığıyla hatların yatay kurba ve makas kısımlarında meydana gelen merkezkaç kuvvetlerinden oluşur. Dinamik yüklerse, hattın geometrik yapısıyla üstyapının bozukluklarının, rayın ve tekerleğin yüzeyi gibi nedenler ile ortaya çıkan yüklerdir.

Statik Yükler: Statik yükler dikey yükler, yanal yükler ve boyuna yükler şeklinde üç ana bileşenden oluşur. Dikey yükler, rayın üstüne etki eden tekerleğin uyguladığı yüklerle meydana gelir. Tekerlere uygulanan bu dikey yükler, demiryollarının üstyapısını teknik olarak belirleyen niteliklerin esas parametrelerdendir. Dingillerin ray üstüne uyguladığı yükler önemli olduğu içim bu konuda genel olarak uygulanan sınırlar yüksek hızlı hatlarda en fazla 200.000 N, karma hatlarda en fazla 225.000 N ve Özellikle Avustralya'daki gibi özel hatlarda en fazla 360.000 N'dur (Lichtberger, 2005).

Raylara gelen dikey yüklerin gerçeği, tekerleğin uyguladığı statik yüklerle, dinamik yükler (Kılıç, 2019) ve darbe yüklerinden meydana gelir. Bu değer tekerleğin uyguladığı statik yükün büyüklüğünden fazladır (Kerr, 2012).

Yanal yükler, statik yükler için değerli bir bileşendir. Yanal yükler, özellikle dönemeçlerde (Kurba) görülür ve bu rayın mantar bölümüne etki eden ana yüklerdendir. Dönemeç yarıçapı azaldığı durumda (kurbun eğriliği arttığı durumda), tren dönemeçten geçerken ciddi boyutta yanal kuvvetler oluşur. Bunun nedeni, trenlerin dingillerinin yapısı gereği tekerlekler ayrı ayrı hareket edemezler. Bunu, dönemeçteki dışta kalan rayın uzunluğu, içte kalan rayın uzunluğundan fazla olduğundan tekerleklerin konikliği ile dengelenir. Kat edilen mesafenin fazla olduğu dışta kalan rayda, tekerlek-ray temas yarıçapı geniş; Kat edilen mesafenin az olduğu içteki rayda tekerlek-ray temas yarıçapı dardır (Zarembski, 2005).

Hat üzerinde aşağıda belirtilen boyuna yükler oluşabilir;

- Rayların ısıdan kaynaklanan boy değişikliklerinin engellenmesi dolayısıyla oluşan ' boyuna yükler.
- Kataın fren yapması ve ivme kazanması sırasında oluşan boyuna yükler.
- Rayın kendi öz gerilimlerinden oluşan boyuna yükler.
- Ray yürümesi denen hareket ile meydana gelen boyuna yükler (Lichtberger, 2011).

Dinamik Yükler: Dinamik yüklerin oluşmasına neden olan birçok etken vardır. Bunlardan bazıları:

- Yatay ve düşey hat geometrisi,
- Balast yatağı ve temel zemini oturmasından kaynaklanan nedenler,
- Ray kaynakları ve bağlantı noktalarındaki çökmeler,
- Ray yuvarlanma yüzeyindeki ondülasyonlar,
- Dar yarıçaplı yatay kurbaların düşük kotlu iç raylarında tekerlek patinaj izleri,
- Tekerlek düzleşmesi gibi yapısal bozuklukları bulunan tekerlekler,
- Hat ve araçtaki rijitlik değişimleri,
- Aracın elastik sönümleme sistemi ile ilgili olan doğal titreşimleridir.

Demiryollarının üstyapılarının boyutlandırılması ve tahkik edilmesi sırasında rayı etkileyen dinamik yüklerin dikkate alınma zorunluluğu vardır (Lichtberger, 2011).

RAY KUSURLARI

Ray hataları, rayın yüzeyinde ve içerisinde üretim, işletme ve yol yapımı işlemleri esnasında oluşan ve servis emniyetini etkileyen süreksizliklere denir. Küçük hatalar, işletme esnasında rayların kullanılmasına uygunluk yönüyle herhangi bir etkiye sahip olmayan veya küçük bir etkiye sahip olan hatalardır. Büyük hatalar, işletme esnasında rayların kullanılmasına uygunluk yönüyle artık bir garanti sağlayamayan veya işletmeyi tehlikeye sokabilecek hatalardır. Kritik hatalar ise, işletme emniyeti üzerinde büyük bir etkiye sahip ve taşımacılık için ciddi tehlikeler meydana getirebilecek hatalardır. Rayın değişimini gerektirir (Rayların gözle muayenesi, 2012)

Ray kusurları, rayın üç kısmında oluşabilir: rayın uç kısımları, rayların kaynaklanmış kısımları ve diğer ray kısımları. Uç kısımlar diye tabir edilen bölge, cebire (raylar arası bağlantı demiri) delikleri açılmış olan rayların sonları olan kısımlardır. Rayların kaynaklanmış kısımları, rayların uçlarından birbirlerine kaynakla tutturulduğu kaynağın merkezinden onar cm her iki yöne olan mesafede oluşan alanı ifade eder. Diğer bölgede bu bölgeler dışındaki bölgelerde kalan alanlardır (UIC-712 R, 2002).

Raylardaki hataların tanımlanması amacıyla UIC, Ray Hataları Kataloğu olarak tanımlanan bir katalog çıkarır. Raylardaki ve bağlantı yerlerindeki arızaları, çatlaklar ve kırılmalar ray hataları olarak tanımlanırlar (Lichtberger, 2011).

Ray kusurlarının incelenmesi önce ikiye sınıflandırılır bunlar:

1. Rayların yüzeyinde oluşan kusurlar,

2. Rayların yüzeyi dışında oluşan kusurlar.

Yüzeyle altındaki bölümlerin imalat ve oluştukları mekanizmaların farlı olması ve ayrıca gerilmeleri de farklı olmaktadır. Yüzeyde oluşan kusurlar çoğunlukla hatlardaki yoğunluk ve dingillere binen yüklerin artması sonucu gelişir. Yüzeyde oluşabilecek kusur olarak, rayların mantar bölümlerindeki kılcal çatlaklar ile çökme kusurları sayılabilir. İçeri bölümlerde oluşabilecek kusur olarak, oval boşluk ile boyuna dikey çatlak kusurları sayılabilir.

Raylarda oluşabilecek kusurların diğer bir sınıflandırılması:

1. Raylarda yapılan kaynakların sebep olduğu kusurlar,

2. Rayın kalitesinden kaynaklanan kusurlar.

Rayların kaynaklanmasıyla oluşan kusurların büyük çoğunluğu kullanılan kaynak yönteminin yol açtığı kaynak kusurlarıdır. Rayın kalitesi ile ortaya çıkan kusurların çoğunluğu imalat şartları, malzemenin sahip olduğu özellikler ve mekanik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Oval boşluk ile rayın mantarındaki yatay çatlak bu tip kusurlardır (Kumar, 2006).

Üç başlıkta raylarda oluşabilecek kusurlar sınıflandırılsa:

1. Rayın üretimi safhalarında meydana gelen kusurlar,

2. Nakliyenin uygunsuz olması, montajlamanın usule uygun olmaması ile uygun olmayan koşullardaki kullanımların oluşturduğu kusurlar,

3. Rayların yorulması sonucunda oluşan kusurlar.

Rayın üretimi safhalarında meydana gelen kusurlara örnekler: rayın mantarında hidrojenin oluşturduğu çatlaklar sonucu görülen oval boşluk kusurları, metalle ilgisi olmayan maddeleri ve ayrışma kusurlarını saymak mümkündür. Nakliyenin uygunsuz olması, montajlamanın usule uygun olmaması ile uygun olmayan koşullardaki kullanımların oluşturduğu kusurlara örnekler: Patinaj yapılması sonucu raylarda oluşan tekerlek yanığı kusuru. Rayların yorulması sonucunda oluşan kusurlara örnek "yuvarlanma temas yorulması" olarak da bilinir. Yorulma ku-

surları tekerlekler ile raylar arasındaki temasın olduğu alanda oluşan yüksek gerilmelerin zamanla yol açtığı kusurdur. Bu gerilme rayların yüzeylerinde ciddi ölçüde kayma gerilmeleri oluşturur. Zamanla önce rayların yüzeyleri yâda rayların yüzeylerinin yakınındaki alanlardır.

Demiryollarında kullanılmakta olan rayların çelik malzemelerinin çoğunluğunda, yorulma kusurları oluşmaktadır. Kılcal çatlak kusurlarına, çoğunlukla dönemeçlerde dıştaki raylarda rastlanmaktadır. Bu çatlakların bazıları, rayların kesit eninde genişleyerek derinlere kadar gidebilir. Rayın yüzeyinde görülen çökme kusurları çoğunlukla düz yolda çok geniş dönemeçlerde görülmektedir. Yorulmanın neden olduğu kusurlar derinleşerek rayların kırılma sebebi olabilmektedir. Bunlar artan yoğunluklar sonucu önümüzdeki günlerde en dikkate alınan ray kusurlarından olarak dikkate alınacaktır (Singh, 2011).

Aşağıda ray kusurlarının bazılarının örnekleri verilmiştir;

Kabuk Atma: Üretimden gelen oksit kalıntıları ve artık gerilimden dolayı yüzey altı yorulma çatlakları şeklinde başlayıp parça kopmasıyla meydana gelen kusur çeşididir. Genellikle Şekil 8'de gösterildiği gibi yüksek rayın ekartman tarafındaki yuvarlanma köşesinde oluşur (Rayların gözle muayenesi, 2012).



Şekil 8. Kabuk Atma



Şekil 9. Ray Yuvarlanma Yüzeyinde Kabuk Atma

Ray Yuvarlanma Yüzeyinde Kabuk Atma: Şekil 9'daki gibi ray yuvarlanma yüzeyinde birkaç milimetre derinliğinde sahte dalgalanma şeklinde görülen kabuk atma kusurudur (Rayların gözle muayenesi, 2012).

Rayın Ekartman Tarafında Kabuk Atma: Başlarda ray mantarının ekartman tarafında uzun karartı şeklinde görülüp bir süre sonra metal yığılmasına dönüşüp kırılma ve kabuk kopması şeklinde Şekil 10'da görüldüğü şekilde gerçekleşen kusur çeşididir (Rayların gözle muayenesi, 2012).



Şekil 10. Rayın Ekartman Tarafında Kabuk Atma



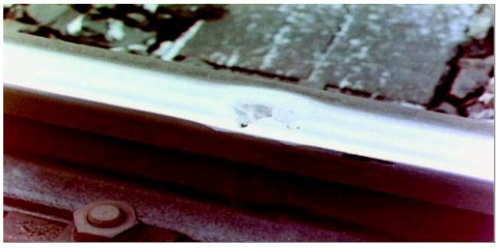
Şekil 11. Ray-Teker Temas Çatlakları

Ray-Teker Temas Çatlakları: Rayın boylama eksenine 30-60 derece açı ile ray yuvarlanma yüzeyinden ekartman tarafına doğru oluşan küçük yüzey çatlaklar gurubu şeklindeki kusurlardır. Çatlak, Şekil 11'de gösterilmiştir. Kontrol edilmezlerse ray kırılmalarına sebep olabilir. Başlangıç aşamasında taşlama yaparak kusur giderilebilir (Rayların gözle muayenesi, 2012).

Pullanma: Ray yuvarlanma yüzeyinde başlayan bir çatlağın başka çatlaklarla birleşerek yüzeyden küçük parçalar koparması şeklinde oluşan kusurlardır. Pullanma aşağıda Şekil 12'de gösterilmiştir. Daha çok kış aylarında rayın sertliğinin artığı soğuk dönemlerde rastlanır (Rayların gözle muayenesi, 2012).



Şekil 12. Ray Yüzeyinde Pullanma



Şekil 13. Rayda Ezilme

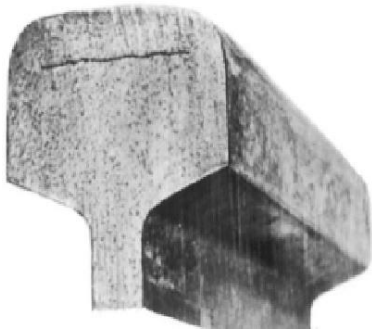
Ezilme: Ray yuvarlanma yüzeyinde teker ile rayın temas sahasında bölgesel olarak ezilme sonucu genişleme şeklinde görülen kusurlardır. Yüzeyde görülen çatlak mantar iç tarafına doğru ilerler. Çatlak boyu 3-5 mm derinliğe ulaştığında aşağı doğru enine doğru gelişir ve rayın kırılmasına sebep olur. Ezilme Şekil 13'te gösterilmiştir. Ondülasyonlu bölgelerde alın kaynaklı ve termit kaynaklı bölümlerde görülür (Rayların gözle muayenesi, 2012).

Patinaj İzi: Duran aracın ilk hareketinde, hareketli aracın durması veya eğimli bölgelerde tekerin ray üzerinde kaymasından veya patinaj yapması ile sürtünme nedeniyle ortaya çıkan ısının ray yüzeyinde bölgesel meydana getirdiği koyu gri renginde elips şeklinde kusurlardır. Bazen ray yüzeyinde yatay düzlemde gelişir, derinliği artmaz ve kabuk atma şeklinde sonuçlanır. Patinaj izi aşağıda Şekil 14'te

gösterilmiştir. Diğer bir şekilde de enine doğru gelişir çatlak derinleşerek gövdeye doğru ilerler ve ray kırılmasıyla sonuçlanır (Rayların gözle muayenesi, 2012).



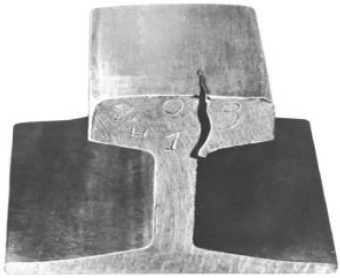
Şekil 14. Ray Üzerinde Patinaj İzi



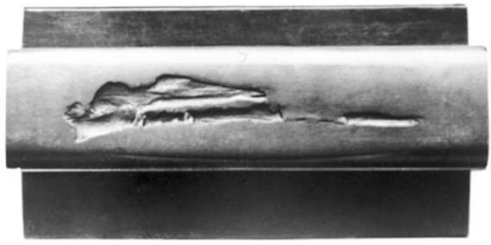
Şekil 15. Ray Mantarında Yatay Ayrılma

Ray Mantarında Yatay Ayrılma: Ray başında ray mantarına paralel küçük bir çatlak şeklinde başlayıp, yatay ilerleyen ve ray üzerinden bir parça kopmasıyla sonuçlanan yatay çatlak şeklinde görülen kusurlardır. Şekil 15'te gösterilmiştir (Rayların gözle muayenesi, 2012).

Ray Mantarında Dikey Ayrılma: Üretim esnasında oluşan kusur nedeniyle ray mantarında oluşan çatlağın dikey olarak büyüyerek mantarın ikiye ayrılmasıyla gerçekleşen aşağıda Şekil 16'da gösterilen tipte kusurlardır (Rayların gözle muayenesi, 2012).



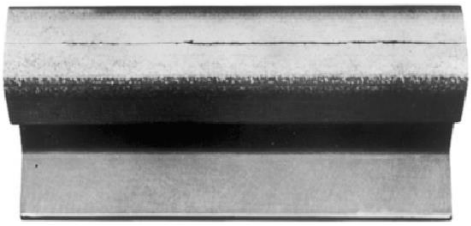
Şekil 16. Ray Mantarında Dikey Ayrılma



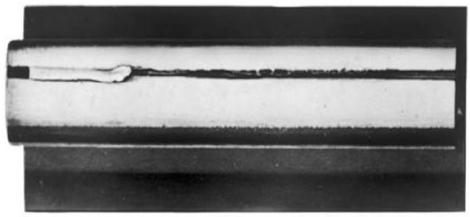
Şekil 17. Yapraksı Kopma

Yapraksı Kopma: Yüzeyin hemen altında üretim esnasında meydana gelen yüzeye gelen baskıyla da ince yaprak şeklinde parça kopması şeklinde görülen yukarıda Şekil 17'de de gösterilen şekildeki üretim kusurlarıdır (Rayların gözle muayenesi, 2012).

Uzun Yiv: Ray yüzeyinde derinliği çok az olup birkaç metre uzunluğunda meydana gelebilen, çizgi halinde metal kopması şeklinde Şekil 18'de de görülen üretim kusurlarıdır (Rayların gözle muayenesi, 2012).



Şekil 18. Uzun yiv



Şekil 19. Çizgi

Çizgi: Derinliği 2-3 milimetreyi geçmeyen boyuna çizgi şeklinde görülen üretim kusurlarıdır. Yukarıda Şekil 19'da gösterilmiştir. Ray yola döşendiğinde gözle görülür, yapraksı kopmayla birleşmez ise aşınmanın etkisiyle zamanla kaybolur (Rayların gözle muayenesi, 2012).

Soğuk yaralanma: Rayın taşınması, deray, yol çalışması, balast sıçraması ya da dışarıdan gelen sert bir darbeden dolayı zedelenmesi veya hasarlı tekerin yapmış olduğu kusurlardır. Aşağıda Şekil 20'de gösterilmiştir. Bu yaralanma keskin köşeli olursa çentik etkisi yapıp rayın kırılmasına sebebiyet verir (Rayların gözle muayenesi, 2012).



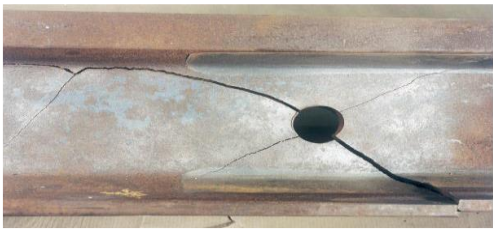
Şekil 20. Soğuk Yaralanma



Şekil 21. Makine Hatası

Makine hatası: Yolda uygun olmayan bir teknik kullanarak ray tabanının veya ray gövdesinin uygunsuz bir gereç ile (örneğin şaloma) delinmesi ya da kesilmesi, çift delik açılması gibi hatalı işlemler sonucu meydana gelene kusurlardır. Şekil 21'de gösterilmiştir. Bu kusurlar çentik etkisi yaparak rayın kırılmasına sebebiyet verir (Rayların gözle muayenesi, 2012).

Cebire Deliğinde Yıldız Kırık: Cebire deliği çevresinde yıldız şeklinde gelişen kusurlardır. Aşağıda Şekil 22'de gösterilmiştir. Cebire deliğinin düzgün açılmaması, gerilim yoğunluğunun artmasına bu yoğunluğun 45º'de toplanması nedeniyle de genellikle yatay düzleme 45º'de başlayan çatlaklara sebebiyet verir (Rayların gözle muayenesi, 2012).



Şekil 22. Cebire Deliğinde Yıldız Kırık



Şekil 23. Kaynakta Yatay Çatlak

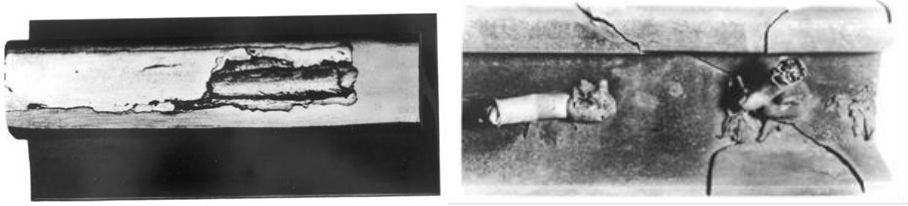
Cebire Deliği Dışında Ray Üzerindeki Herhangi Bir Delik Çevresindeki Kırık: Ray üzerindeki herhangi bir delik çevresinde gelişen kusurlardır. Deliğinin düzgün açılmaması, keskin köşelerin pahlanmaması gerilim yoğunluğunun delik çevresinde artmasına yatay düzleme 45º'de başlayan çatlaklara neden olur (Rayların gözle muayenesi, 2012).

Dirsek Yapma: Rayın çevre sıcaklığına bağlı uzaması sonucu yanal olarak geometrisinin bozulması şeklindeki kusur çeşididir. Genellikle sürekli kaynaklı raylarda küçük bağlantı malzemelerinin doğru ortam sıcaklığında sıkılmamasından dolayı rayın uzamaya çalışmasının getirdiği stres birikimi ile dışa doğru dirsek yapması şeklinde meydana gelir. Kontrol altında tutulmaz ise deraya sebep olur (Rayların gözle muayenesi, 2012).

Eğri Ray: Kaza, deray, hatalı taşıma veya herhangi bir dış sebepten dolayı oluşan kalıcı bir kusur çeşididir. Hattın doğruluğunu bozar, yolun gerilimini arttırdığından başka hataların oluşmasına sebep olur (Rayların gözle muayenesi, 2012).

Kaynakta Yatay Çatlak: Kaynağın karşılıklı iki tarafında kavisli olarak birleşen çatlak şeklinde gelişerek oluşan kusurdur. Şekil 23'te gösterilmiştir (Rayların gözle muayenesi, 2012).

Dolgu Kaynağı Kavlaması: Kaynak metali ile ana metal arasında oluşan bir kusurdan veya ana metalle kaynak metalinin düzgün kaynamamasından dolayı kabuk kalkması şeklinde oluşan kusurlardır. Aşağıda Şekil 24'te gösterilmiştir (Rayların gözle muayenesi, 2012).



Şekil 24. Dolgu Kaynağı Kavlaması **Şekil 25. Bonding Kaynağı Kırığı**

Bonding Kaynağı Kırığı: Ray mantarının dış tarafında, ray gövdesinin bir tarafında veya gövde ile tabanın birleştiği kaviste enine gelişen bir çatlak şeklinde görülen kusurlardır. Yukarıda Şekil 25'te gösterilmiştir. Genellikle gelişen çatlak rayın kırılmasına neden olur (Rayların gözle muayenesi, 2012).

Ondülasyon: Ray yuvarlanma yüzeyinde aşınma, yorulma veya metal yığılması gibi birçok bozulma türünün çeşitli nedenlerle bir araya gelmesi sonucu oluşan kusurlardır. Ray yüzeyinde dalgalı aşınma şeklinde inişli, çıkışlı ya da parlak koyu şekilde görünen düzensizliklerdir. Deraya neden olmaz ancak küçük bağlantı malzemelerinin gevşemesine, balastın bozulmasına, sesin artmasına ve titreşimin artarak yolculuk konforunun azalmasına sebep olur. Aşağıda Şekil 26'da gösterilmiştir. Erken evrede ray taşlaması yapılarak kusur giderilir ((Rayların gözle muayenesi, 2012).



Şekil 26. Ondülasyon



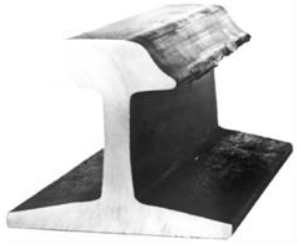
Şekil 27. Kısa Dalga Boylu Ondülasyon

Kısa Dalga Boylu Ondülasyon: Hasarlı teker, teker takımı veya ağır yük altında çalışma sonucu dalga boyu 3cm ile 8cm arasında olan ondülasyonlardır. Yukarıda Şekil 27'de gösterilmiştir (Rayların gözle muayenesi, 2012).

Uzun Dalga Boylu Ondülasyon: Genel olarak rayın haddelenmesi sırasında oluşan üretim hatasından, yoğun trafik ve yüksek hız altında çalışma sonucu dalga boyu 8 cm ile 30 cm arasında olan ondülasyonlardır. Aşağıda Şekil 28'de gösterilmiştir (Rayların gözle muayenesi, 2012).



Şekil 28. Uzun Dalga Boylu Ondülasyon



Şekil 29. Yanal Aşınma

Yanal Aşınma: Genellikle kurplarda ray yuvarlanma yüzeyinin dış kenarında görülen çeken-çekilen araçların yarattığı stres sonucu ray profilinin bozulması ve malzeme eksilmesi şeklindeki kusurlardır. Yukarıda Şekil 29'da gösterilmiştir. Fazla olduğunda ekartmanın genişlemesine sebebiyet vereceğinden çeken-çekilen araçların derayına neden olur (Rayların gözle muayenesi, 2012).

Dikey Aşınma: Ray yuvarlanma yüzeyinin üst bombesinde görülen çeken-çekilen araçların yarattığı stres ve trafik yükü sonucu ray üst profilinin bozulması ve malzeme eksilmesi sonucu ray yüksekliğinin azalması şeklindeki kusurlardır. Aşağıda Şekil 30'da gösterilmiştir. Genellikle ray kusuru olarak anılmaz (Rayların gözle muayenesi, 2012).



Şekil 30. Dikey Aşınma



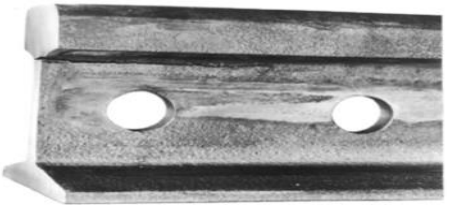
Şekil 31. Ezilme Kopması

Ezilme Kopması: Genellikle dar yarıçaplı kurplarda iç rayda ray çalışma yüzeyinin yan tarafında metalin boydan boya dikiş şeklinde yana doğru ezilerek birikmesi ve zamanla kopması şeklinde gerçekleşen ray kusurlarıdır. Yukarıda Şekil 31'de gösterilmiştir (Rayların gözle muayenesi, 2012).

Bölgesel Ezilme: Ray üst yüzeyinde bölgesel olarak oluşan ezik görünümlü, genellikle ray üst yüzeyinin genişlemesine neden olan, üretim kusurudur. Aşağıda Şekil 32'de gösterilmiştir. (Rayların gözle muayenesi, 2012).



Şekil 32. Bölgesel Ezilme

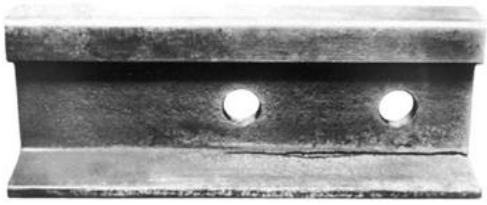


Şekil 33. Gövde-Mantar Birleşim Yerlerindeki

Yatay Çatlaklar

Gövde-Mantar Birleşim Yerlerindeki Yatay Çatlaklar: Metal dışı kalıntıların buralarda birikmesi ve ray üretim fabrikasında yapılan soğuk doğrultmadan gelen artık gerilimlerin sebep olduğu kusurlardır. Yukarıda Şekil 33'de gösterilmiştir. Dikey ve enine doğru yüksek dinamik yüklemeler çatlağın ilerlemesine neden olur (Rayların gözle muayenesi, 2012).

Gövde-Taban Birleşim Yerlerindeki Yatay Çatlaklar: Metal dışı kalıntıların buralara birikmesi, ray üretim fabrikasında yapılan soğuk doğrultmadan gelen artık gerilimler ile dikey ve enine doğru dinamik yüklemelerin neden olduğu kusurlardır. Aşağıda Şekil 34'te gösterilmiştir. Çatlak başlangıçta yana doğru ilerler daha sonra o bölgeye gelen yük durumuna göre yukarı ya da aşağı doğru yönelir ve ray kırılmasına sebebiyet verebilir (Rayların gözle muayenesi, 2012).



Şekil 34. Gövde-Taban Birleşim Yerlerindeki Yatay Çatlaklar



Şekil 35. Korozyon

Korozyon: Havadaki kimyasal bileşenlerden, sudan, özelliklede tünelde ve hemzemin geçitteki rayların paslanması olarak adlandırılır. Yukarıda Şekil 35'te gösterilmiştir. Gövdenin paslanması sonucu parça kopması gövde kalınlığının azalmasına ve zaman içinde kırılma ile sonuçlanmasına neden olur (Rayların gözle muayenesi, 2012).

Tahribatsız Muayene Yöntemleri

Tahribatsız muayeneler, malzemelerin içyapısındaki ve dış yüzeyindeki düzensizliklerin, tespitini, malzemeye fiziksel ve yapısal olarak bir değişiklik yapmadan mümkün kılar. Malzemelerin servis güvenilirliği ve artan kalite talebi, tahribatsız muayene tekniklerinin yaygınlaşmasına olanak sağlamıştır. Hataların hassasiyetle tanımlamasının, muayenenin hızlı yapılması, düşük işletme masrafları ile gelişmiş taşınabilir cihazlardan dolayı teknolojilerin gelişmesine yol açmıştır. İlerleyen zamanla bunlarda genişlemektedir. Bu alanın önem kazanması sebebiyle nitelikli yetişmiş elemanlara ihtiyaç duyulmaktadır (Metal Teknolojisi Ders Notu. 2011).

Tahribatsız Muayenenin Tanımı ve Önemi: Tahribatsız muayene isminin de vurguladığı gibi, bir malzemeyi servis yapılabilirliğine zarar vermeksizin inceleyerek, aranan özellikleri hakkında bilgi toplama yöntemleridir.

Testler neticesinde malzemenin beklenen özelliklerinden sapma miktarları belirlenir. Bu sapmalar daha önce bilinen bir ölçüte göre kıyaslanarak, malzemenin kullanılabilirliği hakkında karar kılınır.

Tahribatsız muayeneler bugün birçok değişik alanlarda kullanılmaktadır. En yaygın kullanıldığı alanlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir (Öktem, 2002).

- Tank, silo gibi ince cidarlı yapılarda: yüksek seviyede emniyete sahip olması ‘ gereken silindirik basınç kaplarında çatlak tespitinde,

- Havacılık, uzay ve nükleer sanayide: metal ve kompozit parçaların çatlak ve hata ‘ muayenesinde,

- Beton yapıların muayenesinde,

- Kaynak muayenesinde.

Tahribatsız Muayenenin Kullanım Amaçları: Bu alanlarda uygulanan tahribatsız muayenelerin genel olarak kullanım amaçları ve yararları ise beş ana grupta toplanabilir (Kaşıkçı, 1994):

a. Bir laboratuvar araştırma çalışması olarak,

- Yeni bir ürün veya üretim işlemi geliştirmek
- Mühendis1ik tasarımını yönlendirmek
- Gelişen teknolojiye paralel olarak yeni tahribatsız muayene yöntemleri ve ‘ cihazları geliştirmek

b. Üretim esnasında ürünün istenen kalite değerleri içinde olduğunu kontrol etmek,

- Prosesin aksayan noktalarının en kısa zamanda bulunması ve kullanılan ‘ cihazların daha verimli olmasının sağlanması
- Malzeme, işçilik ve üretim zamanının israfının önlenmesi

c. Üretim sonrasında, elde edilen ürünün istenen özellikleri taşıdığından emin olmak ‘ ve güvenilirliği arttırmak amacıyla kalite kontrol uygulaması olarak,

d. Servis sürecinde,

- Yıpranma ve yorulmadan doğan hataların saptanması amacıyla bakım onarım ‘ çalışması olarak,

- Servis dışı kalacak malzemenin önceden tayini ile "bütün" e zarar vermeden ‘ yenilenmesini sağlamak,

e. Baraj, köprü, döner fırın, yüksek fırın, petrol-boru hattı gibi tesislerin yapımında, ‘ montaj işlemlerinin kontrolü için şantiye çalışması olarak uygulanabilir.

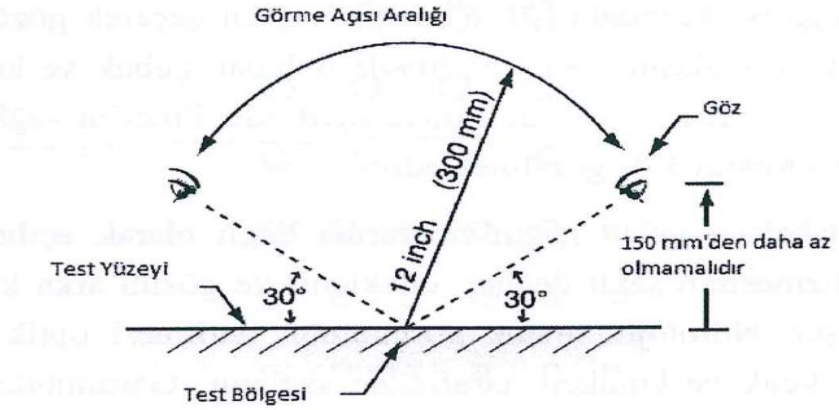
Endüstride en çok uygulanan yöntemler şöyle sıralanabilir;

- Görsel muayene
- Sıvı penetrant muayenesi
- Manyetik parçacık ile muayene
- Girdap akımları ile muayene
- Radyografi ile muayene
- Ultrasonik muayene

Görsel Muayene: Görsel muayene uzun süre boyunca göz ardı edilen bir tahribatsız muayene yöntemi olmuştur. İlk uygulanan tahribatsız muayene yöntemi olmasına rağmen resmi olarak en son gerçekleşen yöntemdir (Görsel Muayene Eğitim Notu, 2012).

Görsel muayene çeşitli kurumlarca değişik şekillerde tanımlanmıştır. FAA’a göre; Görsel muayene yardımcı ekipman kullanarak yada kullanmadan incelenecek yüzey hakkında gözle muayene yaparak karar verme mekanizması olarak tanımlanmıştır. ASNT tarafından yapılan tanımlamada ise; Görsel ve optik test, elektromanyetik spektrumun görsel alanından yararlanılarak yapılmaktadır. Test edilecek parça ile ışığın temasıyla birlikte gerçekleşen değişimler insan ya da bir ekipman yardımıyla belirlenir. Bu tespit etme işlemi ayna, baroskop veya görmeyi artıran başka bir aksesuar ile yapılabilir (Görsel Muayene Eğitim Notu, 2012).

Direkt görsel muayene ‘’ayna, teleskop, yada uygun bir ekipman kullanarak yada kullanmadan göz hizasından 25’’ (610mm) mesafeden, yüzeyden 30˚ ‘den az olmayacak bir açıda malzeme yüzeyinin incelenmesi olarak tanımlanabilir. Aşağıda Şekil 36’da gösterilmiştir (Görsel Muayene Eğitim Notu, 2012).



Şekil 36. Tipik Görsel Muayenede Görme Açısı

Direkt görsel muayene; EN 13018 Tahribatsız Muayene-Gözle Muayene-Genel Kurallar standardına göre muayene yüzeyi ile gözlem yapan kişinin gözü arasında ışınım kesintisiz olarak yapılıyorsa direkt görsel muayene denir. Göz genellikle yapılan görsel muayenede yüzeydeki olabilecek kusurların daha açık bir şekilde görülebilmesi için bazı yardımcı ekipmanlara gereksinim duyar. Görme işleminin güçlendirilmesi için çeşitli oranlarda büyüteçler, el feneri, görüntü aktarımı için aynalar ya da baroskoplar kullanılabilmektedir (Görsel Muayene Eğitim Notu, 2012).

Endirekt görsel muayene; EN 13018' e göre muayene yüzeyi ile gözlem yapan kişinin gözü arasında ışınım kesintili olarak yapılıyorsa (yani başka bir enerji tipine dönüşüm söz konusu ise) direkt görsel muayene denir. Fiber kameralar, monitörler endirekt görsel muayene de kullanılan araçlardan bazılarıdır (Görsel Muayene Eğitim Notu, 2012).

Sıvı penetrant muayenesi: Yüzeyde oluşan kusurlarının tespit edilebilmesi amacıyla kullanılan muayene metodudur. Bu metodun uygulanması için yüzeylerin açık olması gereklidir. Yüzeyin altında kalan veya hangi nedenle olursa olsun yüzey ile bağlantısı kesilmiş bulunan kusurlar bu metotla tespit edilemez. Çok fazla gözenekli olmamaları koşulu metal veya metal dışı tüm malzemelerde beklenen yüzey kusurlarının tespit edilebilmesi amacıyla kullanılır. (Metal Teknolojisi Ders Notu, 2011).

Yöntemin uygulanacağı malzemenin yüzeyi düzgün ve temiz olmalıdır aksi takdirde bulunan sonuçlar yanılgılara düşürebilir. Yüzeyde istenmeyen maddeler

olabileceği için muayeneden önce yüzeyi temizlemek gerekir. Bu kimyasal maddelerin kullanımında çok dikkat etmek gerekir. Bu kimyasal malzemeler aşağıdaki Şekil 37'de gösterilmiştir (Metal Teknolojisi Ders Notu, 2011). Temizlenmiş, muayyenenin yapılacağı yüzey penetran sıvının uygulanması ile ıstatılır.



Şekil 37. Penetran Testinde Kullanılan Soldan Sağa Doğru Temizleyici Sprey, Penetran Sprey Ve Geliştirici Sprey

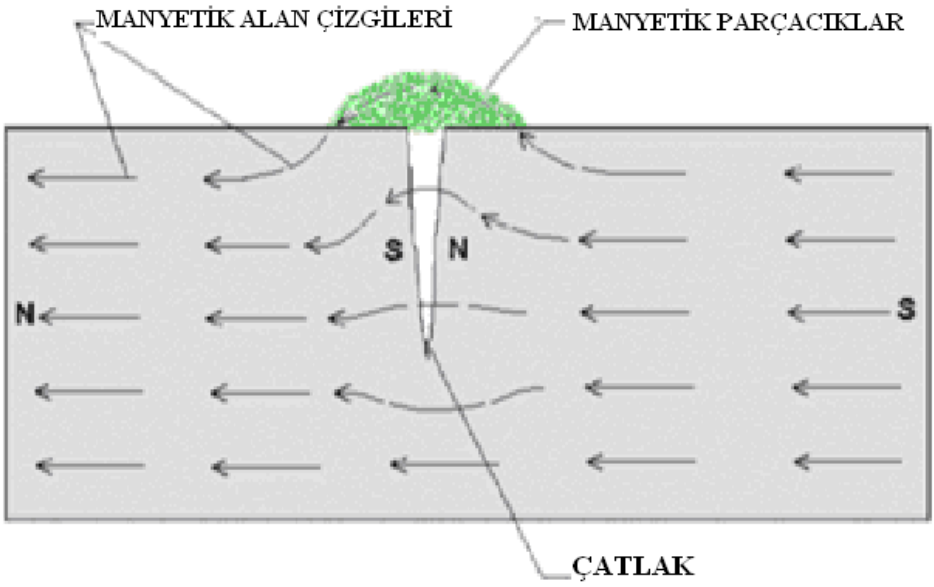
Yüzeyde bulunabilecek çatlaklara, gözeneklere vb. sıvının nüfuz etmesi için beş dakika ile kırk dakika arası beklenilir. Penetran sıvı uygulanan yüzey, temizleyici spreylerle veya sıvılarla temizlenir. Kuru bir bezle kurutulur. Ara yıkaması yapılmış parçanın yüzeyine emici toz ilave edilir. Toz, parçanın çatlak ve gözenekleri içine girmiş olan penetran sıvıyı emer. Bunun sonucunda varsa çatlak ve gözenekler görünür hale gelir. Bu işlem sırası aşağıda Şekil 38'de verilmiştir (Metal Teknolojisi Ders Notu, 2011). Yüzeyde çıkabilecek hataları değerlendirilebilmesi için bu testi yapabilme (EN 1289) sertifikası olan uzmanlaşmış bir kişinin görsel olarak yüzeyi kontrol edip değerlendirmesi ile muayene biter (Metal Teknolojisi Ders Notu 2011)



Şekil 38 Penetran Muayenesi İşlem Sırası

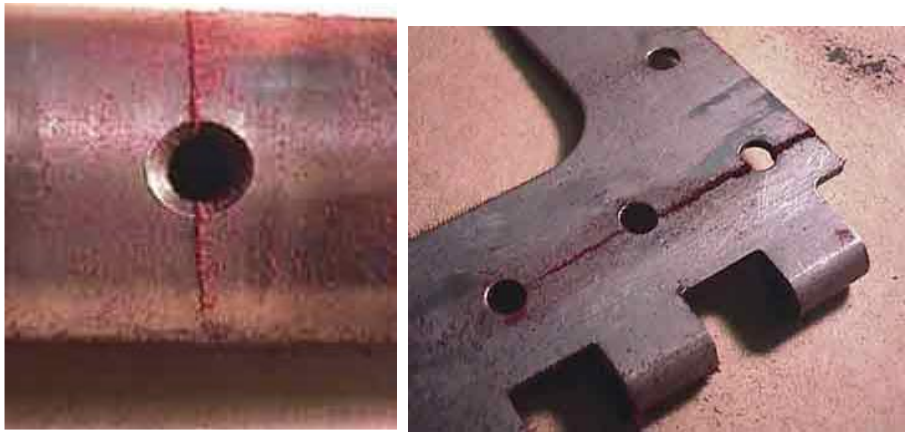
Manyetik parçacık ile muayene: Bu muayene çeşidi uygulanabilirliğinin basitliği, hızı ve maliyetinin az olması nedeniyle, yüzeylerin ve yüzeylere yakın olan hataların tespit edilmesinde yerlerinin belirlenmesinde yaygın bir şekilde kullanılan bir yöntemdir. Mıknatıslanmaya uygun metallerin tamamı, değerliği üç olan demir (Fe) , nikel (Ni) ve kobalt (Co) elementlerinden oluşmaktadır. Bilindiği gibi mıknatıslanabilenler aynı zamanda da manyetikleşebilmektedir. Bu yöntemde çoğunlukla demir tozları kullanılmaktadır. Mıknatıslanabilme özelliğine sahip malzemelere uygulanabilen yöntemin yüzeydeki hataların ortaya çıkarabilmesi hatanın boyutları ve yüzeye yakınlığı ile ilgilidir. Muayene edilecek parça ya elektrik akımına ya da doğrudan manyetik akıya tabi tutularak manyetikleştirilir. Ferromanyetik malzeme olan bu üç malzeme yapıları icabı manyetik akılara direnç göstermedikleri gibi manyetik akıların geçmesine yardımcı olurlar. Manyetik yöntemle kontrol edilecek malzemeler, işin başında mıknatıslandırma düzeneği ile mıknatıslandırılırlar. Mıknatıslanma iş bitmiş muayene edilecek parçanın yüzeyi manyetik ince toz püskürtülmek sureti ile kaplanır veya Demir tozunun ince yağla iyice karıştırılıp emülsiyon yapıldığı sıvı muayene edilecek parçaya akıtılır. Her ikisinde de muayene edilen parçanın hata olan bölgesinde manyetik tozlar birikir hatanın yerini belli eder. Dolayısı ile hatanın yeri ve boyutu belirlenmiş olur. Manyetikleştirirken hem alternatif akım hem de doğru akım kullanılabilmektedir. Yalnız alternatif akım ile yüzeyin altında bulunan çatlakların tespiti yapılamaz. Bu nedenle doğru akımı kullanan cihazlarla yüzeylerin altında bulunan çatlakların da tespiti mümkün olduğundan doğru akım kullanan cihazlar tercih nedenidir (Tahribatsız muayene laboratuvar föyleri, 2019).

Aşağıda Şekil 39'da görüldüğü gibi çatlağın üstüne tozlar kümelenmiş vaziyetteler. Yan kesitte bu tozlar köprü gibi gözükmektedir (Tahribatsız muayene laboratuvar föyleri, 2019).



Şekil 39. Manyetik Parçacık İle Muayenenin Şematik Gösterimi

Aşağıdaki Şekil 40'da Manyetik parçacık ile muayene edilmiş iki parçada uygulanmış hali gösterilmektedir (Tahribatsız muayene laboratuvar föyleri, 2019).

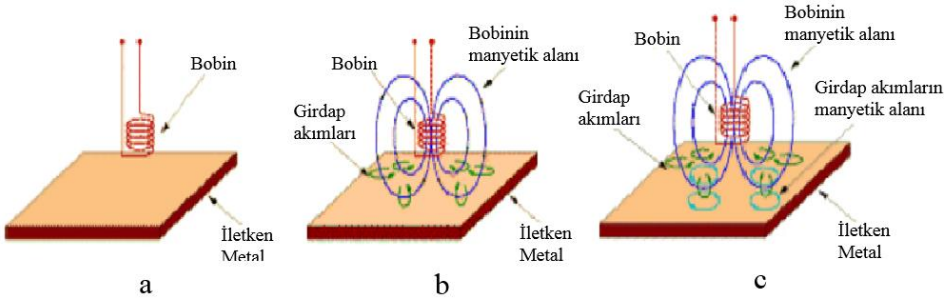


Şekil 40. Manyetik Parçacık Muayenesi Uygulanmış Çeşitli Parçalar

Girdap akımları (Eddy-Current) ile muayene: Bu yöntem elektriği iletebilen metaller ve alaşımlarına uygulanabilmektedir. Yüzeye ve yüzeye yakında bulunan düzensizliklerin belirlenebilmesinde uygulanan bir yöntemdir. İletken malzeme-lerde, çatlaklar, korozyonlar, yüzey üstünde bulunan boyaların veya kaplamaların

kalınlıkları ve iletkenliğinin ölçülme işlemleri için kullanılan yöntemdir (Tahribatsız muayene laboratuvar föyleri, 2019).

Herhangi bir bobinden alternatif akım geçirildiği zaman bobinin çevresinde manyetik alan oluşmaktadır. Bobin, elektrik iletebilen bir malzemenin yüzey bölümüne yaklaştırıldığı zaman, bobinin değişken manyetik alanından dolayı malzemenin yüzeyinde indüksiyon akımlar oluşur. Bu oluşan akımlar kapalı bir devre halinde akarlar ve girdap akımları olarak isimlendirilirler. Girdap akımları da kendilerinin manyetik alanını meydana getirler. Girdap akımlarının oluşturduğu ikincil manyetik alanların ölçülmesi suretiyle yüzey hatalarının tespiti yapılır.

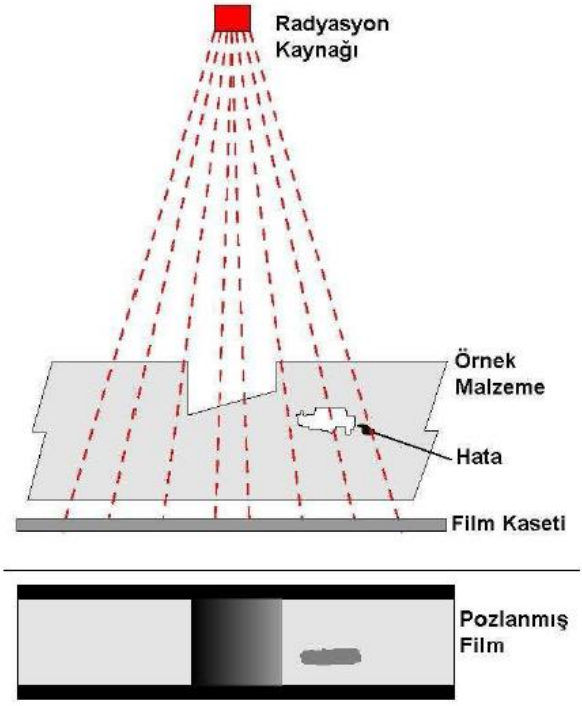


Şekil 41. Girdap Akımları İle Muayene

Şekil 41'de girdap akımları yönteminin uygulanışının sıralaması gösterilmektedir. Şekil (a) alternatif akımla beslenen bobin ve yüzeyi kontrol edilecek malzemeyi göstermektedir. Şekil (b) akım geçirilen bobinin oluşturduğu değişken manyetik alanın malzemenin yüzeyine daireler şeklinde girdap akımları oluşturulması, Şekil (c) bu girdap akımları bobinle oluşan manyetik alanla etkileşime girip bobinin oluşturduğu manyetik alanın zıttı yönünde ikincil bir manyetik alan oluşumu gözükmektedir. Kontrol edilen malzemenin girdap akımları oluşan bölgesinde hata mevcutsa, kontrol edilen malzeme ve hata arasında elektrik dirençleri farkı olacağından akımların farklı bir yörüngede olması durumu oluşacaktır. Bu farklar bobince algılanıp hatalar değerlendirilecektir (Tahribatsız muayene laboratuvar föyleri, 2019).

Radyografi ile muayene: Bu yöntem, son derece hassasiyetle çalışan muayene yöntemlerinden olmasından dolayı ve bulduğu sonuçları kalıcı bir şekilde kaydedilebilmesi sayesinde sanayinin en çok kullandığı tahribatsız muayene yöntemleri içinden biri olmuştur (Tahribatsız muayene laboratuvar föyleri, 2019).

Muayene edilecek malzeme, x veya gama ışınları üretebilen ışın kaynağından gönderilen radyasyon ışın demetiyle taranır. Radyasyonlar malzemenin içinden geçer, malzemenin özelliklerine dayanarak yutulup kayıplara uğrar, malzemeyi geçen radyasyonlar malzemenin arkasına yerleştirilmiş film yüzeyine ulaşıp film üstünde görüntüler oluşturur. Hataların radyasyona tepkisi malzemeye göre değişik olacağı için geçen radyasyonda değişik olacaktır. Bu değişik radyasyon film üzerine olması gerekenden daha farklı bir kararma oluşturacaktır. Filmin banyo edilmesi ile film üzerinde oluşan kararmaların farklı olması hataların tespiti anlamında görülecektir. Aşağıda Şekil 42'de gösterilmiştir (Tahribatsız muayene laboratuvar föyleri, 2019).



Şekil 42. Radyografik Muayenenin Şematik Gösterimi

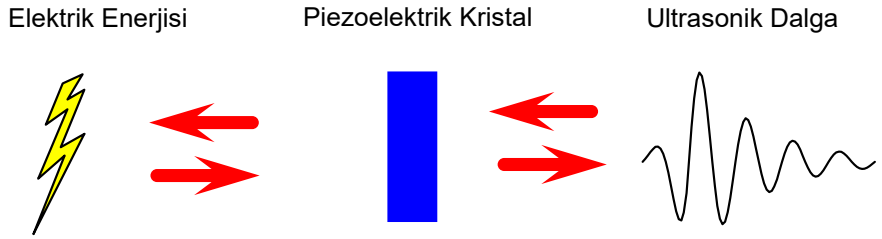
Radyografi ile muayene yöntemi ferromanyetik olsun olmasın tüm metal malzemeler hatta diğer malzemeler için de uygundur. Nedeni, X ışınları malzemelerin hepsine bir zararı olmadan içlerinden geçebildiği için onların içyapılarının

nasıl olduğunun incelemesine imkân tanımaktadır. Be nedenlerle de tahribatsız muayene yöntemleri içinde en çok kullanılanlardan olmuştur (Tahribatsız muayene laboratuvar föyleri, 2019).

Ultrasonik muayene

Ultrasonik muayene yöntemi, yüksek frekanslı ses dalgalarıyla yapılan bir yöntemdir. Frekansı 20 kHz 'den yüksek olan ses dalgaları ultrasonik (ses ötesi) dalgalar olarak tanımlanır. Metallerin ultrasonik muayenesinde ise bu sınırın çok üzerindeki ses frekanslarıyla, genellikle 0,5 MHz ile 10 MHz kullanılır (Kaşıkçı, 1994).

Yüksek frekanslı titreşimleri elde etmek için piezoelektrik olayından yararlanılır. Malzemelerin piezoelektrik özelliği, elektrik akımı uygulanan malzemenin boyutunun değişime uğramasıdır. Piezoelektrik özelliği olan kuartz kristallerine değişen bir akım uygulandığında, kuartz kristallerinde mekanik titreşimler oluşur. Elektrik enerjisini, ultrasonik enerjiye veya bunun tersini gerçekleştiren birime ultrasonik prob denir. Ultrasonik cihaz tarafından üretilen elektrik sinyalleri prob (çevirici) içerisinde bulunan piezoelektrik kristale gönderilir (Kaşıkçı, 1994).



Şekil 43. Ultrasonik Cihaz Tarafından Üretilen Elektrik Sinyalleri Prob İçerisinden Kristale Gönderilişi

Ultrasonik cihaz içinde üretilen uyarıcı sinyal proba verilir ve probda meydana gelen ultrasonik titreşimler malzeme içine gönderilir. Malzeme içinde ilerleyen dalgalar bir süreksizlikle karşılaştığında geri yansırlar ve Şekil 43'deki gibi aynı problar vasıtasıyla tespit edilirler. Giden ve gelen ultrasonik dalgaların elektronik olarak dönüştürülmüş büyüklükleri cihaz ekranında eko oluşturur. Bu sinyaller değerlendirilerek, malzeme içindeki çatlak, boşluk, inklüzyon gibi süreksizliklerin yeri cinsi ve büyüklüğü hakkında bilgi verir (Kaşıkçı, 1994).

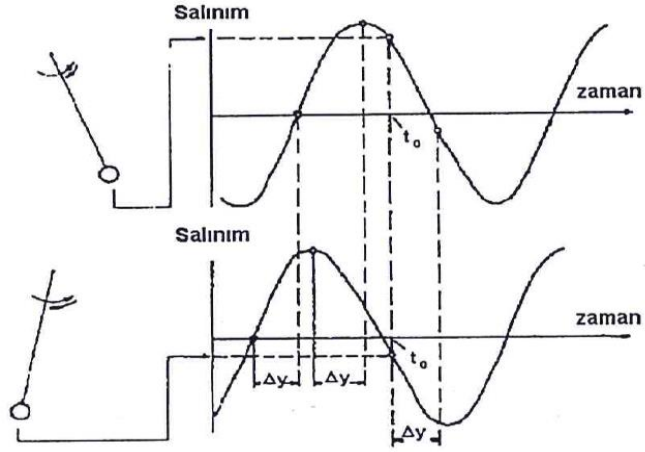
Ultrasonik muayene ile ilgili temel kavramlar: Belli bir zaman dilimi içinde tekrarlayan hareketlere Şekil 44'de açıklandığı gibi salınım denir.

Ultrasonik muayeneleri yapan cihaz darbe süresi kısa olan yüksek bir gerilim oluşturur, oluşan gerilin probda bulunan kristal tarafından insan kulağı işitme sınırının dışına çıkan>16.000 Hertzlik mekanik titremeye yol açar. Titreme muayenesi yapılacak parçaya ses dalgası halinde yayılır. Ses dalgası sınır yüzeyinden yansır ve aynı yoldan kristale geri döner. Geri gelen ses dalgası cihazın ekranında görünüp izlenebilir duruma dönüştürülür. Gönderilen darbe ve belirli bir ses uzaklığındaki yansıtıcıdan gelen yankıyla cihazın doğru olarak ayarlanması mümkündür. Konumlandırma için formül ve yardımcı ekipmanlar kullanılarak muayenesi yapılacak malzemenin yani yansıtıcının yeri tespit edilebilir (Ultrasonik Muayene (UT 1), 2009).

Parçacığın hareketinin bir tam devrini tamamlaması için geçen süreye "periyot" denir ve "T" ile gösterilir. Periyot birimi saniye olarak ifade edilir (Kaşıkçı, 1994).

Parçacığın birim zamanda yaptığı salınım sayısına ise "frekans" denir ve "f" ile gösterilir. Frekansın birimi Hertz'dir (1/sn). Diğer bir ifadeyle frekans bir salınımın birim zaman içindeki tekrarlama sıklığıdır (Serway, 1995).

Yüksek frekans titreşimlerin oluşturulmasında ki maddelerin içinde titreşen atomların veya moleküllerin elastik teması ile oluşan ve ilerleyen dalgalar elastik-mekanik dalgalardır. Ses dalgaları (sonik veya ultrasonik) bu tür dalgalardır. Bu nedenle ses dalgaları boşlukta ilerleyemezler (Serway, 1995).



Şekil 44. Farklı Zaman Ve Frekanslarda Salınım Örneği

Salınımın uzaysal yayılımı "dalga" olarak tanımlanır. Bir salınım süresinde T salınım, salınım periyodunu tamamlamak için uzaysal hareket eder. Bu yol,

"dalga uzunluğu" (λ) olarak tanımlanır. Bir ortamda ilerleyen dalganın dalga boyu, dalganın frekansını ve ortamdaki ilerleme hızına bağlıdır (Serway, 1995).

Ultrasonik test cihazları donanımı: Ultrasonik test sistemleri Şekil 45'de gösterildiği şekilde esas olarak ultrasonik muayene cihazı, problar ve bağlantı kablolarından oluşur. Ultrasonik muayene cihazları da taşınabilir, laboratuvar çalışmaları için, sanayi uygulamaları için ve özel amaçlı cihazlar olmak üzere sınıflandırılabilirler (Ultrasonik muayene kurs notu, 2014)



Şekil 45. Dijital Ultrasonik Cihaz

Ultrasonik muayene cihazı:

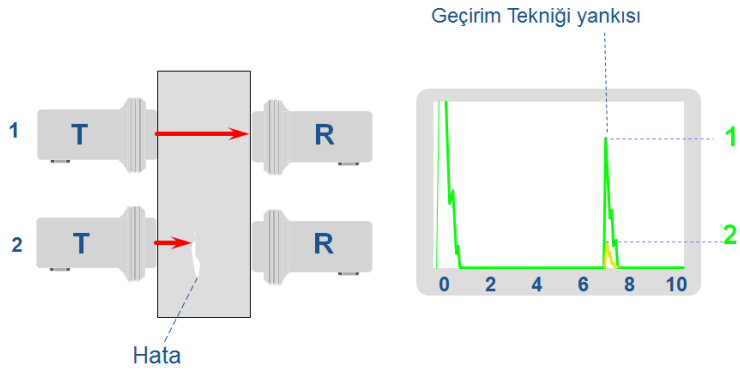
Bütün ultrasonik muayene cihazları esas olarak darbe üreteci ve osiloskoptan oluşur. Darbe üretecinden çıkan kısa süreli darbe bir sinyal güçlendiriciden geçip prob kristaline ulaşır. Gönderici prob kristaline gelen sinyaller bir kaç yüz volt seviyesinde olmakla beraber çok kısa süreli olduklarından sağlık açısından bir teh-

like oluşturmaz. Darbe üreteci 50 - 1000 Hz arasında değişen darbe tekrar frekansları (Pulse Repetation Frequency) üretir. Darbe tekrar frekansı çok yüksek olduğunda ekranda hayalet yankılar meydana gelir, çok düşük olduğu zaman ise ekrandaki sinyal soluklaşır (Ultrasonik muayene kurs notu, 2014).

Cihaz, Gönderici/Alıcı (T/R) modunda ise geri gelen ultrasonik sinyaller alıcı kristal tarafından karşılanır ve elektrik sinyallerine çevrilir, bir yükselticiden geçer ve osiloskop ekranında görülürler (Ultrasonik muayene kurs notu, 2014).

Ultrasonik muayene teknikleri: Farklı akustik empedansa sahip iki ortamın oluşturduğu ara kesite varan bir ultrasonik dalga kısmen ikinci ortama geçmektedir. Ultrasonik muayene ile malzeme içinde farklı akustik empedanslı bir hatanın saptanmasında, ses dalgasının yansıyan veya geçen kısmının ölçülmesi esasına dayanan iki farklı test yöntemi kullanılır. " Geçirim Tekniği " ve " Darbe-Yankı Tekniği " olarak isimlendirilir. Ayrıca "Rezonans Yöntemi" vardır (Ultrasonik muayene kurs notu, 2014).

Geçirim tekniği: Bu tekniğin uygulanabilmesi için muayene parçasının karşılıklı iki yüzeyinin de açık veya ulaşılabilir olması gerekmektedir. Biri gönderici diğeri alıcı olarak çalışacak iki prob yüzeylere karşı karşıya gelecek şekilde yerleştirilir. Malzeme içine gönderilen ses demetinin genliği ölçülür. Bu iki prob arasında bulunabilecek süreksizlikler ve hatalar, malzeme içinde kısmi veya toplam yansıma nedeniyle geçen dalga genliğinin düşmesine, hatta tamamen yok olmasına sebebiyet verecektir. Böylece malzemenin içyapısı hakkında bilgi alınabilecektir. Şekil 46'da geçirim tekniği kullanıldığında hangi koşulda ekran görüntüsünün nasıl olduğu gösterilmektedir. Bu teknik özellikle muayene parçasındaki ses zayıflatması etkisinin yüksek olduğu durumlarda, örneğin plastik kompozitlerde tercih edilir. Ancak bazı olumsuz yönleri vardır. Bu yöntemle, malzeme içindeki hatanın yüzeyden derinliği tespit etmek mümkün değildir ve test edilecek malzemede her iki yüzeye de ulaşabilme zorunluğu vardır (Gür, Doyum, Kolankaya, Yelbay, 2012).



Şekil 46. Geçirim Tekniği ile Test

Geçirim tekniğinin dezavantajları;

a) Sesin verici probdan test parçasına, test parçasından alıcı proba aktarılması sırasında bir takım kayıplar meydana gelir. Bunlara temas kayıpları denir. Bunun sonucunda, yankıların boyutlarında meydana gelen değişiklikler bir malzeme hatası olarak değerlendirilebilir.

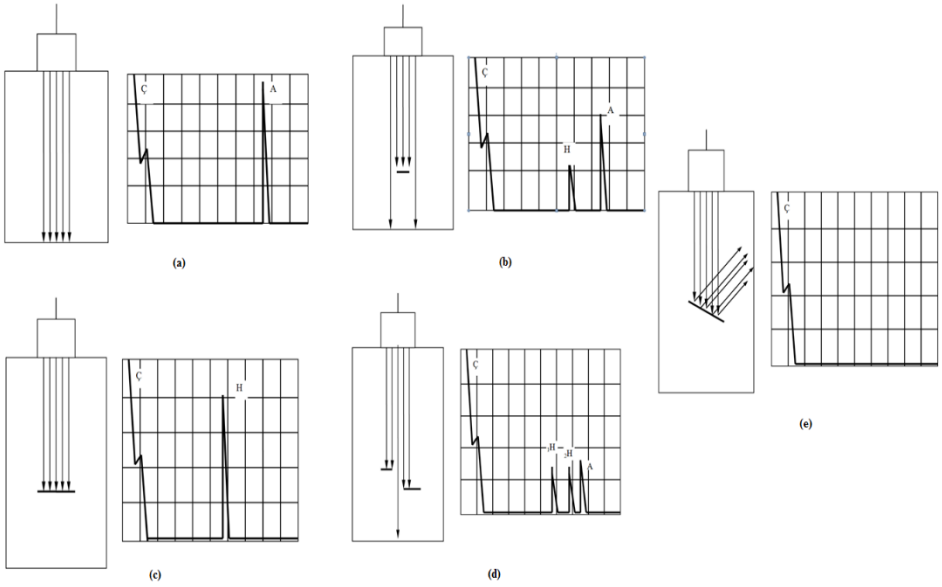
b) Muayene esnasında her iki probun, birbirlerine göre olan konumlarını korumaları gerekir. Aksi takdirde, problardan birinin diğerine göre kayması durumunda, ekranda yanlış yorumlanabilecek yankılar görülebilir.

c) Hatanın derinliği, yani test yüzeyinden uzaklığı bu yöntemle ölçülemez (Gür, Doyum, Kolankaya, Yelbay, 2012).

Darbe-Yankı Tekniği: Darbe-yankı yönteminde hataların saptanması ultrasonik dalganın yansıyan kısmının kullanılması yoluyla gerçekleştirilir. Darbe-Yankı tekniğinde hem gönderici hem de alıcı görevi yapan tek bir prob kullanılır, bu nedenle muayene parçasının tek yüzeyden ulaşılabilir olması çoğu kez test için yeterlidir. Dalga, malzemenin içinden geçerken bir kristal alıcı gibi çalışma gösterir. Prob kristalinde üretilen ses darbesi muayene parçası içine gönderilir. Arkadaki kenardan yansıyan ultrasonik dalga proba ulaştığında mekanik titreşimler elektrik "pulse"larına dönüşür. Ancak burada ultrasonik enerjinin sadece bir kısmı elektrik enerjisine dönüşmüştür ve kalan kısım prob ile test parçası ara kesitinden yansıyarak ve tekrar aynı yoldan geçip, ikinci arka cidar yankısı olarak proba ulaşır. Çünkü ses dalgası ilerlediği yol üzerinde ses demetine dik konumlanmış bir yansıtıcıya çarparsa buradan proba geri yansır. Darbenin üretilmesi ve yansıtıcıdan gelen yankının proba ulaşması için geçen zaman aralığı (yani gidiş-

geliş süresi=uçuş zamanı), prob ve yansıtıcı arasındaki uzaklık ile orantılıdır. Yansıtıcı proba yakın ise daha çabuk, uzak ise daha geç gelir (Ultrasonik Muayene Seviye 1 Kurs Notları, 2003).

Şekil 47'de bu tekniğin uygulanışının şematik bir gösterimi görülmektedir. Bu şekilde muayene parçasına ses darbesinin verildiği an ekranda yatay skalanın başlangıcı (0 skala taksimatı) olarak tanımlıdır. Dalgalar, muayene edilen parçanın test yüzeyinin karşısındaki arka duvar olarak tanımlanan büyük paralel yüzeyi tarafından yansıtılır ve proba geri dönerler, ekranda çıkış yankısı (Ç), arka duvar yankısı (A) ile gösterilmiştir. Ekranın yatay ekseninde A yankısının sol ayağı darbenin uçuş zamanına yani gidiş-geliş mesafesine karşılık gelmektedir. Ses darbesinin yolu üzerinde arka duvara ulaşmadan önce başka yansıtıcılar varsa ve bu yansıtıcılar ses demeti eksenine dik olarak konumlanmış ise Şekil 47'de görüldüğü gibi ekran görüntüleri oluştururlar ve bunlar aşağıdaki gibi maddeler halinde ifade edilmektedir (Ultrasonik Muayene Seviye 1 Kurs Notları, 2003).



Şekil 47. Darbe-Yankı Tekniğinin Şematik Bir Gösterimi

Şekil 47 (a) Ses demetinin yolu üzerinde herhangi bir hata yoksa ekranda çıkış yankısı Ç ile birlikte sadece arka duvar yankısı A görülecektir. Eğer cihaz doğru kalibre edilmiş ise, A ve Ç arasındaki uzaklık parçanın kalınlığını ifade eder (Ultrasonik Muayene Seviye 1 Kurs Notları, 2003).

Şekil 47 (b) Eğer ses demeti, ilerleme yönüne dik konumda bir hataya çarparsa, ultrasonik dalgaların bir kısmı geri yansır. Böylece çıkış yankısı (Ç) ve arka duvar yankısı (A) arasında bir belirti (H) görülür. Hatanın (H) proba olan uzaklığı (muayene yüzeyinden ne kadar derinde olduğu) ekrandaki yankı konumundan belirlenir. Arka duvar yankısının yüksekliği hatanın büyüklüğüne (ses demetinin ne kadarının hata tarafından geri yansıtıldığına) bağlı olarak azalır (Ultrasonik Muayene Seviye 1 Kurs Notları, 2003).

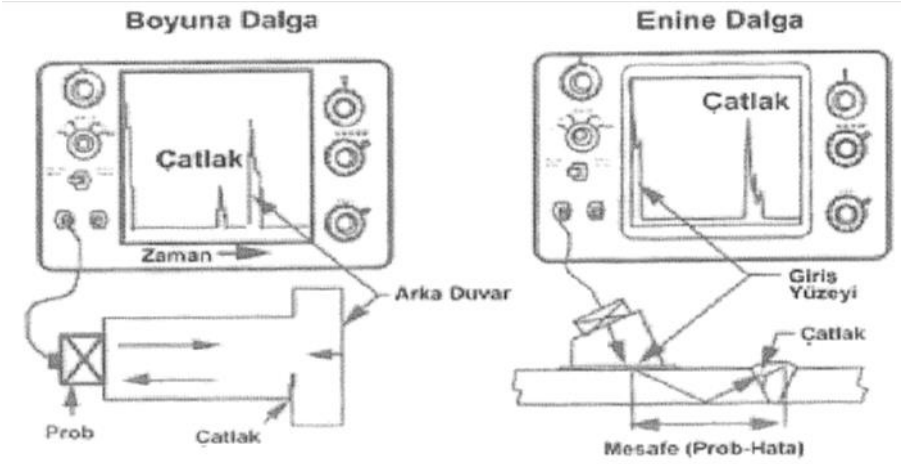
Şekil 47 (c) Eğer ses dalgası, ses demetinin tümünü geri yansıtabilecek büyüklükte bir hataya rastlarsa, bu durumda arka duvar yankısı tamamen yok olur ve ekranda sadece çıkış yankısı ve hata yankısı görülür.

Şekil 47 (d) Eğer ses demeti birkaç hataya birden rastlarsa ve bunların birbirlerine olan uzaklıkları, bunlara ait yankı genişliklerinden büyükse, bu durumda hatalardan alınan yankılar ayrı ayrı görülür (Ultrasonik Muayene Seviye 1 Kurs Notları, 2003).

Şekil 47 (e) Eğer geniş bir düzlemsel hata ses demeti yönüne eğik bir konumdaysa, bu durumda ses dalgaları proba dik olarak geri yansıtılamaz ve prob tarafından algılanamaz. Bu durumda ekranda ne hata ne de arka duvar yankısı görülmez. Eğer ses yolu üzerindeki yansıtıcı ses demeti eksenine dik konumda değilse ve ses demetinden büyük ise, Şekil 47 (e)'de görüldüğü gibi, ses darbesi yön değiştirir ve yankı proba geri gelemez. Arka duvara hiç ses dalgası ulaşmadığı için arka duvar yankısı da alınmaz (Ultrasonik Muayene Seviye 1 Kurs Notları, 2003).

Ekranda elde edilen yankı konumuna bakarak bir yansıtıcının derinliğinin saptanabilmesi için ultrasonik test cihazının belli bir mesafeye kalibre edilmesi gerekir. Mesafe kalibrasyonu yapılırken de kalibrasyon için kullanılan malzemedeki ses hızı ile muayene parçasındaki ses hızlarının aynı olmasına dikkat edilmelidir. Eğer ses hızları çok farklı ise bu fark hesaplamalarla düzeltilir (Ultrasonik Muayene Seviye 1 Kurs Notları, 2003).

Ultrasonik muayenede Darbe/Yankı tekniği en çok kullanılan yöntemdir. Çünkü hataların doğrudan gösterimi geçirim tekniğine göre daha iyidir. Hataların parça içindeki yerleri, ekrandaki yankı konumuna göre hataların yerleri tespit edilebilir. Temas şartlarındaki değişimler, yankının yüksekliğini etkiler, fakat konumunu etkilemez (Ultrasonik Muayene Seviye 1 Kurs Notları, 2003).



Şekil 48. Enine ve Boyuna Dalganın Ultrasonik Cihazda Oluşturduğu Yankıların Gösterimi

Ultrasonik muayene yönteminde hataların gerçek boyutları saptanamaz, sadece yaklaşık boyut hakkında fikir elde edilebilir. Şekil 48'de enine ve boyuna dalgaların ultrasonik cihazda oluşturduğu yankıların görünüşü verilmiştir (Ultrasonik Muayene föyleri, 2014).

Ultrasonik muayenede darbe yankı yöntemi en çok kullanılan yöntemdir. Çünkü hataların doğrudan gösterimi nedeniyle bu yöntem, geçirim yöntemine göre daha büyük avantaj sağlar.

a) Hataların parça içindeki yerleri, ekrandaki yankı konumundan hareketle ve yeterli bir doğruluk derecesiyle belirlenebilir.

b) Temas şartlarındaki değişimler, yankının yüksekliğini etkiler, fakat konumunu etkilemez.

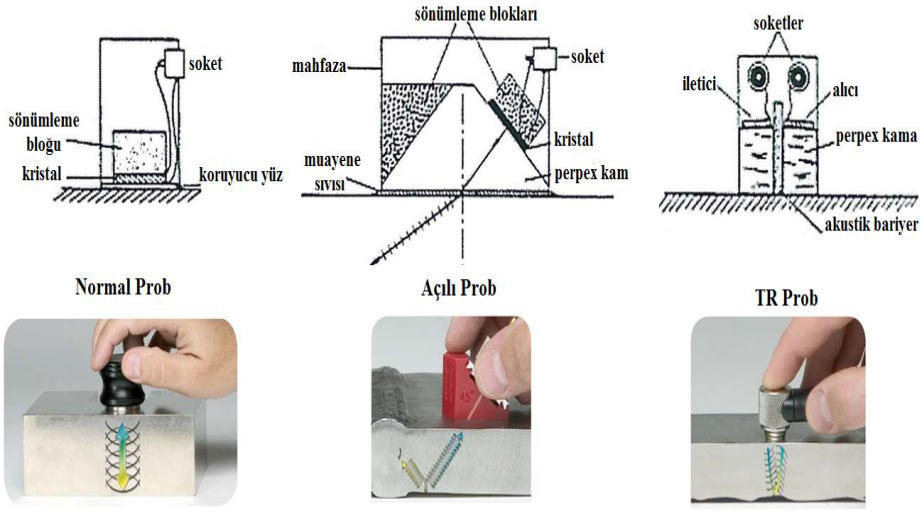
c) Bu muayene yönteminde malzemenin sadece bir yüzeyi gerektiğinden, tek prop kullanılması yeterlidir.

d) Bu yöntemi kullanarak hatanın boyutlarını belirlemek, ancak bazı koşullar altında, bir dereceye kadar mümkündür (Ultrasonik Muayene föyleri, 2014).

Rezonans Yöntemi: Deney parçası içine ultrasonik dalgaların sürekli olarak gönderilmesi sonucunda Rezonans oluşmaktadır. Malzemenin içine önceden gelip, öndeki ve arkadaki kenarlarda defalarca yankılanma durumundaki ultrasonik dalgaları daha sonradan yeni dalga olarak gelenlerle farklı frekanstaysalar birbirlerini zayıflatma durumunda olurlar, aynı frekanstaysalar birbirlerini kuvvetlendirme durumda olurlar. Bunlar malzemenin içinde sönümlenemeyen devamlı dalgaları oluşturur. Yüksek genlik değerlerinde bu durum gözlemlenmektedir ve buna "ultrasonik frekans" denir (Ultrasonik muayene kurs notu, 2014).

Deneyin yapıldığı malzemenin içinde rezonans oluşabilmesi malzemenin yüzlerinin paralel ve yüzeyi pürüzsüz olma durumdadır. Korozyona uğramış yüzeylerde rezonans değeri düşüktür (Ultrasonik muayene kurs notu, 2014).

Ultrasonik muayenede probun yapısı: Normal problarda ses dalgaları muayene parçası yüzeyine dik olarak gelirler. Bir normal probun kesiti Şekil 49'da şematik olarak gösterilmiştir. Muayene sırasında sesin muayene edilecek parçaya daha iyi iletimini sağlamak amacıyla prob ile muayene yüzeyi arasında bir temas sıvısı kullanılır (örneğin, yağ) (Ultrasonik muayene kurs notu, 2014).



Şekil 49. Ultrasonik Probların Yapısı

YÖNTEM

Marmaray demiryolu hattında Ayrılık Çeşmesi-Kazlıçeşme istasyonları arasında, ray kusurlarının hattın hangi kesimlerinde meydana geldiğini ve bu kusurların hangi tür ray kusurları olduğunu tespit etmek için ise tahribatsız muayene

yöntemleri arasında olan ultrasonik muayene yöntemi uygulanmıştır. Ultrasonik muayene yönteminde Roger 400 adlı demiryolu ultrasonik muayene aracı kullanılmıştır. Ultrasonik muayene aracında bulunan problar, aynı anda iki raya da ultrasonik dalgalar gönderebilmektedirler. Bu problar aynı zamanda raylardaki olası kusurlardan geri gelen dalgalarıda almaktadır. Problar dalgaları alarak işleyerek kusurlu yer ve boyutları gibi bilgiler alınabilmektedir. Raylarda tespiti yapılan kusurların türleri hakkında değerlendirme yapmayla kesin bir sonuca ulaşılmayıp ancak yorum yapılabilmektedir.

Ultrasonik muayeneleri yapan personelin 1. Seviye sertifikalı personel olması gerekmektedir. 1. seviye sertifikalı kişi 2. Seviye sertifikalı elemanın ilgili standart veya teknik kurala göre hazırlamış olduğu Muayene Talimatı doğrultusunda muayeneyi yapmaktadır. Muayene talimatında önerilmiş olan rapor formu kullanılarak muayene sırasında elde edilen bulguları (kayıt sınırını aşan bulguları) kaydetmektedir. 1. Seviye uzman saptadığı belirtiler ile ilgili gerekli hesaplamaları yapıp hataları ölçekli bir çizim üzerinde gösterebilmelidir. 2. Seviye uzman ise gerekli kontrolleri yapıp bu hataların ilgili standart veya teknik kurala göre kabul edilebilir olup olmadığına karar verebilmektedir. Ancak 1. Seviye uzman özellikle sürekli olarak belli bir standart veya teknik kural ile çalışılıyorsa ona göre kabul edilebilir veya edilemez hataların neler olduğunu bilmek durumundadır.

Ultrasonik muayenenin amacı, bir kalite değerlendirmesi yapabilmek için test parçası hakkında bilgi sağlamaktır. Doğrudan değerlendirme istisnai bir durum olduğu için ölçüm sonuçları ve bunların hangi koşullarda elde edildiği bir rapor halinde kaydedilmektedir.

Güvenilir bir değerlendirme yapılabilmesi, muayenenin aynı koşullarda tekrarlanabilmesi ve sonuçların, başkaları tarafından yapılan muayenelerle karşılaştırılabilmesi için rapor tam, net ve kuşkuya yer bırakmayacak bilgiler vermelidir. Muayene raporu, aynı zamanda testin gerekli güvenilirlikle yapılıp yapılmadığını da gösteren bir araçtır. Muayene raporlarının işlevsel olabilmeleri için de esas olarak bazı bilgileri içermeleri gerekir. Bu temel bilgilerin dışında başka bilgiler de eğer istenirse rapora katılabilir. Bir muayene raporunda mutlaka olması gereken bilgiler üç grupta toplanabilir:

- Genel Bilgiler
- Muayenenin yapılışı ile ilgili belgeler
- Muayenenin sonuçları ve karar

Ultrasonik muayenede kullanılan demiryolu aracı

Marmaray hatlarında yapılan ultrasonik muayenelerde Roger 400 aracı kullanılmıştır. Roger 400 aracı CE koşullarına tam uyumlu olarak imal edilmekte ve CE işareti taşımaktadır.

Roger 400 aracı daimi yol altyapısının emniyetli ve etkin rutin kontrollerini gerçekleştirmek için kontrollü bir hızda seyahat ederken aynı zamanda elektronik ölçüm sistemlerini de çalıştırmak için özel olarak geliştirilmiştir. Aşağıda Şekil 50'de fotoğrafı verilmiştir.

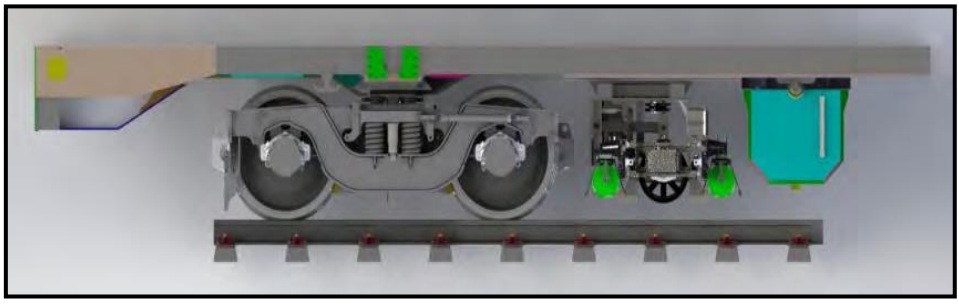


Şekil 50. Roger 400 Ultrasonik Muayene Aracı

Roger 400 ultrasonik muayene aracı, kusur tespiti için 28 adet prob ile ultrasonik çözüm sunabilmektedir ve 28 ultrasonik bilgi kanalı kullanan dağıtık bir işlem mimarisine sahiptir. Her iki taraftaki 14 prob, iki tekerlek problarında bulunur. Tekerlek probların rayın üst kısmına takılıdır ve araç 60 km/sa'ya kadar hızlarda hareket ettikçe ultrason ve ray arasında kuplaj sağlamak için ince bir su buğusu tabakası kullanılır. Ultrasonik veriler konsolide B-Scan (gerçek rayın yan profili) video görüntüsünü oluşturmak için kullanılır; ardından kusur tanımlama ve sınıflandırma için dizimsel örüntü tanıma yazılımı kullanılır. Atım yoğunluğu mesafeye bağlıdır ve bir kodlayıcı ile kontrol edilir. Yazılım Windows gerçek zamanlı platformu üzerinde çalışır ve tüm veriler iki ayrı sabit sürücüde saklanır. Tüm tanıma ve sınıflandırma gerçek zamanlı olarak yapılır ve iki adet 20 inç düz panel ekranda test aracı operatörü tarafından izlenir. Sistem ayrıca, tekerlek problarını ray gövdesi üzerinden hizalamak için bir PLC kontrolünü de içermektedir. Tüm test verileri, hassas kodlayıcı sistemi tarafından etiketlenir ve ayrıca yerleşik

GPS sistemine referans olarak verilir. Bu, çoklu testler boyunca çevrimdışı gözden geçirme ve karşılaştırma histogramlarının geliştirilmesine olanak tanır (Ray üstü kusur ölçüm arabası kullanım kılavuzu, 2015).

Roger 400'e aşağıda Şekil 51'de gösterilen kompakt bir mekanik ölçüm arabası ile entegre edilmiştir. Test ölçüm arabası, demiryolu raylarının saha testi ultrasonik problu tekerlekleri desteklemek ve kontrol etmek için tasarlanmış, çekilebilir bir araçtır. Temel olarak, ölçüm arabası ultrasonik ölçümleri yapmak üzere tekerlek problarını konumlandırmak için gereken mekanik hareketleri sağlar. Ölçüm arabası araç şasesinin altında bulunur ve sağlam, dayanıklı olacak şekilde tasarlanmıştır. Doğru ultrasonik ölçümler yapmak için, ray yüzeyi ve tekerlek probu arasında kesintisiz bir kuplaj maddesi filmi (su/antifriz) tabakası bulundurulmalıdır. Test ölçüm arabası, prob tekerleğinin her iki tarafına kuplaj maddesi beslenmesine izin vermek için entegre su hatları ile tasarlanmıştır. Ray üzerinde test dışı seyahatler sırasında yukarı pozisyonda kilitlenebilir ve demiryolu ultrasonik testi için indirilebilir (Ray üstü kusur ölçüm arabası kullanım kılavuzu, 2015).



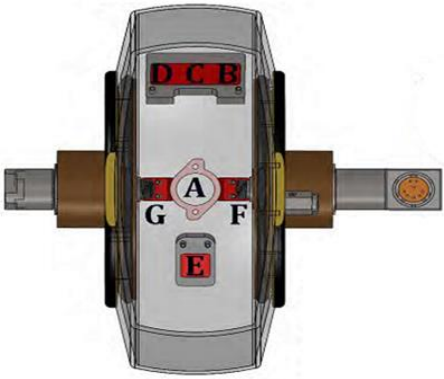
Şekil 51. Roger 400'e Entegre Ölçüm Arabasının Yerleşimi

Roger 400' e entegre ölçüm arabasında her kanatta bir set toplam 4 adet probların yerleştirildiği tekerlek vardır. Aşağıda Şekil 52'de bu tekerler görülmektedir.



Şekil 52. Ölçüm Arabasının Tekerleklerinden Bir Görüntü

Ölçüm arabasındaki tekerleklerde bulunan probların pozisyonları, açıları (^{0}) ve ses dalgası frekansları (Hertz) aşağıda Şekil 53'de verilmiştir (Ray üstü kusur ölçüm arabası kullanım kılavuzu, 2015).



Prob	Açı (°)	Hertz
A	0	3,5
B	70	2,25
C	70	2,25
D	70	2,25
E	37,5	2,25
F	45	2,25
G	45	2,25

Şekil 53. Ultrasonik Ölçüm Aracındaki Ultrasonik Problar ve Özellikleri

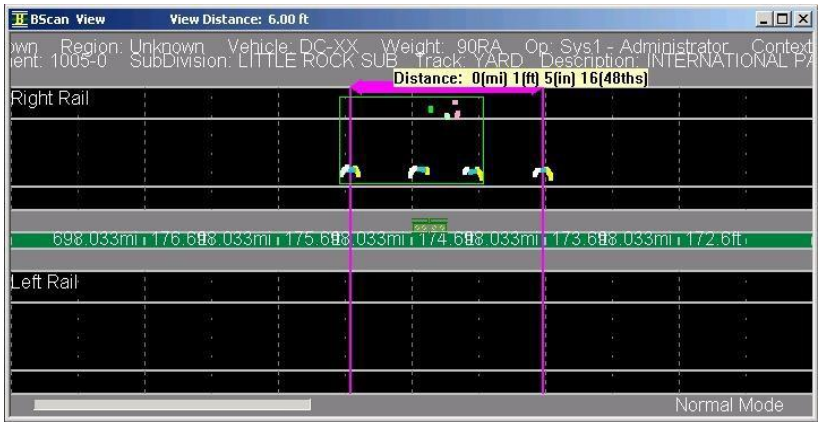
Ultrasonik muayene aracı ile ölçüm yaparken ultrasonik sinyallerin gerçek zamanlı dijital işlemesi için tasarlanan DSİ test sistemi sunmaktadır. Bunun anlamı sistemin her 100 mikro-saniye 'de ultrasonik enerjiyi test rayına gönderdiği ve geri dönen ultrasonik enerjiler için rayı izlediğidir. Sistem, gerçek zamanlı örüntü tanıma algoritmaları kullanarak herhangi bir dâhili anomalinin ayrıntılı görüntülerini oluşturmak için alınan ultrasonik sinyalleri sayısallaştırır ve analiz eder. Yüksek çözünürlüklü bir kodlayıcı, ultrasonik belirtileri haritalamak için gerekli olan doğru bir mesafeye bağlı atım yoğunluğu üretir (Ray üstü kusur ölçüm arabası kullanım kılavuzu, 2015).

Ultrasonik muayene yaparken problardan alınan veriler araç içindeki bilgisayarlarda grafiksel olarak görüntülenir. Bu Şekil 54'te verilen grafiksel görüntüye BScan görünüm denir (DSP test ve çalıştırma el kitabı, 2015).



Şekil 54. Ultrasonik Muayene Aracında Bscan Görünüm

Ultrasonik muayene esnasında problar tarafından herhangi bir ray kusuru tespit edildiğinde, kusurlar ultrasonik muayene aracındaki bilgisayarlarda görüntülenir. Burada ray kusurunun bulunduğu kilometre, hangi rayda meydana geldiği, boyutu gibi bilgiler kontrol edilir ve Şekil 55'te görüldüğü gibi ekrana yansıtılır ve tüm ölçüm otomatik olarak kayıt edilir.

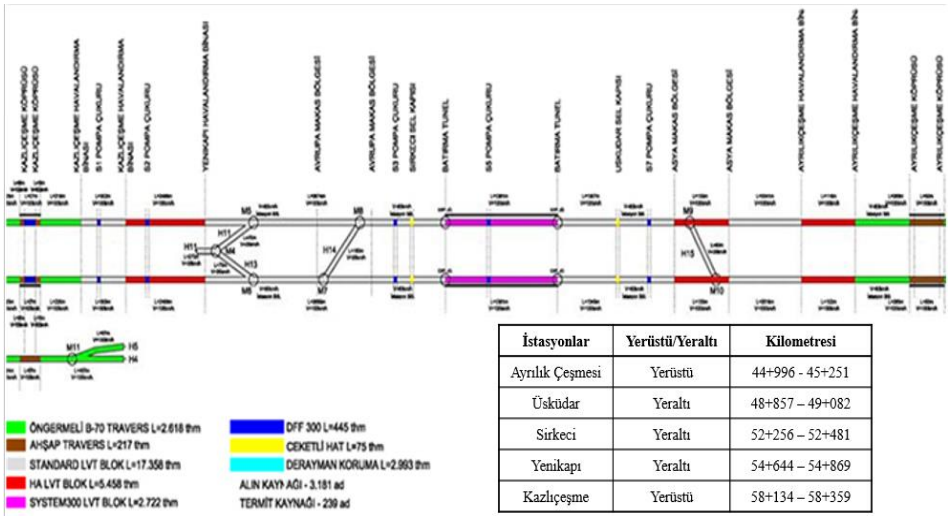


Şekil 55. Ultrasonik Muayene Esnasında Hatanın Boyutunun Tespitindeki Görüntü

Ölçüm tamamlandıktan sonra ölçüm kayıtları harici disk yardımıyla bilgisayara aktarılır ve kusurların değerlendirilmesi bilgisayar ortamında yapılır. Tespit edilen ray kusurlarının hattın hangi kısımlarında olduğu, büyüklüğü ve rayın hangi kısmında olduğu belirlenir (DSP test ve çalıştırma el kitabı, 2015).

Marmaray demiryolu hattı

29.10.2013 yılında ilk yolcu taşımacılığına başlanmış olup hala devam etmektedir. Çift hat olarak yapılmış ve bir hat uzunluğu 13363 m'dir. 3 yeraltı ve 2 yüzeysel durak ve istasyon vardır. Hatlarda kullanılmakta olan rayların malzemesi UIC 60 ayrıca mantarları sertleştirilmiş raylardır. Bu hattaki en dar dönemeç yarıçapı 301,5 metredir. En fazla eğim binde 17.72 ile Üsküdar-Sirkeci arasındadır. Kazlıçeşme-Ayrılık Çeşmesi yol ile ilgili teknik bilgiler ve istasyon mesafeleri Şekil 56'da verilmiştir.



İstasyonlar	Yerüstü/Yeraltı	Kilometresi
Ayrılık Çeşmesi	Yerüstü	44+996 - 45+251
Üsküdar	Yeraltı	48+857 – 49+082
Sirkeci	Yeraltı	52+256 – 52+481
Yenikapı	Yeraltı	54+644 – 54+869
Kazlıçeşme	Yerüstü	58+134 – 58+359

Şekil 56. Kazlıçeşme-Ayrılık Çeşmesi Yol ile İlgili Teknik Bilgiler ve İstasyon Mesafeleri

BULGULAR

Marmaray hattında ultrasonik muayene yöntemi 31 Ocak 2019 tarihinde Marmaray tren seferleri bittikten sonra gece 01:00 den sonra ultrasonik muayene seviye 1 teknisyenler ile birlikte yapılmıştır. Sonra ultrasonik muayene seviye 2 mühendisler ile kaydettiğimiz veriler ile ofiste değerlendirilmiştir. Bu değerlendir-

melerde tespit edilen raylardaki kusurların büyüklükleri, bulundukları kilometreler ve raylarda bulundukları bölgeler belirlenmiştir (Castellanos, Gharaibeh, 2011).

Ultrasonik muayeneye ilk olarak Ayrılık Çeşmesi - Üsküdar istasyonları arasında yapılmıştır. Kilometre 44+996'dan başlayıp, 48+857 kilometreleri arasında yer almaktadır. Yani Ayrılık Çeşmesi – Üsküdar arasındaki toplam mesafe 3861 m'dir. Ayrılık Çeşmesi istasyonu yerüstünde olup, Üsküdar istasyonu yer altındadır. 18 metre uzunluğundaki raylar alüminotermit ve yakma alın kaynağı yapılarak birleştirilmiştir. Bu anlamda raylara yapılan kaynak sayıları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

- $Ray\ kaynağı\ sayısı = \frac{2\times3861}{18} = 429$

Ayrılık Çeşmesi - Üsküdar arasındaki ultrasonik muayenede incelenen 429 adet ray kaynağı ve 3861 metrelik hatta rayların kaynak yerlerinde 15 adet, raylarda 5 adet kusur görülmüştür.

Tablo 1. Ayrılık Çeşmesi - Üsküdar istasyonları arasındaki kusurların ray ve ray kaynaklarındaki oranları.

	Ray kaynağı	**Ray**
Kusur Sayısı	15	5
Kusur Oranı (%)	75	25

Tablo 1'de görüldüğü gibi tespit edilen ray kusurlarının %75 ray kaynaklarında olduğu gözlemlenmiştir. 429 ray kaynağında 15 adet olduğuna göre, kaynaklardaki kusur %3,5'dur.

Tablo 2. Ayrılık Çeşmesi - Üsküdar İstasyonları Arasındaki Ray Kaynaklarındaki Kusurların Oranları

	Ray Mantarı	**Ray Gövdesi**
Kusur Sayısı	6	9
Kusur Oranı (%)	40	60

Ayrılık Çeşmesi - Üsküdar hattında Tablo 2'de görüldüğü gibi ray kaynaklarında görülen 15 adet kusurun, 9 tanesi ray gövdesinde, 6 tanesi ray mantarında görülmüştür.

TCDD mühendisleri tarafından hazırlanan raporda ray kusurlarının hangi kilometrede bulunduğu, kaynakta bulunduğu bölge ve boyutu verilmiştir.

Tablo 3. Ayrılık Çeşmesi – Üsküdar İstasyonları Arasındaki Tespit Edilen Ray Kaynağı Kusurları

Sıra No	Hat Km'si	Hat Numarası	Ray	Bağlantı Tipi	Hatanın Boyutu	Sonuç
1	45+020	Hat 1	Sağ	Alüminotermit Kaynağı	3 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
2	45+560	Hat 2	Sol	Alüminotermit Kaynağı	3 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
3	45+920	Hat 2	Sağ	Yakma Alın Kaynağı	2 mm	Ray mantarında yatay çatlak
4	46+118	Hat 1	Sol	Alüminotermit Kaynağı	6 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
5	46+694	Hat 2	Sol	Alüminotermit Kaynağı	2 mm	Ray mantarında yatay çatlak
6	46+874	Hat 2	Sol	Yakma Alın Kaynağı	4 mm	Ray mantarında oval boşluk
7	47+036	Hat 1	Sol	Alüminotermit Kaynağı	5 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
8	47+556	Hat 2	Sol	Alüminotermit Kaynağı	6 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
9	47+654	Hat 1	Sağ	Alüminotermit Kaynağı	4 mm	Ray mantarında yatay çatlak
10	47+878	Hat 1	Sağ	Alüminotermit Kaynağı	3 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
11	47+992	Hat 2	Sağ	Alüminotermit Kaynağı	4 mm	Ray mantarında yatay çatlak
12	48+152	Hat 1	Sol	Alüminotermit Kaynağı	2 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
13	48+356	Hat 1	Sol	Yakma Alın Kaynağı	3 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
14	48+726	Hat 1	Sol	Yakma Alın Kaynağı	6 mm	Ray mantarında enine çatlak
15	48+825	Hat 2	Sağ	Alüminotermit Kaynağı	8 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak

Tablo 4. Ayrılık Çeşmesi – Üsküdar istasyonları arasındaki tespit edilen raylardaki kusurlar.

Sıra No	Hat Km'si	Hat Numarası	Ray	Hata Bölgesi	Hatanın Boyutu	Sonuç
1	45+125	Hat 2	Sol	Rayda	3 mm	Ray mantarında yatay çatlak
2	45+856	Hat 2	Sol	Rayda	3 mm	Ray mantarında enine çatlak
3	46+451	Hat 1	Sağ	Rayda	2 mm	Ray mantarında yatay çatlak
4	47+421	Hat 1	Sağ	Rayda	6 mm	Ray mantarında oval boşluk

5	47+536	Hat 2	Sol	Rayda	2 mm	Ray mantarında enine çatlak

Ayrılık Çeşmesi - Üsküdar hattında Tablo 5'te 'da görüldüğü gibi raylarda görülen 5 adet kusurun tamamı ray mantarında olduğu görülmüştür.

Tablo 5. Ayrılık Çeşmesi - Üsküdar İstasyonları Arasındaki Raylardaki Kusurların Oranları

	Ray Mantarı	**Ray Gövdesi**
Kusur Sayısı	5	0
Kusur Oranı (%)	100	0

Üsküdar - Sirkeci istasyonları arasında ultrasonik muayene incelemesi: Üsküdar – Sirkeci istasyonları kilometre 48+857 den başlayıp, 52+256 kilometreleri arasında yer almaktadır. Yani Üsküdar – Sirkeci arasındaki toplam mesafe 3399 m'dir. Üsküdar ve Sirkeci istasyonları yer altında bulunmaktadır. 18 metre uzunluğundaki raylar alüminotermit ve yakma alın kaynağı yapılarak birleştirilmiştir. Bu anlamda raylara yapılan kaynak sayıları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

- $Ray\ kaynağı\ sayısı = \frac{2\times3399}{18} = 377{,}6 \cong 377$

Ayrılık Çeşmesi - Üsküdar arasındaki ultrasonik muayenede incelenen 377 adet ray kaynağı ve 3399 metrelik hatta rayların kaynak yerlerinde 12 adet, raylarda 4 adet kusur görülmüştür.

Tablo 6. Üsküdar – Sirkeci İstasyonları Arasındaki Kusurların Ray Ve Ray Kaynaklarındaki Oranları

	Ray kaynağı	**Ray**
Kusur Sayısı	12	4
Kusur Oranı (%)	75	25

Tablo 6'de görüldüğü gibi tespit edilen ray kusurlarının %75 ray kaynaklarında olduğu gözlemlenmiştir. 377 ray kaynağından da 12 adet ray kusuru olduğuna göre, kaynaklardaki kusur %3,18'dir.

TCDD mühendisleri tarafından hazırlanan raporda ray kusurlarının hangi kilometrede bulunduğu, kaynakta bulunduğu bölge ve boyutu verilmiştir.

Tablo 7. Üsküdar – Sirkeci İstasyonları Arasındaki Tespit Edilen Ray Kaynağı Oranları

Sıra No	Hat Km'si	Hat Numarası	Ray	Bağlantı Tipi	Hatanın Boyutu	Sonuç
1	48+920	Hat 1	Sağ	Alüminotermit Kaynağı	4 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
2	49+126	Hat 2	Sol	Yakma Alın Kaynağı	3 mm	Ray mantarında yatay çatlak
3	49+854	Hat 1	Sol	Yakma Alın Kaynağı	2 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
4	50+040	Hat 1	Sol	Alüminotermit Kaynağı	5 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
5	50+650	Hat 2	Sol	Alüminotermit Kaynağı	6 mm	Ray mantarında yatay çatlak
6	50+998	Hat 1	Sağ	Yakma Alın Kaynağı	4 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
7	51+118	Hat 1	Sağ	Yakma Alın Kaynağı	3 mm	Ray gövdesinde oval boşluk
8	51+452	Hat 2	Sağ	Alüminotermit Kaynağı	5 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
9	51+758	Hat 2	Sağ	Yakma Alın Kaynağı	3 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
10	51+962	Hat 1	Sağ	Alüminotermit Kaynağı	5 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
11	52+176	Hat 2	Sol	Alüminotermit Kaynağı	5 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
12	52+356	Hat 2	Sağ	Yakma Alın Kaynağı	6 mm	Ray gövdesinde enine çatlak

Üsküdar - Sirkeci hattında Tablo 7'da görüldüğü gibi ray kaynaklarında görülen 12 adet kusurun, 10 tanesi ray gövdesinde, 2 tanesi ray mantarında görülmüştür.

Tablo 8. Üsküdar – Sirkeci İstasyonları Arasındaki Ray Kaynaklarındaki Kusurların Oranları

	Ray Mantarı	Ray Gövdesi
Kusur Sayısı	2	10
Kusur Oranı (%)	16,67	83,33

Tablo 9. Üsküdar – Sirkeci İstasyonları Arasındaki Tespit Edilen Raylardaki Kusurlar

Sıra No	Hat Km'si	Hat Numarası	Ray	Hata Bölgesi	Hatanın Boyutu	Sonuç
1	49+123	Hat 1	Sol	Rayda	5 mm	Ray mantarında yatay çatlak
2	50+856	Hat 2	Sol	Rayda	3 mm	Ray mantarında enine çatlak
3	51+368	Hat 1	Sağ	Rayda	4 mm	Ray mantarında yatay çatlak
4	51+863	Hat 2	Sağ	Rayda	2 mm	Ray mantarında oval boşluk

Üsküdar - Sirkeci hattında Tablo 9'da görüldüğü gibi raylarda görülen 4 adet kusurun tamamı ray mantarında olduğu görülmüştür.

Tablo 10. Üsküdar – Sirkeci İstasyonları Arasındaki Raylardaki Kusurların Oranları

	Ray Mantarı	Ray Gövdesi
Kusur Sayısı	4	0
Kusur Oranı (%)	100	0

Sirkeci – Yenikapı istasyonları arasında ultrasonik muayene incelemesi: Sirkeci – Yenikapı istasyonları kilometre 52+256'den başlayıp, 54+644 kilometreleri arasında yer almaktadır. Yani Sirkeci – Yenikapı arasındaki toplam mesafe 2388 m'dir. Sirkeci ve Yenikapı istasyonları yer altında bulunmaktadır. 18 metre uzunluğundaki raylar alüminotermit ve yakma alın kaynağı yapılarak birleştirilmiştir. Bu anlamda raylara yapılan kaynak sayıları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

- $Ray\ kaynağı\ sayısı = \frac{2\times2388}{18} = 265{,}33 \cong 265$

TCDD mühendisleri tarafından hazırlanan raporda ray kusurlarının hangi kilometrede bulunduğu, kaynakta bulunduğu bölge ve boyutu verilmiştir**.**

Tablo 11. Sirkeci – Yenikapı İstasyonları Arasındaki Tespit Edilen Ray Kaynağı Kusurları

Sıra No	Hat Km'si	Hat Numarası	Ray	Bağlantı Tipi	Hatanın Boyutu	Sonuç
1	52+270	Hat 1	Sol	Alüminotermit Kaynağı	2 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
2	52+596	Hat 2	Sol	Yakma Alın Kaynağı	5 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
3	52+851	Hat 2	Sağ	Yakma Alın Kaynağı	6 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
4	52+963	Hat 1	Sağ	Alüminotermit Kaynağı	4 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
5	53+058	Hat 2	Sol	Yakma Alın Kaynağı	3 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
6	53+119	Hat 2	Sol	Alüminotermit Kaynağı	2 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
7	53+195	Hat 1	Sağ	Alüminotermit Kaynağı	7 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
8	53+384	Hat 2	Sağ	Alüminotermit Kaynağı	3 mm	Ray mantarında enine çatlak
9	53+596	Hat 1	Sol	Alüminotermit Kaynağı	4 mm	Ray mantarında yatay çatlak
10	53+878	Hat 1	Sağ	Alüminotermit Kaynağı	3 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
11	53+992	Hat 2	Sağ	Yakma Alın Kaynağı	5 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
12	54+025	Hat 1	Sol	Alüminotermit Kaynağı	2 mm	Ray mantarında enine çatlak
13	54+187	Hat 1	Sol	Yakma Alın Kaynağı	7 mm	Ray mantarında enine çatlak
14	54+225	Hat 1	Sağ	Alüminotermit Kaynağı	3 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
15	54+357	Hat 2	Sol	Yakma Alın Kaynağı	2 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
16	54+539	Hat 2	Sol	Alüminotermit Kaynağı	4 mm	Ray gövdesinde enine çatlak

Sirkeci - Yenikapı arasındaki ultrasonik muayenede incelenen 265 adet ray kaynağı ve 3399 metrelik hatta rayların kaynak yerlerinde 16 adet, raylarda 6 adet kusur görülmüştür.

Tablo 12. Sirkeci – Yenikapı İstasyonları Arasındaki Kusurların Ray Ve Ray Kaynaklarındaki Oranları

	Ray kaynağı	Ray
Kusur Sayısı	16	6
Kusur Oranı (%)	72,73	27,27

Tablo12'de görüldüğü gibi tespit edilen ray kusurlarının %72,73 ray kaynaklarında olduğu gözlemlenmiştir. 265 ray kaynağından da 16 adet ray kusuru olduğuna göre, kaynaklardaki kusur %6,03'dir.

Sirkeci - Yenikapı hattında Tablo 13'de görüldüğü gibi ray kaynaklarında görülen 16 adet kusurun, 12 tanesi ray gövdesinde, 4 tanesi ray mantarında görülmüştür.

Tablo 13. Sirkeci – Yenikapı İstasyonları Arasındaki Ray Kaynaklarındaki Kusurların Oranları

	Ray Mantarı	Ray Gövdesi
Kusur Sayısı	4	12
Kusur Oranı (%)	25	75

Tablo 14. Sirkeci – Yenikapı İstasyonları Arasındaki Tespit Edilen Raylardaki Kusurlar

Sıra No	Hat Km'si	Hat Numarası	Ray	Hata Bölgesi	Hatanın Boyutu	Sonuç
1	52+368	Hat 1	Sol	Rayda	2 mm	Ray mantarında yatay çatlak
2	52+854	Hat 2	Sol	Rayda	3 mm	Ray mantarında oval boşluk
3	53+096	Hat 2	Sağ	Rayda	6 mm	Ray mantarında enine çatlak
4	53+489	Hat 1	Sağ	Rayda	3 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
5	53+957	Hat 2	Sol	Rayda	3 mm	Ray mantarında enine çatlak
6	54+120	Hat 2	Sol	Rayda	2 mm	Ray mantarında yatay çatlak

Sirkeci - Yenikapı hattında Tablo 15'de görüldüğü gibi raylarda görülen 6 adet kusurun 5 tanesi ray mantarında, 1 tanesi ray gövdesinde olduğu görülmüştür.

Tablo 15. Sirkeci – Yenikapı İstasyonları Arasındaki Raylardaki Kusurların Oranları

	Ray Mantarı	Ray Gövdesi
Kusur Sayısı	5	1
Kusur Oranı (%)	83,33	16,67

Yenikapı - Kazlıçeşme istasyonları arasında ultrasonik muayene incelemesi: Yenikapı – Kazlıçeşme istasyonları kilometre 54+644'den başlayıp, 58+359 kilometreleri arasında yer almaktadır. Yani Yenikapı – Kazlıçeşme arasındaki toplam mesafe 3715 m'dir. Yenikapı istasyonu yer altında olup, Kazlıçeşme istasyonu yer üstünde bulunmaktadır. 18 metre uzunluğundaki raylar alüminotermit ve yakma alın kaynağı yapılarak birleştirilmiştir. Bu anlamda raylara yapılan kaynak sayıları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

- $Ray\ kaynağı\ sayısı = \frac{2\times3715}{18} = 412{,}77 \cong 412$

Yenikapı - Kazlıçeşme arasındaki ultrasonik muayenede incelenen 412 adet ray kaynağı ve 3715 metrelik hatta rayların kaynak yerlerinde 18 adet, raylarda 7 adet kusur görülmüştür.

TCDD mühendisleri tarafından hazırlanan raporda ray kusurlarının hangi kilometrede bulunduğu, kaynakta bulunduğu bölge ve boyutu verilmiştir.

Tablo 16. Yenikapı – Kazlıçeşme İstasyonları Arasındaki Tespit Edilen Ray Kaynağı Kusurları

Sıra No	Hat Km'si	Hat Numarası	Ray	Bağlantı Tipi	Hatanın Boyutu	Sonuç
1	54+897	Hat 1	Sağ	Alüminotermit Kaynağı	2 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
2	55+120	Hat 2	Sol	Yakma Alın Kaynağı	3 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
3	55+458	Hat 2	Sol	Alüminotermit Kaynağı	2 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
4	55+869	Hat 1	Sol	Yakma Alın Kaynağı	4 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
5	56+026	Hat 2	Sol	Yakma Alın Kaynağı	6 mm	Ray mantarında yatay çatlak
6	56+348	Hat 2	Sol	Alüminotermit Kaynağı	5 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
7	56+591	Hat 1	Sağ	Yakma Alın Kaynağı	4 mm	Ray gövdesinde oval boşluk
8	56+686	Hat 2	Sol	Alüminotermit Kaynağı	6 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
9	56+798	Hat 1	Sağ	Alüminotermit Kaynağı	4 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
10	56+825	Hat 2	Sağ	Yakma Alın Kaynağı	3 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
11	56+914	Hat 2	Sağ	Yakma Alın Kaynağı	7 mm	Ray mantarında enine çatlak
12	57+012	Hat 1	Sağ	Yakma Alın Kaynağı	4 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
13	57+259	Hat 2	Sağ	Alüminotermit Kaynağı	5 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
14	57+461	Hat 1	Sol	Yakma Alın Kaynağı	7 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
15	57+557	Hat 2	Sol	Yakma Alın Kaynağı	5 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
16	57+924	Hat 2	Sol	Yakma Alın Kaynağı	7 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
17	58+023	Hat 1	Sol	Yakma Alın Kaynağı	3 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
18	58+256	Hat 2	Sağ	Alüminotermit Kaynağı	3 mm	Ray gövdesinde enine çatlak

Tablo 17.Yenikapı – Kazlıçeşme İstasyonları Arasındaki Kusurların Ray Ve Ray Kaynaklarındaki Oranları

	Ray kaynağı	Ray
Kusur Sayısı	18	7
Kusur Oranı (%)	72,00	28,00

Tablo 17'de görüldüğü gibi tespit edilen ray kusurlarının %72 ray kaynaklarında olduğu gözlemlenmiştir. 412 ray kaynağından da 18 adet ray kusuru olduğuna göre, kaynaklardaki kusur %4,37'dir.

Yenikapı - Kazlıçeşme hattında aşağıdaki tabloda görüldüğü gibi ray kaynaklarında görülen 18 adet kusurun, 16 tanesi ray gövdesinde, 2 tanesi ray mantarında görülmüştür.

Tablo 18. Yenikapı – Kazlıçeşme İstasyonları Arasındaki Ray Kaynaklarındaki Kusurların Oranları

	Ray Mantarı	Ray Gövdesi
Kusur Sayısı	2	16
Kusur Oranı (%)	11,11	88,89

Tablo 19. Yenikapı – Kazlıçeşme İstasyonları Arasındaki Tespit Edilen Raylardaki Kusurlar

Sıra No	Hat Km'si	Hat Numarası	Ray	Hata Bölgesi	Hatanın Boyutu	Sonuç
1	55+050	Hat 1	Sağ	Rayda	2 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
2	55+973	Hat 2	Sol	Rayda	3 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
3	56+356	Hat 2	Sol	Rayda	2 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
4	56+712	Hat 1	Sol	Rayda	4 mm	Ray gövdesinde yatay çatlak
5	57+113	Hat 2	Sol	Rayda	6 mm	Ray mantarında yatay çatlak
6	57+896	Hat 2	Sol	Rayda	5 mm	Ray gövdesinde enine çatlak
7	58+198	Hat 1	Sağ	Rayda	4 mm	Ray gövdesinde oval boşluk

Yenikapı - Kazlıçeşme hattında Tablo 19'da görüldüğü gibi raylarda görülen 7 adet kusurun 6 tanesi ray mantarında, 1 tanesi ray gövdesinde olduğu görülmüştür.

Tablo 20. Yenikapı – Kazlıçeşme İstasyonları Arasındaki Raylardaki Kusurların Oranları

	Ray Mantarı	Ray Gövdesi
Kusur Sayısı	6	1
Kusur Oranı (%)	85,71	14,29

TARTIŞMA

Ülkemizde son yıllarda gelişmekte olan demiryolları ağında bakım ve onarım kavramının önemi artmıştır. Demiryolları deyince de akla ilk gelen rayların da kontrolü bir o kadar önem arz etmektedir. Rayların kontrolü yaparken, hem de-

miryolu işletmeciliğini aksatmadan hem de rayların yapısını bozmadan yapabilmek için tahribatsız muayene yöntemleri yapılmaktadır. Raylarda bulunan kusurların tespiti için dünyanın en çok kullandığı yöntem tahribatsız muayene yöntemleridir. Bu yöntemlerin önemlileri: görsel muayene, ultrasonik muayene, girdap akımları muayene, radyografik muayene, sıvı penetrant ile muayene, manyetik parçacık ile muayenedir. Burada da tahribatsız muayene yöntemlerinin neler olduğu kısaca anlatılmış olup ultrasonik muayene geniş bir şekilde anlatılmıştır. Yüksek güvenirliği, yaygın kullanımı, kolay uygulanabilir olması ve etkin olması gibi nedenlerden dolayı ultrasonik muayene yöntemi dünyada tercih nedeni olmaktadır. Tahribatsız muayene yöntemleriyle bulunan ray kusurlarının neler olduğu hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, ultrasonik muayene yöntemi kullanılarak Ayrılık Çeşmesi – Kazlıçeşme Marmaray hattındaki ray kusurları bulunmuş, kusurların özellikleri belirlenmiş ve hattın hangi kesimlerinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Ultrasonik muayene, tüm hatlar boyunca yapılmış, istasyonların sırasına göre sıralı iki istasyon arası olarak değerlendirilmeye alınmıştır.

Ayrılık Çeşmesi – Kazlıçeşme Marmaray hattında yapılan ultrasonik ölçümün sonuçlarına göre; hatların tamamında tespit edilmiş kusur dağılımı %73,68'i rayların kaynaklarından, %26,32'si raylardan olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuca göre kusurların büyük çoğunluğu ray kaynaklarında meydana gelmiştir. Bunun sebebi olarak da ray kaynağında kullanılan malzeme ile rayların malzemelerinin özelliklerinin tamamen aynısı olmaması olarak düşünülmektedir.

Marmaray hattında hat genelinde ray kaynaklarında tespit edilen kusurların %76,82'si ray gövdesinde, %23,18'i ray mantarında olduğu görülmüştür. Buna göre; ray kaynaklarında görülen kusurların büyük çoğunluğu ray gövdesinde oluştuğu tespit edilmiştir.

Marmaray hattında hat genelinde raylarda(ray kaynakları dışında) tespit edilen kusurların %92,28'i rayların mantar bölgesinde, %7,72'si rayların gövde bölgesinde olduğu görülmüştür. Buradan çıkan sonuç; raylarda görülen kusurların büyük bir çoğunluğu ray mantarında olduğu tespit edilmiştir.

Raylar, ultrasonik muayene yöntemi ile belirli aralıklar ile tekrar tekrar kontrol edilir. Bu tespit edilen ray kusurları bir önceki ölçüm ile kıyaslanır ve ray kusurlardaki ilerleme belirlenir. Buradaki ilerleme ray kırılması olmadan kritik seviyeye gelince raylar değiştirilir. Böylece rayların kırılarak trenlerin raydan çıkmasına sebep olan bu kusurların ölümcül bir sonuç doğurmadan giderilmesi açısından oldukça önemlidir.

KAYNAKÇA

Kılıç, O., (2019). Marmaray demiryolu hattında ray kusurlarının ultrasonik yöntemle incelenmesi ve ray kusurlarının hattın hangi kısımlarında yoğunlaştığının tespiti. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yalçınkaya, S., Kılıç, O. (2019). Marmaray hattının ultrasonik muayene yöntemi ile incelenmesi ve ray kusurlarının nerede yoğunlaştığının tespiti. International congress of academic research (ICARCONGRESS 2019) TURKEY, Bolu, Türkiye, 16 - 18 Eylül 2019.

Bozdağ, A., Ekşi, G., Gelişen, G. (2018). Raylarda gerilim almanın önemi, Demiryolu mühendisliği derneği ss. 78-83. https://docplayer.biz.tr/146129260-Raylarda-gerilim-almanin-onemi.html

Castellanos, C., C., Gharaibeh, Y. (2011). The application of Long Range Ultrasonic Testing (LRUT) to inspect railway tracks. NDT Technology Group TWI. 2011. http://www.monitorail.eu/publication/files/The%20application%20of%20Long%20Range%20Ultrasonic%20Testing%20(LRUT)%20to%20inspect%20railway%20tracks.pdf E.T. 16.01.2019

Doyle, N. F. (1980). Railway track design: a review of current practice, Bureau of transport economics technical report, Canberra, Australia.

DSP test ve çalıştırma el kitabı. (2015). ABD: Nordco Rail Services and Inspection Technologies 2015.

Esveld, C. (2001). Modern Railway Track (Second Edition). Zaltbommel-Netherlands. MRT-Production. ISBN 90-800324-3-3

Esveld, C. (2007). De kracht van het spoor. Afscheidsrede. TU Delft University. Netherlands 2007.

Federal Railroad Administration (FRA). (2015). Track inspector rail defect reference manual. https://railroads.dot.gov/elibrary/track-inspector-rail-defect-reference-manual

Ferreira, L., Murray, M. (1997). Modelling rail track deterioration and maintenance: current practices and future needs. Transportation Review, Vol.17. 1997. pp. 207-221.

Görsel Muayene Eğitim Notu. (2012). Ankara: TCDD Datem İşletme Müdürlüğü, Kasım 2012.

Gür, H., C., Doyum, M, B., Kolankaya, O., Yelbay, H. (2012). Ultrasonik Muayene Seviye 1 Ders Notları. Ankara: ODTÜ Kaynak Teknolojisi ve Tahribatsız Muayene Araştırma/ Uygulama Merkezi, 2012.

Integrated Study of Rolling Contact Fatigue. (1999). European Commission DGX111 Brite/Euram III Project Contract BRPR-CT96-0245 Project Programme. Brussels.

Kaleli, T., Yelbay, H., İ., Gür, H. C. (2017). Kaynak işlemi nedeniyle oluşan kalıntı gerilmelerin mikro-manyetik teknikle tahribatsız olarak ölçülmesi. Kaynak teknolojisi X. ulusal kongre ve sergisi, 17-18 Kasım 2017, Yenimahalle Ankara.

Kaşıkçı, N. (1994). Cer Araçlarında Ultrasonik Muayene ve Kontrol Yöntemleri. Cer Araçlarında. Ankara, Türkiye: TCDD, 1994.

Kerr, M. (2012). Rail defects handbook. Australian rail Track Corporation. Australia 2012.

Kökçe, Y. (2002). Demiryolu taşıt ve raylarının üretim ve tamir-bakımında uygulanan kaynak yöntemlerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi. İstanbul, Türkiye.

Kumar, S. (2006). A study of the rail degradation process to predict rail breaks, (Master thesis). Lulea, Swiss: Lulea University of Technology, 2006.

Li, Q., Ren, S. (2012). A Real-Time Visual Inspection System for Discrete Surface Defects of Rail Heads. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 61, no. 8, pp. 2189-2199, Aug. 2012, doi: 10.1109/TIM.2012.2184959.

Lichtberger, B. (2005). Track compendium: Formation, permanent way, maintenance, economics. Eurailpress in DVV media group; 1. edition (11 April 2005). Hamburg, Germany.

Lichtberger, B., (2011), Demiryolu Cep Kitabı, DVV Media Group, Hamburg, 9783-7771-0422-5.

Merve, T., Atila, K., Umut, B., Şenol E. (2013). 2. Uluslar arası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE'13). 9-11 Ekim 2013, Karabük, Türkiye.

Metal Teknolojisi Ders Notu. (2011). Ankara: T.C. Milli Egitim Bakanlığı, 2011.

Öktem, H. (2002). Ultrasonik Tahribatsız Muayene Tekniğinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi. Doktora tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens. 2002.

Papaelias, M., Roberts, C., Davis, C. L. (2008). A review on non-destructive evaluation of rails: state-of-the-art and future development. Proc. Instn. Mech. Engrs, Part F: J. Rail and Rapid Transit, 2008. Vol. 222. pp. 367-384. https://doi.org/10.1243/09544097JRRT209

Ray üstü kusur ölçüm arabası kullanım kılavuzu. (2015). ABD: Nordco Rail Services and Inspection Technologies, 2015.

Rayların gözle muayenesi. (2012). Rayların gözle muayenesi ne ait 106 numaralı genel emir. s.l.: TCDD Genel Müdürlüğü, 27.01.2012.

Sadeghi, J., Akbari B. (2006). Field Investigation on effects of railway track geometric parameters on rail wear. Journal of Zhejiang University Science A, 2006, Vol.7, No.11 s. 1846~1855 http://doi.org/10.1631/jzus.2006.A1846

Serway, R.A. (1995). A. Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics. 1. Ed. Sounders College Publishing, 1995. Philadelphia.

Singh, L. (2011) Rolling contact fatigue in rails – an overview. Iricien- Indian Railways Seminar http://www.iricen.gov.in/iricen/ipwe_seminar/2011/paper_2_lalloosingh.pdf

Tahribatsız muayene laboratuvar föyleri. (2019). KTU Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü. Trabzon, Türkiye. https://www.ktu.edu.tr/metalurji-deneyfoyleri. E.T. 16.01.2019

UIC-712 R, (2002). Rail defects Paris, France: International Union of Railways (UIC), 2002.

Ultrasonik Muayene (UT 1). (2009). Ultrasonik Muayene (UT 1) Temek Fiziksel Prensipler-1. İstanbul, Türkiye : s.n., 2009.

Ultrasonik Muayene Seviye 1 Kurs Notları. (2003). Kocaeli, Türkiye: TSE Kalite Kampüsü Bölge Müdürlüğü Tahribatsız Muayene Laboratuvarı, 2003.

Zarembski, A. M. (2005). The art and science of rail grinding. Simmons-Boardman books, inc. 2005.Nebraska, USA. ISBN: 0911382488

Zerbst, U., Lunden, R., Edel, K. O., Smith, R. A. (2009). Introduction to the damage tolerance behavior of railway rails – a review, Engineering fracture mechanics, V. 76, is. 17, p. 2563-2601. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2009.09.003


9 786057 594556
GÜVEN PLUS GRUP A.Ş.
ORP
GPGD