MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRON IŞINI ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ Ti-6Al-4V MALZEMENİN MİKRO DELME İŞLEMİNDE KESİCİ TAKIMI ETKİLEYEN KUVVET VE TİTREŞİMİN ANALİZ EDİLMESİ

SERTAÇ ACER
(523219017)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Barkın BAKIR

İstanbul, 2023

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRON IŞINI ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ Ti-6Al-4V MALZEMENİN MİKRO DELME PROSESİNDE KESİCİ TAKIMI ETKİLEYEN KUVVETLERİN VE TİTREŞİM SONUÇLARININ ANALİZİ

SERTAÇ ACER
(523219017)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Barkın BAKIR

İstanbul, 2023

ÖNSÖZ

Öncelikle üniversite hayatım boyunca hem akademik anlamda hemde özel sektör hayatımda çok değerli bilgiler katan ve verimli bir kariyer yapmamı sağlayan çok değerli hocamız Sayın Prof. Dr. Mustafa Kurt hocama teşekkür ederim. Tez çalışması boyunca teknik bilgileriyle ve öğrenim hayatım boyunca adeta bir mentor olarak desteğiyle bana büyük değer katan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Barkın Bakır hocama çok teşekkür ederim. Çalışmalar boyunca materyal, makine ve test ölçüm aletleri konusunda destekler veren değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Gürcan Atakök ve Arş. Gör. Murat Şen hocalarıma da ayrıca teşekkür ederim.

Sertaç ACER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ..... **i**
İÇİNDEKİLER ..... **ii**
ÖZET ..... **iii**
ABSTRACT ..... **iv**
SEMBOLLER ..... **v**
KISALTMALAR ..... **vi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**
TABLO LİSTESİ ..... **ix**
BÖLÜM 1 – GİRİŞ, AMAÇ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **1**
1.1 GİRİŞ 1
1.2 Eklemeli İmalat 4
1.2.1. Elektron Ergitme Yöntemi 8
1.2.2. Eklemeli İmalatta ile Üretilen Malzemelerde Parametrelerin Etkileri 11
1.2.3. Eklemeli İmalat ile Üretilen Titanyum Alaşımı Özellikleri 13
1.3 Geleneksel Yöntemler (Talaşlı İmalat) 15
1.4 Titanyum ve Alaşımları 31
1.5 Literatür 35
1.5.1. Eklemeli İmalat ve Talaşlı İmalat Çalışmaları 35
1.5.2.Eklemeli İmalat ve Delik Delme Çalışmaları 37
BÖLÜM 2 – MATERYAL ve METOT **46**
2.1 Deneylerde kullanılan test düzeneği genel bakış 46
2.2 Malzeme 47
2.3 CNC Freze Tezgâhı 48
2.4 Çalışmada Kullanılan Mikro Matkaplar 51
2.5 Ölçüm Cihazları 51
BÖLÜM 3 – DENEYSEL UYGULAMA ÇALIŞMALARI **55**
3.1 Deney Yöntemi 55
3.2 Deneyler 56
BÖLÜM 4 – SONUÇ VE ÖNERİLER **68**
KAYNAKLAR **69**
ÖZGEÇMİŞ **74**

ÖZET

Eklemeli imalat son zamanlar geleneksel yöntemlerle üretilemeyen tasarıma sahip parçalar için çok önemli bir alternatif olmuştur. Birçok tasarım eklemeli imalat yöntemiyle tek seferde üretilebilmektedir. Eklemeli imalat yöntemi birçok avantaj sağlamakla birlikte bu yöntemle üretilen iş parçalarının doğrudan kullanılamaması en büyük dezavantajlardan birisidir. Üretilen malzemeler genellikle son işleme gereksinimi duyarlar. Bu son işlemler genellikle talaşlı imalat prosesleridir. Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen malzemeler, parçalar genellikle direkt olarak kullanılamaz. Son işleme teknikleri kullanılarak daha kaliteli bir yüzeyle ve ölçülerle kullanılabilir hale gelmektedir. Aksi halde çok yüksek hassasiyetle çalışan uygulama alanlarında kullanılmaları mümkün değildir. Son işlemler sayesinde daha kaliteli bir yüzey, istenen ölçü toleransları ve yüzey bütünlüğü elde edilir. Titanyum belirli karakteristik özelliklerinden dolayı savunma sanayi ve tıp gibi çok önemli alanlarda kullanılmaktadır. Çok önemli alanlarda kullanılan Titanyum alaşımları eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen en yaygın alaşımlardan birisidir. Titanyum, işlenmesi zor ve özel olark çalışılması gereken bir malzemedir. Dolayısıyla son işlemlerde istenen özellikleri elde etmek için parametrelerin iyi belirlenmesi gerekmektedir. Mikro delme işlemi hassasiyetin yüksek olduğu uygulamalarda kullanılmaktadır ve son işleme gereksinimi duyulan proseslerden birisidir. Mikro delme işlemi sırasında mikro matkaplar kullanılmaktadır. Mikro matkaplar çok küçük çaplara sahip oldukları için kırılganlıkları yüksektir ve takım ömürleri kısadır bu yüzden çeşitli kaplamalar kullanılır. Kaplama işlemleri maliyeti yükselten önemli bir etkendir. Mikro matkapların takım ömrünü ve istenen malzeme özelliklerini etkileyen önemli faktörler kesici takıma etki eden kesme kuvvetleri, titreşim, aşınma ve takım ısınması gibi faktörlerdir. Bu tez çalışmasında çeşitli eklemeli imalat yöntemlerinden birisi olan elektron ergitme yöntemiyle üretilmiş olan Titanyum (Ti6Al4V) alaşımının mikro delme işlemi altında farklı kesme hızlarında ve ilerleme oranları altında kesici takımı etkileyen kuvvetler ve titreşimler incelenmiştir ve uygun delik delme parametreleri araştırılmıştır. Titreşim ve kesme kuvvetlerinin delik kalitesi üzerinde araştırmalar yapılmıştır.

ABSTRACT

Additive manufacturing has recently become a very important alternative for designs which cannot be manufactured by conventional methods. Materials produced by additive manufacturing generally requires post-processing. Since they cannot be used in where high sensitivity is very important. Although the additive manufacturing provides many advantages, its one of the biggest disadvantages that the workpieces produced by this method cannot be used directly. Produced materials often need post-processing. These finishing processes are usually machining processes. By using post-processing techniques, it becomes usable with a higher quality surface and dimensions. Otherwise, it is not possible to use them in very high precision application areas. Thanks to the finishing processes, a higher quality surface, desired dimensional tolerances and surface integrity are obtained. Titanium is used in very important fields such as defense industry and medicine due to its specific characteristics. Titanium alloys, which are used in very important applying, are one of the most common alloys produced by additive manufacturing methods. Titanium is a material that is difficult to process and needs to be specially studied. Therefore, it is necessary to determine the parameters well in order to obtain the desired properties in the finishing processes. Micro drilling is used in applications which have high sensitivity. Micro drills are generally used for smaller diameter in precision parts manufacturing used for drilling through holes. Conventional cobalt bonded cemented tungsten carbide micro drills are often used at high cutting speeds low cutting efficiency and short tool when they operated. Since it is expensive to produce tools from these materials, extending the tool life is the goal. The important factors affecting the tool life of micro drills and the desired material properties are the cutting forces acting on the cutting tool, vibration, wear and tool heating. In this thesis, the forces and vibrations affecting the cutting tool at different cutting speeds and feed rates were investigated under the micro drilling process of Titanium (Ti6Al4V) alloy produced by electron melting method, which is one of the various additive manufacturing methods, and suitable hole drilling parameters were investigated. Hole quality were investigated according to vibration and cutting forces.

SEMBOLLER

Ti: Titanyum

Al: Alüminyum

C: Karbon

B: Bor

G: Bilgisayar destekli üretim kodları

µm: Mikron

°C: Santigrat

D: Matkap çapı

f: İlerleme hızı

V: Kesici takım devir sayısı

Rpm: Dakikadaki devir sayısı

Ø: Çap

α: Alfa

β: Beta

Hz: Hertz

KISALTMALAR

Eİ: Eklemeli imalat

EBM: Elektron Bombardımanı ile Ergitme

CAD: Bilgisayar Destekli Tasarım

CAM: Computer Aided Manufacturing

SLM: Seçici Lazer Ergitme

STL: Standart Üçgen Dili

CNC: Bilgisayarlı sayısal kontrol

LBM: Lazer Bombardımanı ile Ergitme

LMD: Lazer Metal Biriktirme

DMLS: Doğrudan Metal Lazer Sinterleme

LMF: Lazer Metal Füzyon

FDM: Eriyik Biriktirerek Modelleme

HSS: Yüksek Hız Çeliği

MQL: Minimum Miktar Yağlama

WC: Çoklu Kaplama

TiN: Titanyum Nitrür

PVD: Fiziksel Buhar Biriktirme

CVD: Kimyasal Buhar Biriktirme

TAlN: Titanyum Alüminyum Nitrür

AlCrN: Alüminyum Krom Nitrür

BUE: Yığma Kenar Talaş Oluşumu

LDV: Doppler Lazer Hız Ölçer

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. 1 Titanyum alaşımlı turbo şarj motoru. 3
Şekil 1. 2 Eklemeli imalat genel akış şeması. 4
Şekil 1. 3 EBM yöntemi şematik gösterimi. 9
Şekil 1. 4 Talaşlı imalat yöntemleri genel bakış gösterimi. 15
Şekil 1. 5 Tornalama işlemi genel gösterimi. 16
Şekil 1. 6 Frezeleme işlemi genel gösterimi. 17
Şekil 1. 7 Delme işleminin diğer talaşlı imalat yöntemleriyle işlem sayısına göre kıyaslanması. 18
Şekil 1. 8 Delme işleminin diğer talaşlı imalat yöntemleriyle talaş kaldırma sürelerinin kıyaslanması. 18
Şekil 1. 9 Örnek mikro matkap uçları. 21
Şekil 1. 10 Çapak oluşum mekanizması. 23
Şekil 1. 11 Çapak çeşitleri a) Üniform b) Süreksiz c) Tac kapak. 23
Şekil 1. 12 Frezeleme prosesinde lazer ile titreşim ölçme düzeneği. 26
Şekil 1. 13 Kaplamalı yüzeyde aşınma gösterimi. 27
Şekil 1. 14 Çeşitli aşınma gösterimleri a) Kesme kenarına paralel alt yüzey kırılımları; b) kesme kenarında kırıklıklar; c) krater aşınmaları. 27
Şekil 1. 15 Geleneksel freze tezgâhı örneği. 30
Şekil 1. 16 Farklı malzemeler ile Titanyum alaşımının farklı sıcaklıklarda karşılaştırılması. 31
Şekil 1. 17 Titanyum alaşımlarının biyomedikal uygulamaları. 32
Şekil 1. 18 Jet motorunda bulunan Titanyum alaşımı malzemeler. 33
Şekil 1. 19 EBM ile üretilmiş titanyum alaşımı mikro frezeleme işlemi. 37

Şekil 2. 1 Deney düzeneği genel tanıtım. 46
Şekil 2. 2 Deneylerde kullanılan malzemenin görüntüsü. 47
Şekil 2. 3 EBM yöntemi ile üretilen yarı mamül malzemeler. 47
Şekil 2. 4 Mikro delme işleminde kullanılan CNC freze tezgâhı. 48
Şekil 2. 5 NIKKEN devir yükseltici takım bağlama aparatı. 50
Şekil 2. 6 Devir yükseltici aparat ile kestamit malzeme mikro delme denemeleri. 50
Şekil 2. 7 Çalışmada kullanılan 0,5 mm, 0,6 mm ve 0,7 mm mikro matkaplar. 51

Şekil 2. 8 Yük amplifikatörü çalışma şeması. 52
Şekil 2. 9 Kuartz dinamometre. 52
Şekil 2. 10 Dinamometre teknik özellikleri. 53
Şekil 2. 11 KISTLER yük amplifikatörü. 53
Şekil 2. 12 KISTLER yük amplifikatörü özellikleri. 54
Şekil 2. 13 Titreşim ölçüm cihazı. 54

Şekil 3. 1 Birinci deney kuvvet grafiği. 56
Şekil 3. 2 Birinci deney delik görüntüsü. 57
Şekil 3. 3 İkinci deney kuvvet grafiği. 57
Şekil 3. 4 İkinci deney delik görüntüsü. 58
Şekil 3. 5 Üçüncü deney kuvvet grafiği. 59
Şekil 3. 6 Üçüncü deney delik görüntüsü. 59
Şekil 3. 7 Dördüncü deney kuvvet grafiği. 60
Şekil 3. 8 Dördüncü deney delik görüntüsü. 60
Şekil 3. 9 Beşinci deney kuvvet grafiği. 61
Şekil 3. 10 Beşinci deney delik görüntüsü. 61
Şekil 3. 11 Altıncı deney kuvvet grafiği. 62
Şekil 3. 12 Altıncı deney delik görüntüsü. 62
Şekil 3. 13 Yedinci deney kuvvet grafiği. 63
Şekil 3. 14 Yedinci deney delik görüntüsü. 63
Şekil 3. 15 Sekizinci deney kuvvet grafiği. 64
Şekil 3. 16 Sekizinci deney delik görüntüsü. 64
Şekil 3. 17 Dokuzuncu deney kuvvet grafiği. 65
Şekil 3. 18 Dokuzuncu deney delik görüntüsü. 65
Şekil 3. 19 Titreşim ölçüm cihazı ekranından alınan ölçüm örneği. 66
Şekil 3. 20 İş parçası üzerindeki deliklerin toplu görüntüsü. 66

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. 1 Eklemeli imalat yöntemleri şematik gösterimi. 7
Tablo 1. 2 Eklemeli imalat ile üretilen malzeme özelliklerini belirleyen parametreler. 12
Tablo 1. 3 EBM ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımının gerilme özellikleri. 14
Tablo 1. 4 Alfa ve Beta özelliklerin gösterimi. 34
Tablo 1. 5 Eklemeli imalat ile üretilen malzemelerde yapılan talaşlı imalat çalışmaları. 43

Tablo 2. 1 Çalışmlarda kullanılan CNC tezgâhın teknik özellikleri. 49
Tablo 2. 2 Deneylerde kullanılan mikro matkap özellikleri. 55
Tablo 2. 3 Deney çalışmaları genel tablosu. 55
Tablo 2. 4 Deney sonuçları tablosu. 67
Tablo 2. 5 Deney sonuçları ve delik çapı kıyaslama tablosu. 67

BÖLÜM 1 – GİRİŞ, AMAÇ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

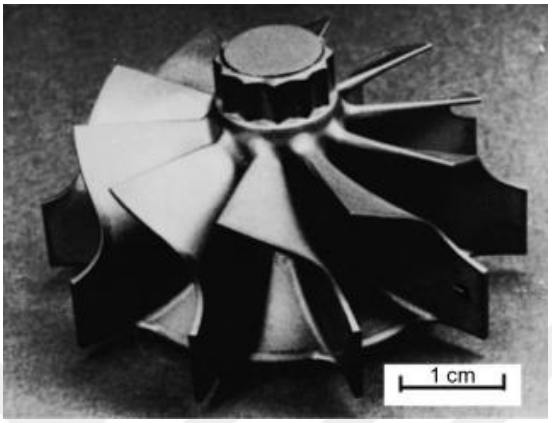
1.1 GİRİŞ

Eski dönemlerde yapılmak istenen cisimler çeşitli el becerileri ve ustalıklara dayanıyor malzemeler ustaların elinde şekil buluyordu. Teknolojinin gelişimi ve sanayi devrimiyle beraber makineleşme süreçleri hızlandı. Sonraki yıllarda ise makinelere bilgisayar destekli çözümler eklenerek ilerleme devam etti. Modern dünyada üretimi istenen cisimler/ tasarımlar öncelikle bilgsayar ortamında tasarlanmaktadır. Daha sonra çeşitli analizlerden sonra üretim yöntemleri belirlenerek üretim aşamasına geçilmektedir. Üretim prosesleri seçilirken hangi malzeme kullanılacağı, hangi yöntemle ve hangi tezgahlarda üretim yapılacağı genel başlıklardır. Daha sonra ise üretim yöntemine göre parametre seçimi ve talaşlı imalat yapılacaksa tezgaha göre kesici takım seçimi gibi unsurlar belirlenmektedir. Tasarımlar hayatta kullanıldığı yere göre farklılıklar oluştururlar. Bu tasarımlar otomotiv, savunma, havacılık ve tıp gibi yerlerde kullanılabilirler ve hayatta karşılaştığımız daha birçok alanda kullanılırlar ve kullanılacakları yere göre en uygun malzeme seçimi yapılır. Malzemeler çeşitli özelliklerine göre farklı uygulama alanarında kullanılabilirler. Malzemelerin kullanıldığı alanlar bazı özellikler gerektirirler. Örneğin havacılıkta yüksek mukavemet ve hafiflik aranan özellikken tıpta ise canlı vücuduna uyumluluk, yüksek mukavemet istenilen özelliktr. Titanyum alaşımı malzemeler özellikle havacılık, otomotiv, enerji, savunma sanayi ve biyomedikal alanlarda oldukça fazla tercih edilmektedir. Tıp alanında canlı vücuduna uyumu, vücuttaki kimyasallar ile tepkimeye girmemesi ve havacılık alanında yüksek mukavemet ile yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesi titanyum alaşımlarını tercih edilir kılmıştır. Saf titanyum ve titanyum alaşımlarının çelikten %60 daha az yoğunluktan dolayı hafif olmaları, yüksek dayanıklılığa sahip olmaları ve mükemmel derecede aşınma dirençleriyle hava araçlarında oldukça yaygın kullanılırlar [1]. Titanyum ve alaşımları özellikle az yoğunluğa sahip olmaları ve yüksek korozyon direncine sahip olmaları nedeniyle de oldukça fazla tercih edilirler [2]. Günümüzde çoğunlukla talaşlı imalat gibi geleneksel imalat yöntemleri kullanılsa da eklemeli imalat gibi yenilikçi yöntemler gittikçe yaygınlaşmaktadır ve birçok avantaja sahiptirler. Geleneksel imalat yöntemleriyle üretilmesi mümkün olmayan tasarımlar eklemeli imalat yöntemiyle rahatlıkla üretilebilmektedirler. Talaşlı imalat yöntemlerinde çok fazla malzeme israfı

vardır fakat eklemeli imalat yöntemlerinde malzeme israfı çok azdır. Kalıp maliyeti olmadan düşük iş gücü ile yüksek hassasiyette üretim eklemeli imalatın avantajlarından birisidir. Elektron ergitme yöntemi (EBM, Electron Beam Melting) çeşitli eklemeli imalat yöntemlerinden birisidir. Birçok eklemeli imalat yöntemi vardır ve elektron ergitme yöntemi de bunlardan birisidir. İstenilen parçaların farklı özelliklere sahip olmasının istendiği durumlar olmaktadır buda Eİ yöntemlerinin gelişmesinde önemli rol oynamıştır. Son malzeme tasarımına yakın modeller eklemeli imalat yöntemleriyle ortaya çıkarılabilir. Eklemeli imalat yöntemlerinin en büyük avantajlarından bazıları kalıp üretimi ve üretim hattı kurulmasına ihtiyaç olmamasıdır. Hasarlı malzemeler için uzaktan üretim yöntemine olanak sağladığı içinde avantajlı olacağı düşünülmektedir. Eklemeli imalat yöntemlerinin birbirilerine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Genel olarak avantajları geleneksel yöntemlerle üretmenin çok zor olduğu karmaşık yapıdaki tasarımları üretmek ve düşük iş gücü ile ek maliyetlerden tasarruf sağlamasıdır. Titanyum alaşımları çok farklı alanlarda çok karmaşık tasarımlarda kullanılmaktadırlar bu yüzden eklemeli imalat zorlukları kolaylaştırmış ve birçok avantaj sağlamıştır.

Seçici lazer ışınıyla ergitme yöntemi gibi eklemeli imalat yöntemleri Argon gazını kullanarak lazer ışınıyla metal tozlarını katman katman ekleyerek üretim yaparken elektron ergitme yöntemi sırasında *Ti-6Al-4V* metal tozları yüksek elektron ışını kullanılarak ergitilir ve katman katman eklenerek istenen tasarım parçası ortaya çıkar. Ergitilmiş metal tozları bir araya getirilerek asıl parça ortaya çıkar. Eklemeli imalat ile üretilmiş malzemeler genellikle çok iyiy bir yüzey kalitesine sahip değildirler bu yüzden son işleme prosesine ihtiyaç duyarlar. Son zamanlarda gelişen ve yaygınlaşan eklemeli imalat teknolojileri havacılık ve tıp gibi çok önemli ve hassasiyetin yüksek olduğu sektörlerde kullanılmaktadırlar dolayısıyla son işleme operasyonu ve mikro delikler gibi düşük tolerans seviyeleri ve yüksek kalite için eksta işleme prosesleri gerekmektedir [3].Havacılıkta kullanılan motor parçalarında Inconel ve alaşımları daha çok kullanılırken gövde ve yapısal parçalarda Titanyum ve alaşımları daha çok kullanılmaktadır. Özellikle Ti6Al4V alaşımı kullanımı bazı özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Bu özellikler daha sonra Titanyum ve alaşımları kısmında detaylı anlatılmıştır. Diğer üretim yöntemleriyle üretilebilen Titanyum alaşımları bu sektörlerde kullanılabilir ve istenen özelliklere sahip olabilir aynı özellikleri eklemeli imalat ile üretilen malzemelerde karşılayabilir bu yüzden eklemeli imalat ile üretilmiş malzemelerde bu sektörlerde

kullanılırlar [4]. Eklemeli imalat teknolojisinde malzeme tasarımında herhangi bir değişiklik olduğunda kalıp değişimi kesici takım değişimi gibi konular olmaması büyük avantajdır. Sadece üç boyutlu model tasarımı değiştirilerek istenen model elde edilebilmektedir.

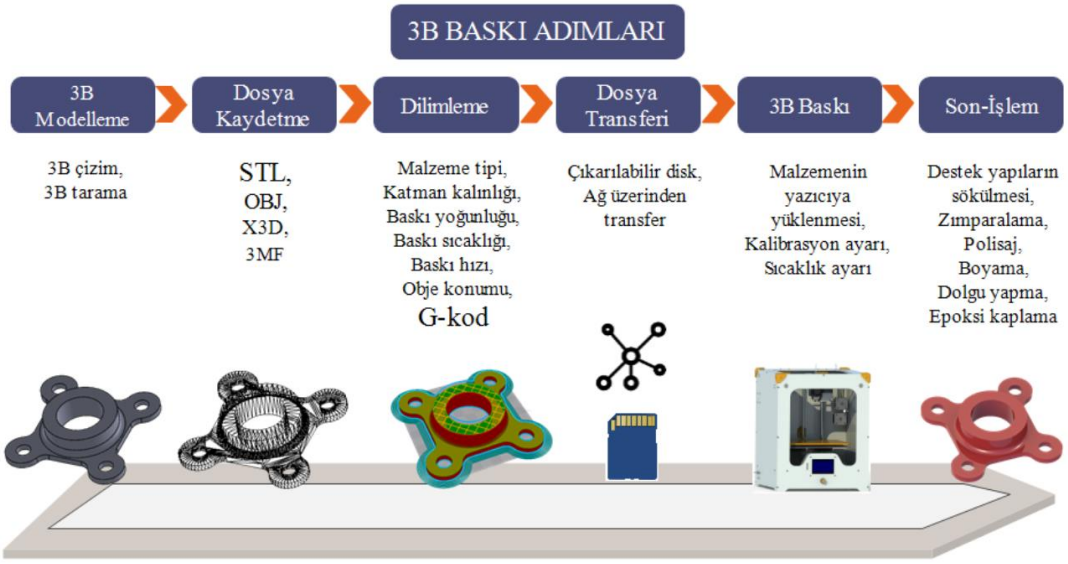


Şekil 1. 1 Titanyum alaşımlı turbo şarj motoru.

Eklemeli imalatta amaç ortaya çıkan ürünün son halini tek seferde üretmektir yüksek maliyetli bir üretim yöntemi olması sebebiyle beklenti daha da artmaktadır. Eklemeli imalat ile üretilmiş alaşımların yüksek oranda kullanıldığı yerler otomotiv ve havacılıktır. Bu kullanım alanlarında eklemeli imalat ile üretilmiş parça tasarımlarında delikler ve kılavuzlar sıklıkla yer almaktadırlar. Eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen parçalarda istenilen delik kalitesi tek seferde elde edilemez. Tek seferde elde edilemediği için ya eklemeli imalat sırasında ön delik oluşturulur ve sonradan son işleme uygulanır ya da hiç delik açılmaz ve sonradan yapılan bir ek işlemle delik açılır. Eklemeli imalat ile üretilen iş parçaları çok hassas uygulama alanlarında kullanılabilir. Bu parçalardan çok yüksek kalite, yüzey pürüzsüzlüğü, konum toleransları, ölçüm doğrulukları ve malzeme mütünlüğü beklenir. Eklemeli imalat ile üretilen parçalara ek işlemler yapılarak bu özellikler iyileştirilir. Eklemeli imalat sürecinde bazı parametreler ile değişiklikler yapılarak istenen özellikler iyileştirilebilir fakat parametrelerde yapılan değişiklikler nihai istenen sonucu vermeyebilir. Parametre iyileştirmeleri daha sonra yapılacak olan ek talaşlı imalat veya farklı işlemlerdeki süreleri ve işçiliği azaltma katkısı verebilir. Ayrıca bazı noktalara üretimden sonra müdehale edilemez parametrelerdeki değişikliklerle üretim sürecinde müdehale edilebilir.

1.2 Eklemeli İmalat

Geleneksel yöntemlerde her türlü tasarımı üretme konusundaki yetersiz kalma durumu ve hızlı bir biçimde prototip tasarımların üretilmesi konusunda geri kalmış ve maliyetli olmaları yeni ihtiyaçları doğurmuştur. Bu noktada eklemeli imalat yöntemleri ortaya çıkmış ve ihityacı karşılamıştır.[6]. Eklemeli imalat özellikle özel tasarımların yer aldığı havacılık, uzay ve tıp gibi alanlarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Eklemeli imalatta herhangi bir fikstür veya kalıp kullanılmadan metal tozlarının yüksek sıcaklıklarda ergitilmesiyle katman katman eklenerek yeni bir bütün malzeme ortaya çıkmaktadır. Öncelikle bilgisayar destekli tasarım programında (CAD) üç boyutlu tasarım belirlenir ve STL formatına dönüştürülür. Ardından çeşitli programlarla hızlı prototipleme makinelerinde üretmek için G kodları çıkartılır. Malzemenin katman katman eklenerek üretilmesine genel olarak eklemeli imalat denmektedir. Aşağıda hızlı prototipleme işlem adımları genel olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. 2 Eklemeli imalat genel akış şeması.

Tornalama, frezeleme ve delik delme işlemleri gibi geleneksel imalat yöntemleri oldukça yaygın kullanılmaktadır fakat bu yöntemler çeşitli avantajlara sahipken bazı dezavantajlara da sahiptirler. Üretim endüstrisi yatırımcıları daima maliyeti, enerjiyi düşürmek ve çıktıyı artırmayı hedeflemiştir [5]. Bu özellikler ve bazı karmaşık parçaların üretimindeki zorluklar geleneksel yöntemlere göre ek yeni üretim teknikleri arayışını

doğurmuştur. Geleneksel yöntemlerin avantajları olarak;

- Düşük maliyet,
- Seri imalata uygunluk,
- Eklemeli imalat makinelerine göre nispeten daha ucuz üretim makineleri (torna, freze, matkap vb.)
- Yaygın tecrübe birikimi

Genel olarak avantajları olarak kabul edilebilir.

Dezavantajları olarak;

- Yüksek hurda oranı,
- Kalıp fikstür maliyetleri,
- Karmaşık yapıdaki tasarımların üretimindeki zorluk,
- Prototip üretimi için yüksek iş gücü zamanı ve maliyetler,
- Kesici takım maliyetleri,
- Yüksek tecrübe gereksinimi,

Dezavantajlar olarak kabul edilebilir.

Geleneksel yöntemler malzemeden talaş kaldırarak istenen tasarımı elde etmeyi amaçlarken eklemeli imalat yöntemleri malzemeleri çeşitli formlarda kullanarak baştan bir bütün malzeme elde etmeyi amaçlamaktadır. Geleneksel yöntemlerde gelişmiş üretim sistemlerinde CNC (Computer Numerical Control) makineleri kullanılmaktadır. Bu makinelerde üretimi istenen tasarımın öncelikle çeşitli CAD (Computer Aided Design) programları kullanılarak üç boyutlu tasarımı yapılır ve çeşitli bilgisayar programlarıyla CAM (Computer Aided Manufacturing) için G kodları çıkartılır. Yarı mamül CNC tezgahlara çeşitli fikstürler aracılığıyla monte edilir ve kesici takımlarla üretim gerçekleştirilir. Eklemeli imalat makinelerinde ise herhangi bir kalıp veya fikstür kullanmadan metal tozları vasıtasıyla malzeme üretilir. Çeşitli eklemeli imalat yöntemlerinin birbirine göre avantajları dezavantajları olmakla beraber temel olarak hepsi metal veya diğer malzemelerin eriyik halinde katman katman eklenerek istenilen tasarımın elde edilmesine dayanır. EBM yöntemi belirli özelliklerdeki metal tozlarını

kullanarak karmaşık geometrideki tasarımların üretilebildiği gelişmiş yenilikçi bir imalat teknolojsidir. Metal tozları elektron bombardımanı yardımıyla ergitilerek bir bütün haline getirilir. Eklemeli imalat yöntemlerinde herhangi bir bağlama kalıbı ve kesici takım kullanılmamaktadır. Eklemeli imalat yöntemlerinin avantajları olarak;

- Herhangi bir bağlama kalıbı kullanılmaz,
- Çok karmaşık yapıdaki geometriler rahatlıkla üretilebilir,
- Prototip üretiminde zamandan ve maliyetlerden tasarruf sağlar,
- Tıp alanında kişiye özel parçaların üretilmesinde üstünlük sağlar,
- Farklı metal tozlarının kullanılmasıyla farklı malzemelerde üretim imkânı sağlar,

Eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılacak bir komponenti tek seferde üretmek mümkündür. Geleneksel yöntemlerde ise iş parçaları ayrı ayrı üretilir ve daha sonra çeşitli montaj yöntemleriyle birleştirilirler. Yedek parça stoklamak da eklemeli imalat teknolojilerinde gereksizdir. Talep üzerine üretim yapılabilir. Eklemeli imalat ile üretilen parçalar tamamen kusursuz değildirler. Üretilen parçaların kullanılacağı yere göre güvenilirliğini analiz etmek ve buna göre işlemler yapmak gerekmektedir. Bu yüzden eklemeli imalat ile üretilen parçaların analizleri yapılmalı ve istenilen seviyeye gelmesi için gerekli parametre değerlerinin ayarlanması için aksiyon alınmalıdır. Eklemeli imalat teknolojileri, kullanılan malzemelere ve malzemelerin ergitilerek birbirine bağlanma yöntemlerine göre sınıflandırılır. Metaller özelinde metallerin eklemeli imalatında bir metal toz stok haznesi, ergitmede kullanılan tel lazer ışını veya elektron ergitmesi yöntemi kullanılabilir. Bu yöntemler ile metal tozları ergitilir ve katman katman tasarıma göre ergitilerek istenen parça ortaya çıkar. Metal eklemeli imalat teknolojilerinde en çok kullanılan yöntemler Lazer Işını Ergitme (Laser Beam Melting-LBM), Elektron Işını Ergitme (Electron Beam Melting-EBM) ve Lazer Metal Biriktirme (Laser Metal Deposition-LMD) en popüler yöntemlerdir. LBM işlemi aynı zamanda Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting-SLM), Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (Direct Metal Laser Sintering), Lazer Metal Füzyonu (Laser Metal Fusion-LMF) proseslerinide içerir. Eklemeli imalat yöntemlerine ait şema Şekil 1.2 de gösterilmiştir [6]. Her bir eklemeli imalat yönteminin kendine has avantajları ve dezavantajları vardır. Aşağıda eklemeli

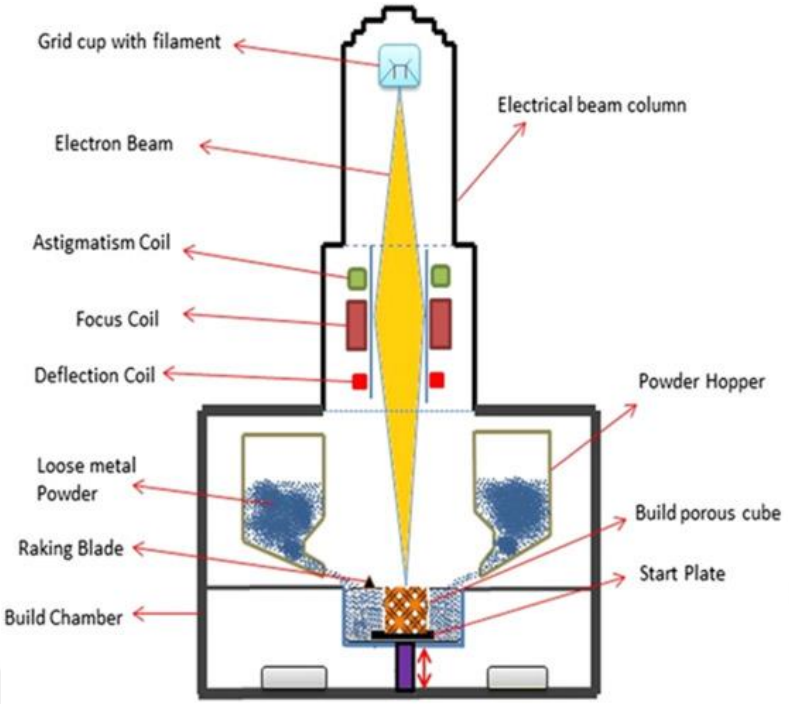
imalat yöntemleri özet tablosu yer almaktadır [7].

Tablo 1. 1 Eklemeli imalat yöntemleri şematik gösterimi.

	TİP	KATEGORİ	YÖNTEM	TEKNOLOJİ	MALZEME	GÜÇ KAYNAĞI	ÖZELLİKLER
EKLEMELİ İMALAT	SIVI	Eriyik	Malzeme ekstrüzyonu	FDM	Termoplastik	Termal Enerji	-Düşük yazıcı maliyeti -Çoklu malzeme ile baskı -Yüksek mukavemet -Düşük parça çözünürlüğü -Zayıf yüzey iş-sonu -Düşük baskı hızı
		Polimerize edilebilir	Fotopolimerizasyon	SL (SLA)	Fotopolimer, Seramik	UV ışını	-Yüksek baskı hızı -Yüksek parça çözünürlüğü -Yüksek detay -Malzeme maliyeti yüksek
				DLP		Projeksiyon	-Yüksek baskı hızı -Çözünürlük projeksiyonun piksel boyutuyla sınırlıdır
			Malzeme püskürtme	PJ	Fotopolimer, Wax	UV Işını	-Çoklu malzeme ile baskı -Yüksek doğruluk -Yüksek detay
	KATI	Yapışık objeler	Sac laminasyon	LOM	Kâğıt Plastik film, Metalik sac, Seramik bant	Lazer Işını	-Yazıcı, malzeme, proses maliyeti düşük -Büyük boyutlu malzeme basabilme -Dikey yönde zayıf mukavemet
	TOZ	Eritme	Toz yataklı eritme	SLS	Poliamid, Polimer	Yüksek- Güçlü Lazer ışını	-Yüksek doğruluk -Yüksek detay -Tam dolu parça üretimi -Yüksek mukavemet -Destek yapıları gerekmez
				DMSL	Metal tozu, Seramik tozu		
				SLM			
				EBM		Elektron ışını	
			Direk enerji depolama	LENS	Erimiş metal tozu	Lazer Işını	-Hasarlı ve aşınmış parçaları tamir edebilme -Son işlem gerekir
				EBAM			
		Yapıştırma	Yapıştırıcı püskürtme	BJ	Seramik tozu, Metal tozu, Kum	Termal Enerji	-Renkli obje baskısı -Destek yapıları gerekmez -Geniş malzeme seçeneği -Yüksek baskı hızı

1.2.1. Elektron Ergitme Yöntemi

Günümüz ihtiyaçlarıyla beraber son dönemde karmaşık geometrilere sahip çeşitli fonksiyonel özelliklere sahip parçaların üretimi için özellikle Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melitng: SLM) ve Elektron Ergitme Yöntemiyle eklemeli imalat (Electron Beam Melting: EBM) tıp, savunma sanayi, uzay ve havacılık gibi oldukça önemli sektörlerde kullanılmaya başlanmıştır [8]. Havacılık sektöründe kompozit malzeme kullanımı artmıştır fakat Titanyum malzemesi hava araçlarında hala çok yaygın şekilde kullanılmaktadır. Talaşlı imalatta çok fazla malzeme israfı olmaktadır. Elektron ergitme yöntemi gibi eklemeli imalat yöntemlerinde hurda ve atık oranının düşük olması bu tür yöntemleri çevreci imalat yöntemi sınıfına koymaktadır [9]. İşçilik ve diğer malzeme giderlerini azaltacağı için araştırmalar son süratle devam etmekte ve geliştirme çalışmaları uygulanmaktadır [10].Elektron ergitme yöntemi gibi eklemeli imalat yöntemleri ilk ortaya çıktıklarında daha çok prototip gelştirme çalışmalarında kullanılmışlarda daha sonra çalışmalar ve geliştirmeler sonucu bu yöntemler son kullanıcıya ürün üretmeye başlamışlardır. Tıp ve havacılık sektörü bu ürünlere yüksek ihtiyaç duymaktadır [5]. Metal eklemeli imalat yöntemlerinde çeşiti metal alaşımları kullanılarak kesme takımları, kalıplar, implantlar gibi makine elemanları üretilmektedir eklemeli imalat teknolojileri sektörde önemli yere sahiptir [11]. Elektron ergitme yöntemi kullanan sistemler ilk olarak Ralf ve Ovelarson tarafından patenti alınan cihazlarda kullanılmıştır. Patenti alınan sistemde metal tozları elektron ışınları vasıtasıyla kaynatılmıştır. Ticari olarak ilk ürünleri ise Chalmers üniversitesi ile Arcam firması tarafından ilk cihazlar geliştirildi. Cihaz 4.8 kW güce sahip elektron ışını tabancasına sahipti ve elektron ışını üretimi ile metal tolzarı eritilmekteydi [12], [13]. Diğer eklemeli imalat yöntemlerindeki gibi modern cihazlarda özel bilgisayar pogramları kullanarak üç boyutlu tasarım iki boyutlu düzleme aktarılmaktadır ve STL oluşturulmaktadır. Üretilmesi istenen tasarım öncelikle üç boyutlu tasarım programlarında tasarlanır veya çeşitli üç boyutlu tarama yöntemleriyle elde edilir. Daha sonra bu tasarım STL dosyasını elde etmek için özel bilgisayar programlarına aktarılır bu programların içinde çeşitli düzenlemeler yapılır örneğin, üretim hızı, ışın demeti oranı, parçanın konumu gibi özellikler belirlenebilir daha sonra STL veri olarak eklemeli imalat cihazına aktarılır. Şekil 1.1 de elektron ergitme yöntemi şematik olarak gösterilmiştir [14].



Şekil 1. 3 EBM yöntemi şematik gösterimi.

Şekil 1.1.'de görüldüğü üzere elektron demet tabancası en üst noktada bulunmaktadır katot, anot ve elektro manyetik odaklanma ünitelerinden oluşmaktadır. Sistem elektron ışını göndermeyle çalışmaya başlar. Elektronlar anot ve katot arasında hızlandırılarak enerji üretilir ve metal tozlar ergitilir. Bu sistem bir vakum sisteminin içindedir dolayısıyla temiz bir ortam oluşmaktadır. Elektron tabancasından saçılan elektronlar manyetik alanın etkisiyle katmanların oluşturulduğu altlığa göre hızlanır. İlk katmanın oluşturulmasıyla imalat süreci başlar ilk katman diğer katmanlara göre nispeten daha ince olmaktadır. Belirlenen tasarıma göre ve yoğunluğa göre sırasıyla ikinci katman atılır. Metal tozları katman katman eklenirken her katman arasında tozların daha iyi sinterlenmesi için ön ısıtma işlemi yapılır. Bu işlemler istenen tasarım parçası elde edilene kadar devam eder. Destek parçası görevi gören katmanlar ise imalat sonunda istenen parçadan kolaylıkla ayrılabilir [12], [15], [16].

Üretim detayları üretilecek tasarımın istenen özelliklerine göre üretime başlamadan önce belirlenmektedir. Üretim parametrelerini belirlemeden önce dikkat edilecek hususlarda parçanın yüzey kalitesi, kullanılacağı yer, ölçü toleransları genel olarak hesaba katılması gereken özelliklerdir. Üretim parametreleri arasında elektron ergitme gücü(P), hız(V), katman kalınlığı(t), tarama ve katman mesafesi(h) şeklindedir. Bu değişkenler üretilen parçanın mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir [17].

Elektron ergitme yöntemiyle eklemeli imalat yöntemi diğer eklemeli imalat yöntemleri gibi avantajlara sahipkn bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesi çok zor olan yüksek iş gücü ve zaman gerektiren tasarımları tek seferde üretmesi en büyük avantajıdır. Sunduğu tasarım serbestliği veya özgürlüğü özellikle ilk örnek oluşturma ve ürünü test etme sürecinde çok büyük avantaj getirmektedir.

- Tasarım açısından komleks parçaların üretilmesinde özgürlük sunan bir tekniktir.
- Çok fazla makine teçhizat ve iş tecrübesi gerektirmeden tasarım tek seferde üretilebilir.
- Savunma sanayi ve tıpta oldukça fazla kullanılan Titanyum malzemelerle çalışma özgürlüğü sunmuştur. Özelllikle kişiye özel implant veya koruyucu tasarımlarında çeşitli tarama yöntemleri ile birlikte tasarım direkt olarak üretilebilir ve kullanılabilir.
- Geleneksel imalat yöntemlerinde hurda oranı çok yüksektir fakat elektron ergitme veya seçici lazer ergitme yönteminde hurda yok denecek miktardadır.

Yukarıda bahsedilen avantajlara ek olarak birçok avantaj daha eklenebilir. Dezavantajlar konusunda ise aşağıdaki konulara değinilebilir.

- Eklemeli imalat yöntemlerinde çok büyük parçalar üretilemez. Büyük parçaların üretimi çok yavaş ve maliyetli olmaktadır çünkü büyük parçalar için daha büyük kapasiteye sahip eklemeli imalat makineleri gerekmektedir.
- Elektron ergitme eklemeli imalat yönteminde her malzeme kullanılamamaktadır. Genellikle Titanyum ve alaşımları ile kobalt kullanılmaktadır.
- Eklemeli imalat yöntemleri seri imalata pek uygun değillerdir. Kitle imalat yöntemi yapılması için çok yavaş ve maliyetlidirler.
- Parça tasarımında çıkıntılı kısımlarda açı 45° ve altında olduğunda destek parçaları gerekmektedir. Buda hem yüzey kalitesini hemde hurda miktarını etkiler.
- Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen parçalar genellikle doğrudan kullanılamaz ek olarak son işleme prosesine (tornalama, taşlama, frezeleme, delme) gibi işlemlere ihtiyaç duymaktadırlar.
- Kaynaklanamayan alaşımlar ve metaller elektron ergitme yöntemiyle üretilemezler.

Eklemeli imalat ile üretim sonunda yukarıdaki dezavantajlara ek olarak bazı kusurlar

ortaya çıkabilmektedir. Özellikle havacılık, savunma sanayi ve tıp alanlarında kullanılan parçalar için bazı özellikler çok önemlidir bunlar yüzey kalitesi, homojenlik, dayanım ve ölçü toleransları olarak genellenebilir. Eklemeli imalat araştırma ve geliştime çalışmalarında literatür de bu kusurları çözmek için çalışmalar yapılmaktadır fakat mevcut durumda eklemeli imalattan çıkan parçalar ikinci bir işlemden geçmektedir direkt olarak kullanılamamaktadırlar [18], [19].

Geleneksel yöntemler ile imal edilen parçalar ile eklemeli imalat yöntemleriyle imal edilen parçaların işlenilebilirlik parametreleri farklıdır. Her ne kadar malzemeler aynı olsa da üretim yöntemleri farklı olduğu için aynı özelliklere sahip değillerdir. Sertlik, burulma, eğilme, tokluk ve yorulma gibi özellikler fark gösterirler. Bu sebeplerden dolayı eklemeli imalat ile üretilmiş malzemelerin işleme parametreleri deneyler yoluyla tespit edilmelidir [20].

1.2.2. Eklemeli İmalatta ile Üretilen Malzemelerde Parametrelerin Etkileri

Eklemeli imalat ile üretilen parçaların özellikleri birçok parametreye bağlıdır. Bu parametreler, metl tozun özellikleri, kalitesi, lazer veya ışın tarama hızı, tarama yönü, iş parçasının tasarımı, destek malzeme kullanımı, katman kalınlığı ve lazer gücü gibi birçok parametre malzeme özelliklerine etki etmektedir. Örneğin yapılan bir çalışmada lazer gücünün artmasıyla çekme dayanımı artmaktadır [21]. Eklemeli imalatta üretim katman katman gerçekleşmektedir. Herbir sonraki katmana geçildiğinde altta kalan katılaşan katmanda ısı fazlalaşması oluşmaktadır. Bu durum malzemenin gevrekleşmesine ve tane büyümesi gibi negatif etkilere sebep olabilir. İstenmeyen özellikleri değiştirmek için malzemeye ek bir ısıl işlem uygulamak gerekebilir. Bazı araştırmalarda, lazer elektron ergitme, elektron ergitme ve lazer metal depolama yöntemleriyle üretilen alaşımların yorulma ve stattik özellikleri göz önünde bulundurulduğunda geleneksel yöntemler ile üretilmeleriyle kalite bakımından aynı özelliklere sahip oldukları hatta bazen daha üstün özelliklere sahip oldukları ortaya koyulmuştur [22]. Parametrelerde yapılan değişikliklerle malzeme özelliklerinin değiştirilebilmesi eklemeli imalatı avantajlı hale getiren iyi bir özelliktir. Parametre değişiklikleriyle malzemenin özellikleri özelleştirilebilir. Parametreleri kontrol ederek ve deneme yanılma yöntemleriyle istenilen

özellikte malzeme üretmek büyük avantaj sunmaktadır. Tarama hızındaki artış malzemenin sertliğini artırdığı araştırmalarda görülmüştür [23]. İş parçasının younluğu birçok özelliği etkilemektedir. Sertlik, yüzey kalitesi ve dayanım gibi özellikler malzeme yoğunluğu ile doğrudan ilişkilidir. Lazer yoğunluğu, tarama hızı ve tarama yönü gibi parametreler yoğunluğa etki etmektedir. Lazer enerjisi yoğunlaştıkça malzeme yoğunluğunda artış gözlemlenmiştir. Tarama hızı arttıkça ise tam tersi bir etki oluşmaktadır. Gözenek yoğunluğu ile malzeme yoğunluğu ters orantılıdır [23]. Üretilen parçanın kaliteli bir yüzeye sahip olması ise eklemeli imalat ile üretilen parçalardan beklenen en önemli özelliklerden birisidir. Bütün parametreler yüzey pürüzlülüğüne etki eder. Trama hızı düşük olduğunda daha iyi bir yüzey kalitesi ortaya çıkmaktadır [23].Kullanılan lazerin gücü, uygulama mesafesi ve tarama hızı gibi parametreler birçok özelliğe etki ettiği gibi malzemenin çekme dayanımına da etki etmektedir Lazer gücü sabit tutulduğunda tarama hızını artırmak çekme dayanımını ve akma dayanımını artırmıştır [23]. İş parçasının özelliklerini belirleyen parametreler aşağıdaki tabloda belirtilmiştir [24].

Tablo 1. 2 Eklemeli imalat ile üretilen malzeme özelliklerini belirleyen parametreler.

Eklemeli imalat makinesi	**Malzeme**
Lazer gücü	Yüzey alanı
Lazer hızı	Hacim
Tarama mesafesi	Tasarım
Katman kalınlığı	Katman sayısı
Tabla ısısı	Metal tozu kalitesi
Tarama yönü	Metal tozu boyutu
Lazer çapı	Kafes yapı tipi
Enerji yoğunluğu	Isı iletim katsayısı
Maksimum ve minimum sıcaklıklar	Tozun akışkanlığı
Soğutma yöntemi	Genleşme katsayısı ve büzülme katsayısı

1.2.3. Eklemeli İmalat ile Üretilen Titanyum Alaşımı Özellikleri

Eklemeli imalat teknolojileri arasında EBM teknolojisi diğer teknolojilerden bazı özellikler ile ayrılmaktadır [25], [26], [27]. İşlem öncesinde ön ısıtma yapılmaktadır. Ön ısıtma sayesinde gerilmeler en aza indirilir. Makinedeki yüksek tarama hızı ise yüksek soğutma hızları gerektirir. Döküm ile üretilen malzemelere kıyas ile daha küçük mikro yapı elde edilir. Elektron ışınına etki etmemesi için makine içinde vakum değerinin 10 pascal olması gerekmektedir. Bundan dolayı EBM diğer yöntemlere göre Ti6Al4V alaşımı için en uygun eklemeli imalat teknolojisidir [28]. Alaşımın mekanik özellikleri (statik çekme dayanımı, kırılma, yorulma, mukavemet ve sertlik) birçok çalışmada farklı geometrik şekillerde test edilmiştir [22], [28], [29], [30]. Diğer tüm eklemeli imalat süreçlerinde olduğu için ortaya çıkan malzemenin özelliklerini genellikle kullanılan metal toz parametreleri ve makinenin parametreleri belirlemektedir. EBM ile üretilmiş titanyum alaşımının özelliklerini inceleyen çalışmalar sınırlıdır fakat artmaya devam etmektedir. EBM makinelerinde elektron tabancası tarafından elektron ışını üretilmektedir. Elektron ışını manyetik lensler tarafından üretilerek hızlandırma voltajı ilerek hızlandırılır voltaj yaklaşık 60 kW'tır. Yüzeyde tamamen erimemiş tozlardan kaynaklı yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için elektron ışını akımı ve enerjisi düşürülebilir. Fakat talaşlı imalat son işlemler genellikle gereklidir. Soğutma gücünün farklılıklarından dolayı EBM ile üretilen titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri SLM ile üretilen alaşımlardan farklıdır. EBM ile üretilen Ti6Al4V alaşımının mikro yapısı α plakalarından ve az miktarda β tanelerden oluşmaktadır [31]. Yapılan çalışmalardan birinde EBM ile üretilen Ti6Al4V alaşımının çekme özellikleri farklı koşullar altında incelenmiştir [32]. Yapılan çalışmanın detayları aşağıdaki tabloda yer almaktadır. Çalışma sonuçları ASTM F2924-14 standartlarına göre düzenlenmiştir [33]. Standartlara göre akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve gerilme kırılması sırasıyla 825MPa, 895 MPa ve 10% olarak belirlenmiştir [33]. Alaşımın gerilimi dikey veya yatay üretim yöntemine göre farklılık göstermektedir bunun sebebi alaşımın anizotropi davranışıdır. Dik olarak üretilen malzemeler yatay olarak üretilenlere göre istenilen özellikler açısından daha verimsiz olur. Sütunlu tane yönüne dik olarak test edilen numuneler, sütunlu tanelere paralel yönlerde test edilenlere kıyasla çok daha kolay başarısız olur. Çünkü β tanelerinin kısa ekseni çekme yüklerine maruz kalır ve α tane sınırı komşu β tanelerinin ayrılmasına neden olur. Öte yandan, boyuna numunelere çekme

yükleri uygulandığında, sütunlu β taneleri ve tüm tane sınırı α yüklenir [33], [34], [35]. Tablo1.3 de EBM ile üretilen Ti6Al4V alaşımının gerilme özellikleri verilmiştir [36], [32], [31], [37].

Tablo 1. 3 EBM ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımının gerilme özellikleri.

İşlem	**Numune yönü**	**UTS [MPa]**	**YS [MPa]**	**EL [%]**
Ek işlem yok (talaşlı imalat)	-	960 ± 2	850 ± 6	6.8 ± 0.5
Ek işlem yok	Uzunlamasına	851 ± 19	812 ± 12	3.6 ± 0.9
Ek işlem yok	Yatay	833 ± 22	783 ± 15	2.7 ± 0.4
Ek işlem var, iç bölge	Uzunlamasına	1032.9 ± 12.9	984.1 ± 8.5	9.0 ± 2.9
Ek işlem var dış bölge	Uzunlamasına	1008.6 ± 15.2	961 ± 7.1	7.1 ± 3.4
Ek işlem var, iç bölge	Yatay	1029.7 ± 7	982.9 ± 5.7	12.2 ± 0.8
Ek işlem var dış bölge	Yatay	1017.4 ± 4.9	966.5 ± 5.3	12.2 ± 2.0
Ek işlem var	Uzunlamasına	972 ± 14	845 ± 9	14.2 ± 1.5
Ek işlem var	Yatay	976 ± 11	846 ± 7	15.0 ± 2.0
Ek işlem var	Uzunlamasına	1045	970	10.9
Ek işlem var	Uzunlamasına	1073–1116	1001–1051	11–15
Ek işlem var	Yatay	1032–1066	973–1006	12–15
Ek işlem var	Uzunlamasına	928 ± 9.8	869 ± 7.2	9.9 ± 1.7
Ek işlem var	Yatay	978 ± 3.2	899 ± 4.7	9.5 ± 1.2
Ek işlem yok	-	790 ± 10	740 ± 10	2.2 ± 0.3
Tavlandı	-	837–918	741–842	3–9
Ek işlem var	-	817–918	723–817	3–9
Gerilmeler hafifletildi	-	885–1015	778–943	3–9

1.3 Geleneksel Yöntemler (Talaşlı İmalat)

Geleneksel yöntemler arasında bulunan talaşlı imalat yöntemlerinde eklemeli imalatın aksine malzemeyi ekleyerek ana tasarımı oluşturmak yerine yarı mamül halindeki malzemeden talaş kaldırarak istenen tasarımın ortaya çıkarılması amaçlanır. Talaşlı imalatta eklemeli imalat gibi birçok yöntemi içinde barındırır genel olarak ana amaç yarı mamül üzerinden talaş kaldırarak istenen tasarımı elde etmektir. Talaşlı imalat proseslerin de yarı mamül üzerinden talaş kaldırma işlemi temel olarak kesici takımın kesme kuvvetinin malzeme üzerinde oluşan kuvveti yenme prensibine dayanır. Kesici takım talaşlı imalat yöntemine göre değişiklik gösterebilir. Bu yöntemler tornalama, frezeleme veya delik delme işlemi olabilir. En çok kullanılan yöntemler arasında bahsedile üç yöntem bulunmaktadır ve daha sonra geliştirilen yöntemlerden bazıları bu üç yöntemin türevleri olduğu söylenebilir. Geleneksel imalat yöntemlerini iki gruba ayıracak olursak bu gruplar talaşlı imalat ve talaşsız imalat olarak ayrılabilir. Aşağıdaki tabloda genel bir gruplandırma yapılmıştır.

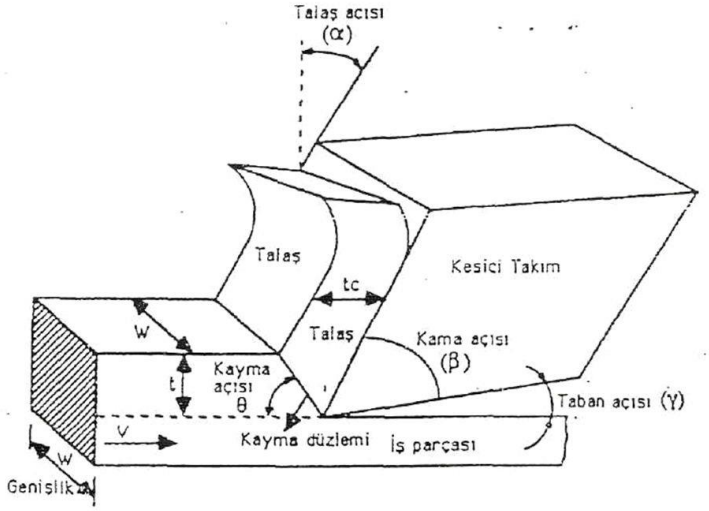


Şekil 1. 4 Talaşlı imalat yöntemleri genel bakış gösterimi.

Çalışmada konu olan mikro delme işlemi talaşlı imalat alanında yer almaktadır. Mikro delme işlemine geçmeden önce genel hatlarıyla talaşlı imalat yöntemleri ve genel prosesler ele alınacaktır.

Tornalama

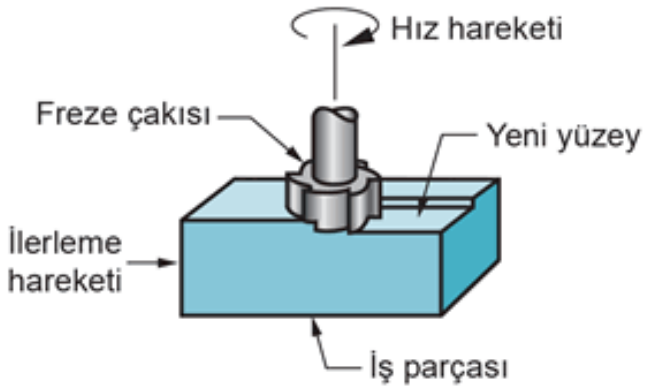
Tornalama işlemi (turning), iş parçasının dönmesi ve keskin ağızlı bir kesici takımın iş parçası üzerinde ilerleyerek talaş kaldırması olarak özetlenebilir. Kesici takım iş parçası ekseni boyunca ilerleme yapar dolayısıyla iş parçasının çapı işlenen yüzeyde küçülür. Tornalama işlemi genelleme yapılırsa üç gruba ayırılabilir. Bunlar boyuna tornalama, alın tornalama ve profil işlemedir. Tornalama işleminde de her proses gibi önemli bazı parametler vardır. Devir (N), kesme hızı (Vc) ve ilerleme miktarı (Fn) olmak üzere bu üç parametre tornalama işlemi için önemli parametrelerdir. Devir, iş parçasının bbelirli bir hızda dönmesidir birimi dev/dak' dır. Kesme hızı ise kesici takımın iş parçası boyunca hareket hızıdır. Kesilen iş parçasının çevresinin kesme kenarından geçtiğikesme hızıdır birimi m/dak' dır. İlerleme ise dönen iş parçasına göre takımın hareketidir. Birimi mm/dev olarak hesaplanır. En önemli parametrelerden birisi ilerleme oranıdır. Çünkü bu değer işlenen yüzeyin kalitesini, talaş oluşumunu ve ortaya çıkan talaşın takıma etkilerini belirleyen ana değerdir.



Şekil 1. 5 Tornalama işlemi genel gösterimi.

Frezeleme

Frezeleme işlemi (milling), belirli bir devir ile kendi ekseninde dönen çok ağızlı veya tek ağızlı kesici takımın sabit bir halde duran iş parçası üzerinde ilerleyerek talaş kaldırma işlemidir. Bazı işlemlerde kesici takım sabitken parça hareketli olabilir. Frezeleme işlemi takımın ucunda veya çevresinde bulunan kesici uçlar sayesinde kesme işlemi yapar. Frezeleme işleminde çok ağızlı takım dairesel kesme hareketi yaparken iş parçası da ilerleme hareketini yapar. Frezeleme işleminde takım çeşidi çok fazladır en çok kullanılan takımlar alın frezele ve parmak freze takımlarıdır. Alın frezelerde kesici uçlar takılır çıkarılabilir uçlardır ve kesici takıma belirli aralıklarla takılır. Parmak frezelerde ile takılır çıkarılabilir kesici uçlar bulunabilir veya direkt olarak kesici ağızlı parmak freze kullanılabilir.

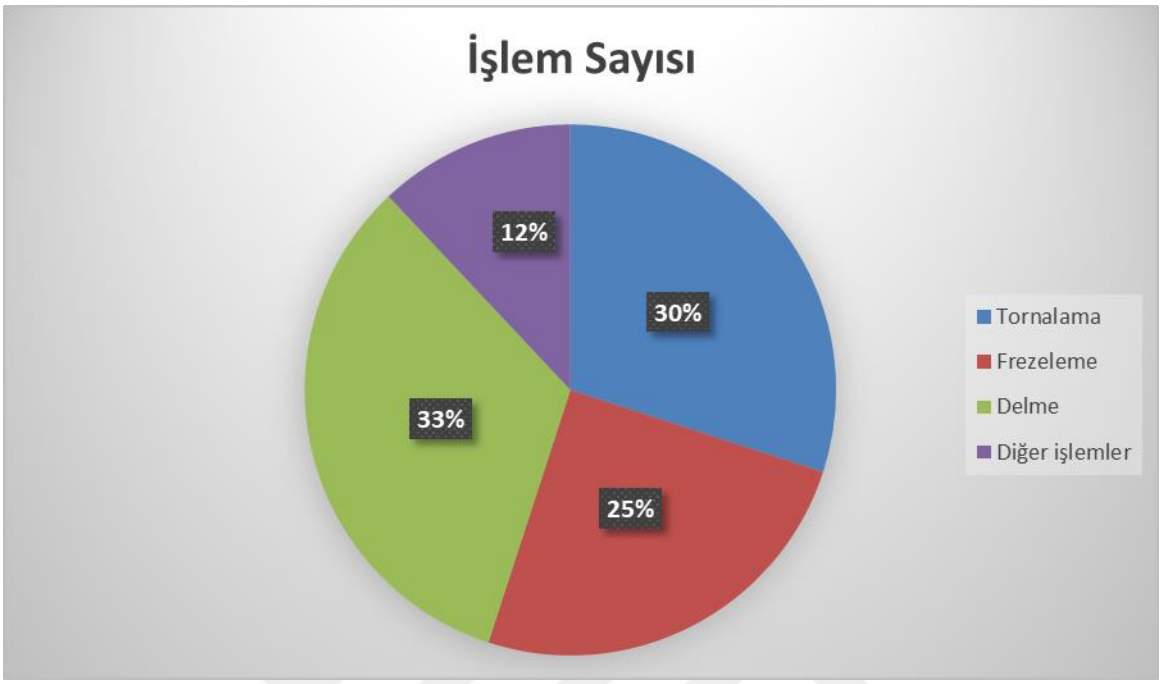


Şekil 1. 6 Frezeleme işlemi genel gösterimi.

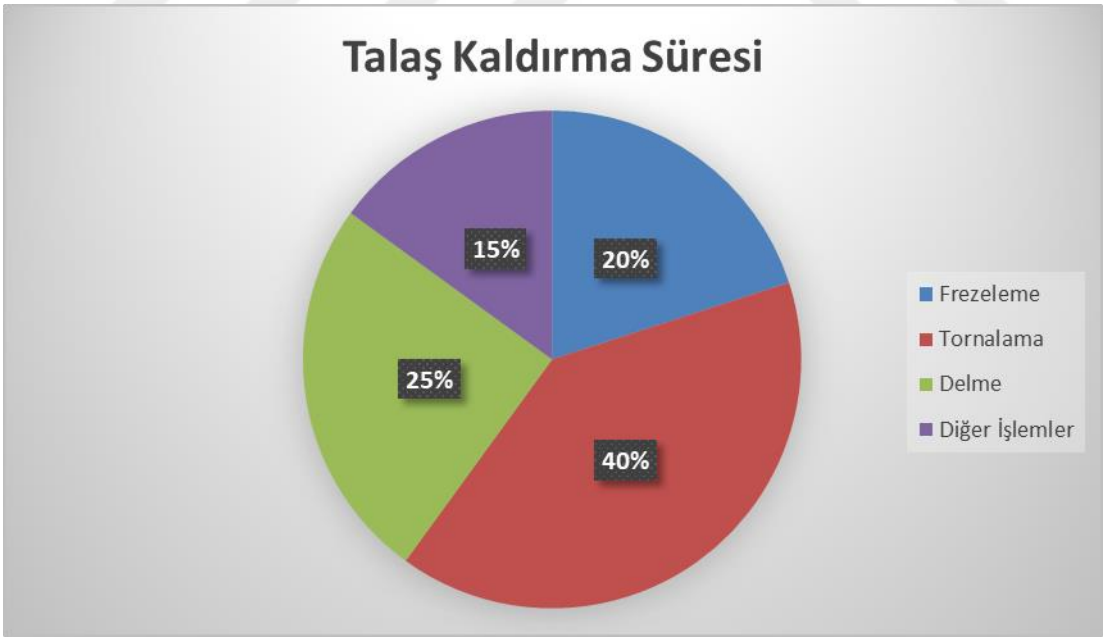
Delik Delme ve İşleme

Delik delme en önemli talaş kaldırma proseslerinden birisidir. Yapılan araştırmalara göre talaş kaldırma işlemleri içerisinde 33% yer kaplamaktadır. Talaş kaldırma işlemlerinde harcanan zamanın da 25%' si delik delme işlemlerinde geçmektedir. Delik delme prosesleri çoğunlukla hassas işler olduğu için ve delme işlemini yapan takım dayanımı tornalama ve frezelemeye göre daha düşük olduğu için yüksek hızlarda çalışmak nispeten daha zordur. Delme prosesi genellikle talaşlı imalat prosesleri yapıldıktan sonra gelir bu durum işlenen parçanın tasarımı ile alakalıdır değişkenlik gösterebilir. Matkapla talaş kaldırma, delik delme tornalama ve frezeleme işlemlerinden daha zordur. Çünkü talaş

açısı sabit değildir helis boyunca ilerledikçe değişir, sürtünmeler daha fazladır, talaşı tahliye etmek ve soğutmak daha zordur.



Şekil 1. 7 Delme işleminin diğer talaşlı imalat yöntemleriyle işlem sayısına göre kıyaslanması.



Şekil 1. 8 Delme işleminin diğer talaşlı imalat yöntemleriyle talaş kaldırma sürelerinin kıyaslanması.

Delik delme işlemi, iş parçasından talaş kaldıran bir takımın silindirik delik açа metodlarına verilen genel bir isimdir. Delik delme işlemi kısa veya derin delme işlemi olabilir. Delik delme işleminden sonra birçok proses yapılabilir. Örneğin, broşlama, honlama, vida açma, diş açma, ovalama veya raybalama gibi işlemler delik prosesinden sonra yapılır. Tüm proseslerde ortak olan, doğrusal bir ilerleme hareketi ve dönme hareketiyle talaş kaldırmaktır. Delik delme işlemi kendi içerisinde uzmanlık gerektirir. Kısa delik delme, derin delik delme ve mikro delik delme gibi uzmanlık gerektiren prosesler vardır. Kısa delik delme işlemlerinde kesici takım teknolojisinin gelişmesiyle beraber üst düzey tasarıma sahip takımlar üretilmiştir. Kısa delme işlemini yaparken bir yandan da diğer işlemi yapabilmektedir. Gelişmiş takımlar kısa delik işlemlerine ihtiyaç duymadan doğrudan yüksek kalitede vida gibi işlemleri yapabilmektedir. Delik delme işleminde talaşın boşaltılması çok önemli bir konudur özellikle derin delik delme işlemlerinde talaşı boşaltmak ve soğutma yapmak çok önemlidir.

Mikro Delik Delme

Gelişen teknoloji ile beraber karmaşık yapıda tasarımlar, çeşitli imalat yöntemleri ve prosesler gelişmiştir. Teknoloji geliştikçe daha küçük boyutta ürünlere ihtiyaç olmuş ve ortaya yeni ürünler çıkmıştır. Daha minimal ürünler ve tasarımlar için o işlemi yerine getirebilecek uygun takımlar gerektirmektedir. Ölçüleri küçük ve dayanıklı ürünler üretilmeye başlanmış ve düşük ölçülerdeki prosesler yapılmaya başlanmıştır. Mikro boyutta işlemler özellikle tıp, savunma sanayi, otomotiv sanayi, havacılık ve teknolojik aletler gibi birçok sektörde yer almaktadır. Bu sektörlerde gelişmeler oldukça makine sektöründe de paralel gelişmeler meydana gelmiştir. Örneğin daha küçük boyutta pimler, rulmanlar, civatalar ve vidalar gibi ürünler de daha küçük boyutta ortaya çıkmaya başlamıştır.

Daha küçük işlemlerde yeni problemler ortaya çıkabilmektedir. Uygun kesici takımı seçmek, uygun imalat yöntemini seçmek, parametreleri ve malzemeyi belirlemek genel olarak düşünülmesi ve hesaplanması gereken konulardandır. Uygun ürün kalitesini elde etmek için bu parametreler doğru belirlenmelidir. Özellikle ince iş yapılan proseslerde yüksek hassasiyetli makineler ve kesici takımlar kullanılmalıdır. Üretim parametreleri ve toleransları iyi belirlenmelidir. Mikro işlemler devreye girdikçe yeni problemler ortaya çıkmıştır. Kesici takımların mikro işlemlerde performansları normal işlemlere göre değişiklik gösterebilmektedir. Mikro işlemlerde kullanılan mikro boyuttaki kesici

takımlar çok hassas oldukları için bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Kolayca kırılabilme ve esneme başlıca problemlerdendir. Bu yüzden hem mikro hemde rijit kesici takımlar tasarlanmaya çalışılmaktadır. Kesici takımın kırılması hem kalite süreçlerini olumsuz etkilemektedir hem zaman ve maliyet açısından dezavantajlar oluşturmaktadır. Kesici takım kırılmsı sonucunda malzeme ve takım hurdaya çıkabilmektedir. Üretim planı mikro işleme şartlarına göre yapılmalıdır ve gerekli takım, kesme sıvısı ve makine kullanılmalıdır [38], [39].

Mikro boyutta işlemler yapılırken, yüksek hızlarda çalışabilecek ve stabiliteyi koruyabilecek seviyede kesici takımlar ve makineler gereklidir. Makineler çok düşük toleranslarda çalışma yetkinliğine sahip olmalıdır. Çeşitli takım tutucular kullanılırken bu takım tutucuların hassas çalışmaya uygun olması gerekmektedir. Mikro işlemlerde diğer işlemlerde nispeten daha kolay olan ölçüm teknikleri daha zor durumdadır. Ölçüm için hassas ve mikro boyuta kadar inebilecek kapasite de ölçüm aletleri gerekmektedir [38].

Mikro proseslerde kullanılan takımların çapları çok küçük olduğu için diğer kesici takımlara göre daha çabuk kırılabilmektedirler veya hasarlanabilmektedirler. Takımda meydana gelen hasar doğrudan ürünün kalitesini etkilemektedir. Hem takım hasarlanması hemde kalitesiz ürün ek maliyetlere ve zaman kaybına neden olur. Kesici takım talaş kaldırma işlemini yaparken oluşan elastik deformasyon takımın hasarlanmasını, malzemede istenen ölçülerin elde edilememesini veya kalitesel pron-blemleri ortaya çıkarabilir [40]. Mikro işlemler için birçok kesici takım çeşidi vardır fakat en çok kullanılan mikro matkaplar ve frezelerdir. Mikro matkaplar mikro delikler delmek için kullanılırlar [41]. Mikro delikler çok önemli sektörlerde kullanılmaktadır. Başta tıp, savunma sanayi, otomotiv sanayi, havacılık ve uzay sanayi gibi hassasiyetin yüksek olduğu ve katma değerin yüksek olduğu sektörlerde kullanılmaktadır. Mikro boyuttaki matkaplar 10 mikron ile 1 milimetre arasındaki delikleri açabilen matkaplardır. Mikro matkapların çapları çok küçük olduğu için dayanıklıkları düşüktür kolay kırılabilirler veya kolay sehimlenebilirler. Mukavemetin zayıf olması kırılganlığı tetikler [42].

Optimum kesme koşullarında mikro matkaplar genellikle en fazla 100 delik delebilmektedirler [43].



Şekil 1. 9 Örnek mikro matkap uçları.

Konvansiyonel talaşlı imalat yöntemleriyle kıyaslandığında mikro delme işlemi daha karmaşık ve zor bir işlemdir. Kesici ucun hızlı aşınması, mukavemetinin düşük olması, çabuk ısınma ve titreşimler bu zorlu şartları oluşturur [44]. Mikro matkapların çapları çok küçüktür bu yüzden aşınmalar rahatlıkla görünemez çalışma esnasında ani kırılmalar meydana gelebilir [45]. Takım kırılması veya üzerindeki hasarlar doğrudan üretime zarar verir. Takım hasarlanmasının sonuçları kaliteye, işçilik zamanına, hurda maliyetlerine ve takım maliyetlerine sebep olur. Matkaplar delik delerken yanal kuvvetler oluşur. Bu kuvvetler matkaplarda sehime sebep olur. Bu eğilme durumu, delme çapında ölçü kaçması, delik pozisyonunda bozulma ve daha sonra kırılmalara sebep olur [46].

Kesme Parametrelerinin Belirlenmesi

Kesme parametreleri seçilirken hesaba katılması gereken bazı veriler vardır. Kesme parametreleri doğrudan malzeme kalitesini ve takım performansını etkiler. Üretim parametreleri belirlenirken çalışılacak tezgâhın kapasitesi ve hassasiyeti, işlenecek malzeme, istenen kalite ve kullanılacak kesici takım genel olarak hesaba katılması gereken unsurlardır. Titanyum ve İnkonel gibi sert malzemelerin işlenmesinde parametreler daha büyük önem kazanmaktadır. Eğer doğru parametreler seçilmezse takım kırılabilir veya yüzey kalitesi kötü olabilir. Bu ek dezavantajlar ek maliyetler getirir. Parametre seçilirken istenen yüzey kalitesi ve ölçü toleransları çok önemlidir.

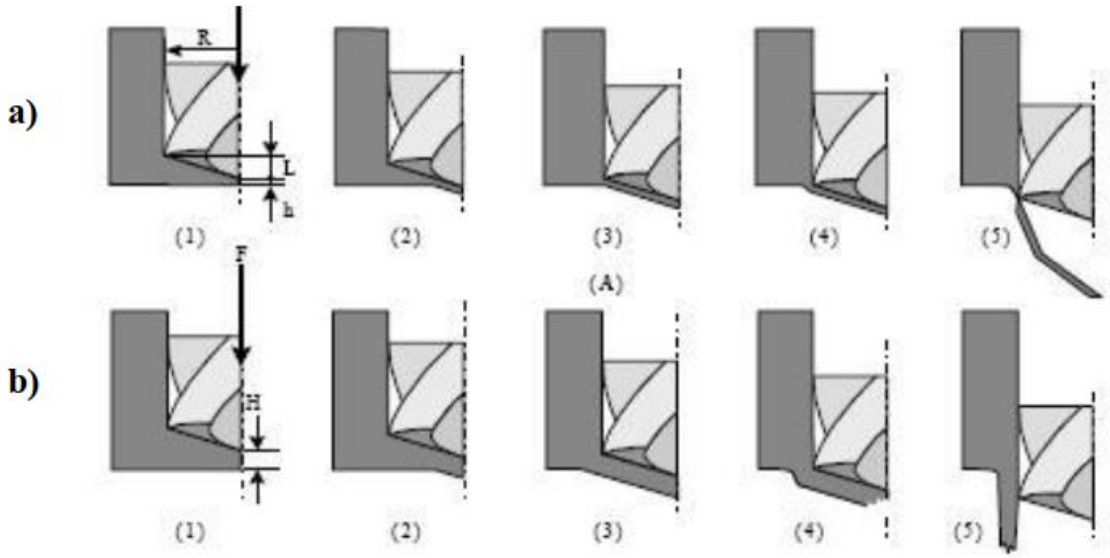
Talaşlı imalatta ve aynı zamanda delik delmede genellikle hesaplanması gereken parametreler şunlardır;

- Kesme hızı
- Devir
- Kesme derinliği
- İlerleme hızı

İlerleme hızı ve talaş derinliği doğrudan takımın performansına etki eder. Kesme kuvvetini etkileyen bu iki faktör hem yüzey kalitesine hemde takımın ömrüne etki eder. Takım aşınmasını etkileyen en önemli faktörlerden biri kesme kuvvetidir ve takım aşındıkça kesme kuvveti artmaktadır [47]. Kesme kuvvetinin etkisini azaltmak için farklı tasarımlara sabit matkaplar kullanılabilir, kesme sıvıları farklı yöntemlerle çalışma alanına gönderilebilir veya farklı delme stilleri (gagalama) gibi stiller kullanılabilir. İlerleme hızının artması yüzey pürüzlülüğünü olumsuz yönde etkilemektedir. Yüksek kesme hızlarında çok yüksek sıcaklıklar oluşabilmektedir bu ısınma takım ömrüne olumsuz etki yapmaktadır. Yüksek kesme hızları ve minimum ilerlemede en düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilir [48].

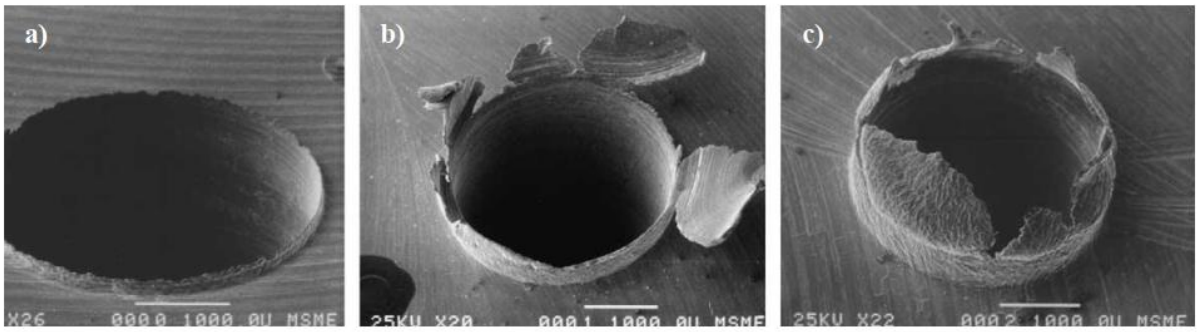
Delik Kalitesi

Delik delme prosesinde deliğin kalitesini belirleyen en önemli unsur deliğin yüzey kalitesi, çapak oluşumu ve konum toleranslarıdır. Deme işlemi sırasında matkapta gelişen bir sehim delğin konumunun bozuk olmasına sebep olabilir. Delme esnasında düzgün olmayan talaş akışı yüzey kalitesini olumsuz etkilerken matkap ömrünüde kısaltmaktadır. Meydana gelen çapaklar bazı sorunları beraberinde getirir. Montaj yapmak zorlanabilir, delikten bir akışken geçecekse bu akışkan düzgün akmayabilir ve mikro boyutta çatlaklar oluşturabilirler. Çapaklar için ek prosesler gerekebilir fakat bu ek prosesler maliyeti ve işlem zamanını artırabilirler. Çapak oluşumunu azaltmak için farklı bir tasarıma sahip takım kullanılabilir ve kesme parametreleri değiştirilebilir. Delik giriş ve çıkışlarında çapak oluşma ihtimali daha yüksektir. Matkap delme işlemini sonlandırırken delikten çıkma esnasında kesici ucun altında kalan malzeme deforme olmaya başlar ve matkap ilerledikçe deformasyon bölgesinin merkezi matkapın kenarlarına doğru yaklaşmaya başlar [49].



Şekil 1. 10 Çapak oluşum mekanizması.

Yüksek ilerlemeye bağlı olarak yüksek ilerleme kuvveti oluşur bu kuvvet süreksiz çapak oluşturur matkap çıkış yüzeyinde çapak oluşmaması neredeyse imkansızdır [50].



Şekil 1. 11 Çapak çeşitleri a) Üniform b) Süreksiz c) Tac kapak.

Düşük çapak oranı için düşük devir ve düşük ilerleme hızları idealdir öte yandan matkap uç açısı artırılırsa çapak boyutu küçülmektedir fakat 130 ° üzerindeki matkap uç açıların da çapak boyutu büyümektedir. İlerleme hızı ve devirin düşük olduğu durumlarda üniform çapak görünürken bu hızlar artırılınca tac kapak şekli çapak gözükmektedir [51]. İdeal talaşlı imalat koşullarında talaş takımdan rahatlıkla uzaklaşmalıdır dolayısıyla kesici takımda sürtünme azalacağından hem takım ömrü hemde kalite olumlu

etkilencektir. İlerleme oranının artırılması ile daha fazla talaş kaldırılabilir daha fazla talaş çıkması yüzey kalitesine olumsuz etki yapmaktadır kesme hızı artırılarak delik yüzey kalitesi artırılabilir.

Yüzey Bütünlüğü

Gelişen modern teknolojiyle beraber ürünlerden beklenen hassasiyet yüksektir ve tolerans aralıkları daha düşmüştür. Daha yüksek hassasiyet için bu hassasiyeti sağlayabilecek makineler ve kesici takımlar gereklidir. Yüzey kalitesi, delik kalitesi veya diğer yüzey formlarının kalite beklentisi kullanılacağı yere göre değişir. Delik kalitesi özelinde istenen özellikler aşağıda sıralanmıştır;

- Deliğin çapı
- Merkezlilik
- Dairesellik
- Yüzey kalitesi olarak genellenebilir.

Deliğin kalitesi genellikle matkapa, işleme tezgahına, matkapın kaplamasına, matkapın tasarımına, kesme sıvısı kullanımına, iş parçasının malzemesine ve kesme parametrelerine bağlıdır [52].

Yapılan çalışmalarda matkabın deliğe ilk girişte çıkışa göre sapma oranı daha yüksektir. Eski imalat yöntemlerinde bu sapmayı ortadan kaldırmak için delik delinecek yerin merkezine noktalama denilen küçük bir iz bırakılırdı fakat gelişen teknolojide daha rijit tezgahlarda ve daha rijit matkaplarla noktalamaya gerek kalmadan delik delinebilmektedir. Deliğin geometrik kalitesi sehim, titreşim, kesme sıvısı, talaş akışı gibi unsurlardan etkilenir. Takım yıpranması ve kırılma noktasına gelmesi deliğin geometrk kalitesini bozmaktadır [53].

Mikro Delme İşleminde Titreşim

Titanyum alaşımlarını işlemek zordur çünkü düşük elastisiteye ve kırılma eğilimine sahiptirler. TI-6Al-4V alaşımlarının delme prosesinde matkap uçları yüksek titreşime maruz kalır. Bu titreşim düşük yüzey kalitesine ve takım deformasyonuna sebep olur [54]. Birçok talaşlı imalat prosesinde olduğu gibi delik delme prosesinde de titreşim çok

önemlidir. Titreşim, yüzey kalitesini, konum toleranslarını ve takım ömrünü doğrudan etkilemektedir. Çalışmalar daha çok Titanyum ve Titanyum alaşımları üzerine yapılmıştır. Eklemeli imalat ile üretilmiş Titanyum alaşımı üzerinede çalışmalar yapılmalıdır. Çünkü eklemeli imalat şimdiden birok sektörde yerini almaya başlamıştır. Yapılan çalışmalarda titreşimin özelllikle kesici takım, işleme merkezi ve işleme parametreleriyle doğrudan ilişkili olduğu ortaya koyulmuştur. Negatif etkileri minimuma indirmek için doğru kesme parametrelerinin araştırılması ve iyi belirlenmesi gerekmektedir. Birçok çalışmada kesme parametreleri, kesme sıvısı kullanımı, kesici takım özellikleri ve işleme merkezi özellikleri gibi etkiler çalışılmıştır. Titreşim yüzey kalitesini etkilerken özellikle üretkenliği de etkilemektedir [55]. Hesaplanmayan hurda maliyetleri ortaya çıkabilmektedir. Yapılan bir çalışmada titreşimi anlık kontrol etmek ve uygun parametreyi bulmak için piezoelektrik sistemi ile çalışan bir titreşim kontrol sistemi geliştirilmiştir titreşimi minimuma indirmek amaçlanmıştır [55]. Yapılan bir diğer çalışmada ise kesme hızı, ilerleme oranı, matkapın tipi ve kesme ağzı açısı incelenmiştir bulunan sonuçlara göre süper alaşımlarde delme prosesinde matkapın açısının, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametre olduğu ortaya koyulmuştur [56]. Metal kesme işleminde titreşim, takım ömrünü, yüzey pürüzlülüğünü, üretkenliği ve üretim maliyetlerini etkileyen en önemli faktörlerden birisidir [54]. Bu yüzden titreşimi minimize etmek gerekmektedir. Freyer tarafından yapılan çalışmada vibrasyonun ölçümünün zor olduğu belirtilmiştir. Çünkü vibrasyon ölçümü için yeterli alan olmayabilir özellikle mikro delmede daha küçük boyutlarla çalışılır [57]. Daha az yer kaplaması sayesinde Doppler lazerli titreşim ölçme(LDV) cihazı dönen şaft üzerinden titreşim ölçmek için kullanılabileceği Rothberg veJohn Bell tarafından önerilmiştir [58]. Yapılan çalışmada vibrasyon, dönen şaft hızı üzerinden lazer yöntemiyle ölçülmüştür [58]. Başka bir çalışmada ise titreşimi ölçmek için LDV (Laser Doppler Velocimetry) yöntemi kullanılmıştır. LDV sistemi lazer bombardımanı göndererek dikdörtgen alanı tarar. Yapılan çalışmada bir frezeleme prosesinde kesici takımın titreşimi ölçülmüştür ve diğer çalışmada dönen iş parçasının titreşimi ölçülmüştür [59], [60]. Şekil 1.10'da işleme esnasında frezenin takım tutucusundan lazer ile alınan titreşim verisi gösterilmektedir [54].

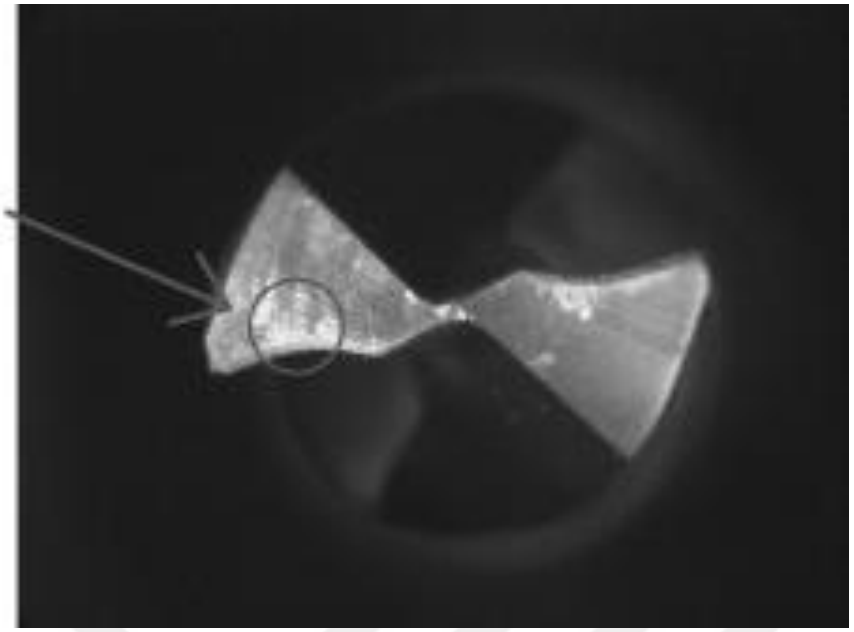


Şekil 1. 12 Frezeleme prosesinde lazer ile titreşim ölçme düzeneği.

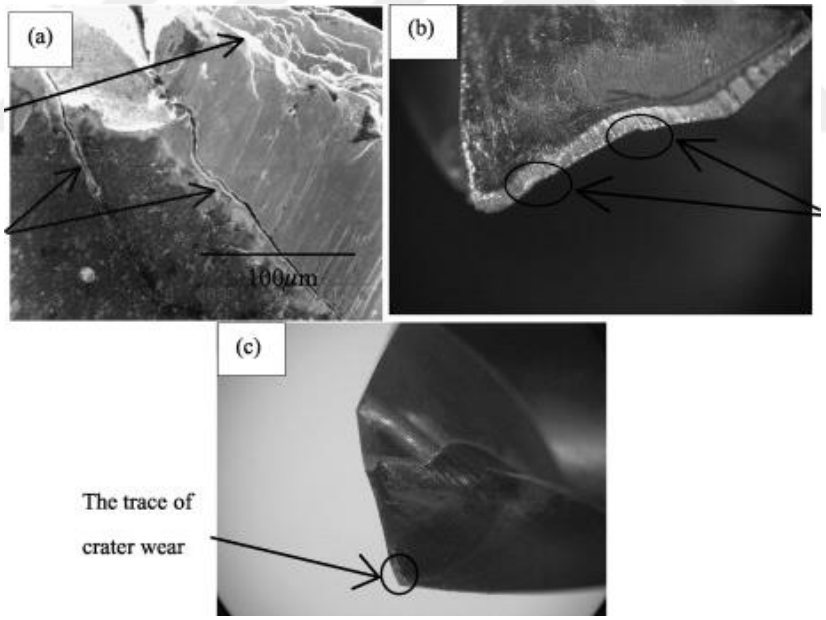
Delme işlemi sırasında, talaş kaldırma bölgesini görmek ve talaş formasyonunu görmek mümkün değildir. Ayrıca matkapın kesme ağzında oluşan titreşimi ölçmek çok zordur. Anova yöntemiyle titreşimin ölçüldüğü çalışmada, matkapın helis açıları azaldıkça titreşimin azaldığı görülmektedir [54]. Aynı çalışmada daireselliğin titreşimi doğrudan etkilediği ve ilerleme oranının titreşimde etkisinin düşük olduğu ortaya konulmuştur [54]. Titreşimden kaynaklanan takım aşınması deliğin yüzey pürüzlülüğünü negatif etkilemektedir. Matkapın helis açılarının artmasıyla ve tutucunun hızının artmasıyla titreşim artmaktadır fakat ilerleme oranının çok büyük bir etkisi yoktur [54].

Takım Aşınması

Talaşlı imalatta Titanyum alaşımları sert malzemeler sınıfına girer ve kesme işlemleri kolay olmayan malzemelerdendir. Aşınmalar kimyasal ve fiziksel yollarla olabilir. Titanyum alaşımlarının işlenmesi sırasında kesici takımda aşınmalar meydana gelebilir. Krater oluşumu, çatlaklar, yapışmalar ve en sonunda takımın kırılması genel hasar tipleridir[61]. Inconel 718 süper alaşımının delme prosesinde matkapta meydana gelen aşınmalar Şekil 1.8 de gösterilmiştir. Delme esnasında genellikle ilk olarak yığma kenar (BUE (Build up edge) adlı takım üzerinde negatif etki gösteren etki çıkmaktadır. Daha sonra mikro kırılmalar ortaya çıkmaktadır [62].



Şekil 1. 13 Kaplamalı yüzeyde aşınma gösterimi.



Şekil 1. 14 Çeşitli aşınma gösterimleri a) Kesme kenarına paralel alt yüzey kırılımları; b) kesme kenarında kırıklıklar; c) krater aşınmaları.

Mikro matkaplar çok küçük ölçülere sahiptirler bu yüzden aşınmaları tespit etmek önceden görmek ve müdehale etmek çok zordur. Mikro matkaplar diğer matkaplara göre daha hassas oldukları için ayrıca kırılmaları daha kolaydır. Matkapın ömrünü uzatmak

için titreşimler azaltılmalıdır bundan dolayı imalat tezgahının rijitliği ve takım tutucunun rijitliği çok önemlidir [63]. Titanyum alaşımlarının termal iletkenlikleri düşüktür. Yüksek kesme hızlarında yüksek sıcaklıklar oluşur. Yüksek sıcaklıktaki talaşlar kesici takıma kolayca yapışırlar ve bu durum takım ömrünü olumsuz etkiler [64]. Sıcaklığı düşürmek için soğutma sıvıları kullanılabilir.

Talaşlı İmalatta Kullanılan Kesme Sıvıları

Talaşlı imalatta farklı amaçlarla kesme sıvıları kullanılmaktadır. Genellikle amaç, soğutma sağlamak ve talaş kaldırma işlemini kolaylaştırmaktır. Yeni teknolojilerle beraber yeni nesil kesme sıvıları veya gazları ortaya çıkmıştır. Özellikle yeni nesil çevreci kesme sıvıları gün geçtikçe popülerleşmektedirler. Kesme sıvılarının çeşitli pozitif etkileri vardır.

- Kesme esnasında ortaya çıkan yüksek sıcaklıkları önleyerek takım ömrünü uzatır.
- Daha rahat bir kesme sağlar kayganlaştırıcılığı artırarak aşınmayı azaltır.
- Ortaya çıkan talaşın iş parçasından ve kesici takımdan daha kolay uzaklaşmasını sağlar.
- Yüksek basınçta püskürtülen kesme sıvısı talaşın daha kolay kırılmasını sağlar.
- İş parçasının yüzey kalitesine olumlu yönde etki yapar.
- Yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan genleşmeyi önleyerek ölçü sapmalarını engeller.

Kesme sıvılarının çevreye ve insan sağlığına negatif etkileride vardır.

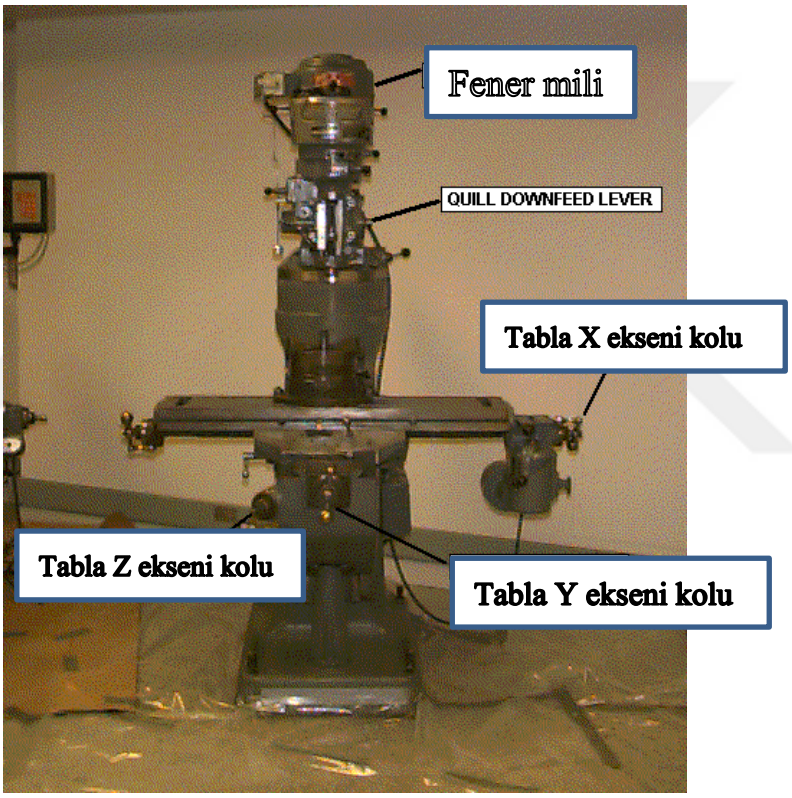
İyi bir kesme sıvısından yağlayıcı etki ve soğutucu etki beklenmektedir. Kesme sıvısı kesici uç ile iş parçası arasında ince bir film oluşturur ve kayganlığı artırır dolayısıyla sürtünme azalır, ısınma ve aşınmalar azalır. Yüksek kesme hızlarında kesme sıvısı kullanımı çok önemlidir. Yüksek kesme hızlarında, kesme sıvısı kullanımı çok önemlidir. Kullanılmadığı durumda hurdaya çıkan takım maliyetleri, kötü yüzey kalitesi, işleme süresinin hızlanamaması gibi dezavantajlar ve ek maliyetler ortaya çıkabilir [53]. Yapılan araştırmalarda Titanyum alaşımlarının delme prosesinde ıslak kesme sıvılarının kesme kuvvetlerini artırdığı ortaya koyulmuştur [65]. Titanyum alaşımlarının ısıl iletkenliği düşüktür bu yüzden kesme esnasında yüksek sıcaklıklar oluşur. Yüksek sıcaklıktan dolayı malzeme de akma mukavemeti düşer ve talaş oluşumu kolaylaşır ve dolayısıyla kesme

kuvvetleri düşer. Soğutma sıvısı sayesinde sıcaklık düşer ve kesme kuvvetleri artar buda kesmeyi kolaylaştırır. Bu yüzden Titanyum alaşımlarını işlerken iyi ibr yağlayıcı kesme sıvısı yerine iyi bir soğutucu özelliği olan kesme sıvısı tercih edilmelidir [53]. Mikro delmede delik çapı çok küçük olduğundan ortaya çıkan talaşın kolay uzaklaşması için kesme sıvıları kullanımı önemlidir. Kesme sıvıları organik ve inorganik olabilir. Talaşlı imalatta en çok kullanılan kesme sıvısı bor yağıdır. Bor yağı hem ekonomik hemde uzun süre kullanılabilir bir kesme sıvısıdır. Çevreye ve insan sağlığına ise negatif etkileri vardır. Titanyum alaşımları özel malzemeler olduğu için kullanılacak kesme sıvıları iyi belirlenmelidir. Bor yağı gibi konvansiyonel kesme sıvıları kesici takımla malzeme arasına nüfuz etmekte zorlandığı araştırmalarda ortaya koyulmuştur. Mikro delme prosesinde bu sıvıları kullanmak dezavantajlıdır. Delik çapı çok küçük olduğu için yüksek basınçta gönderilen geleneksel kesme sıvısı talaşın delikten çıkmasını zorlaştırır. Ayrıca Bor yağı gibi geleneksel kesme sıvıları çevreye ve insan sağlığına zararlıdır. Günümüzün en önemli konularından biriside çevredir. Gelişen teknoloji ile beraber MQL (Minimum Quantity Lubrication) minimum miktarda yağlama ile adlandırılan kesme sıvısı ortaya çıkmıştır. Organik yağlar yüksek basınçta püskürtülerek kayganlık ve soğutma sağlamaktadır. Kesme sıvılarıyla beraber soğutucu etkisi olan bazı gazlar da talaşlı imalatta kullanılmaktadır. Bu kriyojenik gazlardan biride Azot gazıdır. Soğutma konusun da iyi olan bu gazlar birçok sektörde kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv, savunma sanayi ve havacılık endüstrisinde kullanılmaktadırlar. Kriyojenik soğutma yöntemi sayesinde kesme bölgesindeki sıcaklık daha kolay düşürülebilir dolayısıyla takım ömrü ve yüzey kalitesi olumlu etkilenir. Takım aşınması ve talaş yapışması gibi sebepler azalır [66]. Konvansiyonel soğutma yöntemlerinde kesme sıvısı, kesici takım ile iş parçası arasında kalan kesme bölgesine nüfuz etmekte yetersiz kalabilir. Özellikle yüksek kesme hızlarında yüksek ısılar ortaya çıkacağı için geleneksel yöntemler yetersiz kalmaktadır. Kriyojenik soğutma yöntemlerinin geleneksel yöntemlere göre yüksek kesme hızlarında daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek kesme hızlarında yüksek sıcaklıkla ortaya çıkan talaş birden soğuduğunda gevrekleşir ve talaşın kırılmasıda kolaylaşır [67].

Talaşlı İmalatta Kullanılan Kesici Takımlar ve İşleme Tezgâhları

Hayatımızdaki değişimlerle beraber kullandığımız ürünler ve ürünleri oluşturan parçaların yapıları ve tasarımlarıda değişmiştir ve değişmeye devam etmektedir. Bu

değişimler medikal, günlük kullanım, ev ürünleri, savunma sanayi, otomotiv, havacılık sanayi ve elektronik gibi başlıca sektörlerde gerçekleşmiştir. Üretim sektöründen gelen talebe göre istenilen kalitede ürünü kullanıcıya teslim edebilmek için araştırma ve geliştirme faaliyetleri yıllardır devam etmektedir. İhtiyacı karşılayabilmek adına gerekli kesici takım ve tezgahlar üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Üretim mantıkları aynı olsada işleme tezgâhları zamanla büyük değişimler geçirmiştir. Tezgahlar eskiden operatör kontrolündeyken günümüzde bilgisayar destekli işleme merkezleri ön plana çıkmaktadır. Bilgisayar destekli işleme merkezlerinde hassasiyet, rijitlik, işleme hızı ve kalite daha iyidir.



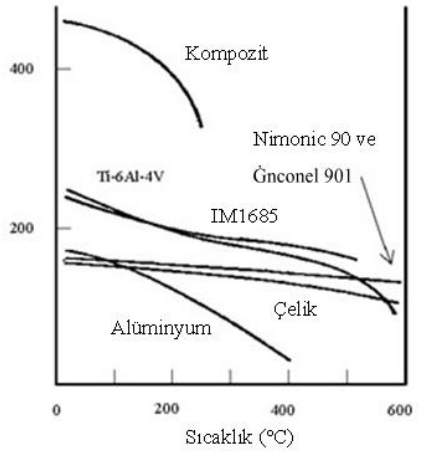
Şekil 1. 15 Geleneksel freze tezgâhı örneği.

Çok küçük ölçülerde olan mikro iş parçalarını işleyebilmek için mikro kesici takımlar ve yüksek hassasiyetli tezgahlar gerekmektedir. Mikro işleme, kaba işleme yöntemlerine göre parametrelerin iyi çalışılması ve seçilmesi gereken bir prosestir. Geleneksel tezgahlarda mikro işleme yapmak zor ve çok fazla dikkat edilmesi gereken bir süreçtir. Mikro işleme şartlarında talaş formu, deforme olmamış yüzey ve kesici takım farklı davranabilir. Mikro delikleri oluşturabilmek için farklı yöntemlerde vardır. Bu yöntemlerden bazıları lazer işleme ve elektro erezyondur fakat en hızlı yöntem matkap

ile delik delmektir. Mikro boyuttaki matkaplar genellikle kısa ömürlüdür mukavemetleri zayıftır bundan dolayı kolay kırılırlar esneme payları çok yoktur. Mikro matkaplarda ömür hesabı yapmak tutarlı olmayabilir. Mikro delme işlemlerinde malzeme içerisinde kırılan matkapı iş parçasından çıkarmak çok zordur bundan dolayı iş parçasının hurda olma ihtimali yüksektir [63]. Mikro matkapların kırılmasına sebep olan en önemli faktörlerden biride titreşimdir bu yüzden titreşimlerin sönümlendirilmesi için gerekli aksiyonları almak gerekir [41]. Çapı maksimum 1mm olan mikro matkapların mukavemetleri çok daha düşüktür ve kırılmaya meillidirler. Ömürlerini artırmak için kaplama işlemi yapılmaktadır [68]. Kaplamalar her zaman iyidir olarak genellenemez örneğin Titanyum alaşımlarını işlerken TiAlN alaşımlı kaplama iyi performans gösterirken, TiN kaplı matkaplar kötü performans gösterir çünkü TiAlN sıcak sertlik özelliğine sahiptir [69].

1.4 Titanyum ve Alaşımları

Titanyum ve alaşımları çok iyi seviyede korozyon direncine sahip olan, hafif ve çok yüksek sıcaklıklarda bile özelliklerini koruyan malzemelerdir. Ti6Al4V α+β alaşımları havacılık endüstrisinde en çok kullanılan alaşımdır [36]. Özellikleri sayesinde havacılık, biyomedikal, savunma sanayi gibi önemli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok yüksek sıcaklıklarda gösterdiği performans ve mukavemetini koruması sebebiyle Titanyum havacılık için çok önemli bir alaşımdır. Şekil 1.16 de görüldüğü üzere Ti-6Al-4V ağırlık oranı 400-550 °C çalışma sıcaklığına kadar çoğu metalik malzemeden daha yüksektir [70].



Şekil 1. 16 Farklı malzemeler ile Titanyum alaşımının farklı sıcaklıklarda karşılaştırılması.

Titanyum alaşımlarının yaygın kullanılma sebeplerinin bazıları aşağıda verilmiştir [71].

- Saf titanyum, diğer süper alaşımlardan 40% daha hafiftir.
- Titanyum ve alaşımları 400-550 °C sıcaklık aralığında dahil çalışabilirler.
- Termal genleşme katsayıları Alüminyumun yarısından daha az ve çelikten daha düşüktür.
- Titanyum alaşımları çalışma sıcaklığı 130 °C'yi aştığında Alüminyumun yerini alabilir.
- Düşük sıcaklıklarda çalışma esnasında sadece kompozit malzemenin mukavemeti daha yüksektir fakat sıcaklık arttıkça Titanyum mukavemeti öne çıkmaktadır.

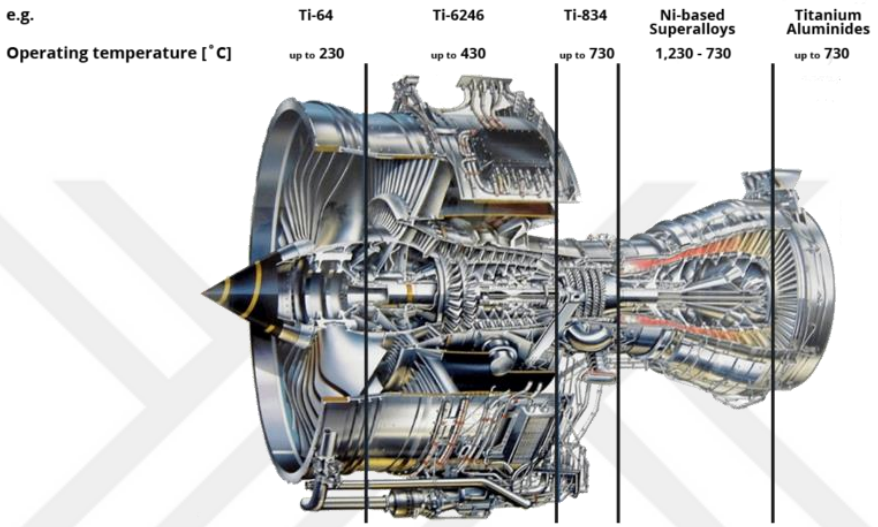
Titanyum elementine sahip malzemeler jet motorları, uçakta kullanılan parçalar, deniz araçları gibi endüstrilerde de yer almaktadırlar. Havacılık ve uzay sanayisinde Titanyum alaşımlarının tercih edilmelerinin en büyük sebebi diğer alaşımlara göre hafif olmalarıdır. Titanyum alaşımlarının mukavemeti çok yüksek sıcaklıklarda bile Alüminyum alaşımlarının mukavemetlerinden daha yüksektir.

Titanyum alaşımları medikal alanlarında da oldukça yaygın kullanılırlar. Titanyum alaşımları insan vücudu ile tepkimeye girmez ve vücudun içinde biyo uyumluluk sergilerler. Çeşitlikemik bağlantı noktalarında, diş implantlarında veya spesifik (kafa tası) gibi kapama bölgelerinde kullanılabilirler. Özelikle eklemeli imalat teknolojisininde gelişimiyle beraber kişiye özel taramalar ile kişiye özel tasarımlarda Titanyum alaşımları tasarlanabilmektedir.



Şekil 1. 17 Titanyum alaşımlarının biyomedikal uygulamaları.

Titanyum alaşımlarının insan vücudunda bulunan kemiğe yakın özellikleri vardır. Mekanik olarak benzemektedirler ve insan vücuduna uyum sağlayarak uzun yıllar boyunca orada adeta bir kemik görevi görebilirler. Dayanıklılıkları ve hafiflikleri biyomedikal alanda da avantajlar sağlar. Vücutta bulunan sert yapılar Titanyum tasarımlarıyla desteklenebilir veya değiştirilebilir. Kalça kemiklerinde, kafa tasında, dizlerde, dirseklerde, kollarda veya dişlerde kullanılabilir. Yukarıdaki şekilde örnekler gösterilmiştir.



Şekil 1. 18 Jet motorunda bulunan Titanyum alaşımı malzemeler.

2.1.1 Titanyum Alaşımları ve İşlenebilirlikleri

Titanyum alaşımları sınıflandırılırken gruplara ayrılmışlardır. Bunlardan birincisi α alaşımları, ikincisi yaklaşık α alaşımları, üçüncü grup α + β alaşımları dördüncü grup yaklaşık β ve β+ β alaşımlarıdır. Her bir grubun kendine has özellikleri vardır. Bu özellikler aşağıdaki tabloda anlatılmaktadır.

Tablo 1. 4 Alfa ve Beta özelliklerin gösterimi.

α alaşımları	Yaklaşık α alaşımları	α + β alaşımları
Saf Titanyum Ti-5Al-2,5Sn	Ti-8Al-1Mo-1V Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	Ti-6Al-4V Ti-6Al-2Sn-6V
Yaklaşık β alaşımları	β alaşımları	
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo Ti-3Al-10V-2Fe	Ti-13V-11Cr-3Al Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al	

Alfa alaşımlarından Beta alaşımlarına doğru gittikçe yoğunluk artar, birim şekil değiştirme yeteneği artar, ısıl işlem hassasiyeti artar ve üretim proseslerine yatkınlık artmaktadır. Beta alaşımlarından Alfa alaşımlarına doğru gittikçe ise yüksek sürtünme mukavemeti ve kaynaklanabilirlik artmaktadır.

Alfa alaşımları, alüminyum, zirkonyum ve kalay elementlerini içeren alaşımlardır. Bu tür alaşımlar çok yüksek sıcaklığa sahip olan ortamlarda veya soğuk ortamlarda tercih edilmektedirler. Bu tercihin sebepleri sahip oldukları özelliklerdir. Alfa alaşımları çok yüksek derecede olan sıcaklıklarda beta alaşımlarına göre sürtünmeye karşı daha direçlidirler. Alfa alaşımları çok soğuk ortamlarda bile sünekliklerini ve tokluklarını sürdürmeyi başarabilmektedirler [72]. Alfa alaşımları daha fazla kararlı yapıda oldukları için soğuk şekil verme yöntemlerine pek uygun değillerdir. Dövme ile şekil değiştirme aralıkları çok dardır. Dövme sonrasında yüzeyde ve merkezde çatlaklar oluşmaktadır. Döve prosesinde daha düzgün bir yüzey elde etmek için malzemenin belirli periyotlarla ısıtılması gerekmektedir.[26]. Alfa ve beta alaşımları, uygun oda koşullarında alfa ve beta elementlerinin karışımıyla elde edilmektedir. Yüksek dayanıklılık, süneklik ve tokluk

özellikleri tavlama işlemi sonrasında elde edilir. En fazla kullanılan Titanyum alaşımları alfa ve beta alaşmları karışımından elde edilir. Bunlarda en çok kullanılan alaşım Ti-6Al-4V malzemesidir. Bu malzeme toplam Titanyum üretiminin 45%'sini oluşturmaktadır [28]. Alfa beta alaşımları havacılık seköründe en yaygın kullanılan alaşımlardır. Isıl işlem uygulanabilme kabiliyetleri iyidir ve bu alaşımlara ısıl işlem uygulanarak mukavemetleri artırılır. 350-400°C sıcaklıklarda kullanılabilirler [24, 27]. Beta alaşımları, diğer Titanyum alaşımlarından dövülebilme, sertleştirilebilme, yoğunluk ve soğuk şekillendirilebilme özellikleriyle diğer titanyum alaşımlarından ayrılmaktadır. Oda sıcaklığı düşünüldüğünde alfa beta alaşımıyla benzer özelliklere sahiptirler fakat yüksek sıcaklıklarda performansları düşmektedir [27]. Titanyum alaşımları talaşlı imalatta zor malzeme sınıfına girmektedir. İşlenmesi esnasında takım aşınmalaları meydana gelmekte ve yüksek ısılar oluşmaktadır. Titanyum alaşımlarını işlerken yüksek kesme sıcaklıkları ve kesici takım aşınmaları meydana gelmektedir. Titanyum alaşımları düşük termal iletkenliğe sahiptirler bu yüzden ortaya çıkan ısı hızlı bir şekilde uzaklaştırılamaz. Yüksek sıcaklık kesme bölgesinde ve kesici takımın kesme yüzeyinde toplanır [73]. Yüksek sıcaklıklarda ortaya çıkan talaş yapışkan bir hal alır ve talaş kesici takımın yüzeyine ve iş parçasına yapışır. Bu durum kesme kalitesini, yüzey kalitesini ve kesici takımın hızlı yıpranmasına sebep olur [66].

1.5 Literatür

Teknolojide gerçekleşen gelişmelerle beraber eklemeli imalat yöntemlerinde ve sonradan yapılan işlemelerle alakalı çalışmalarda paralel şekilde gelişmeler ve araştırmalar yapılmıştır. Eklemeli imalat yöntemleri çeşitlenmiş ve ortaya çıkan yöntemlerde de araştırma ve geliştirme çalışmaları artmıştır. İş parçalarının kullanım alanına uygun şekilde üretilmesi konusunda çalışmalar yapılmaya devam etmektedir. Talaşlı imalat, tornalama, frezeleme ve delik delme gibi birçok işleme yöntemini içerisinde barındırmaktadır. Ekemeli imalat sonrası talaşlı imalat uygulamalarında çalışmalar yoğunlaşmıştır ancak mikro delme ile ilgili çalışmalar yok denecek kadar azdır. Aşağıdaki bölümde talaşlı imalat ve eklemeli imalat çalışmaları hakkında geçmişte yapılmış çalışmalar ile ilgili bilgiler yer almaktadır.

1.5.1. Eklemeli İmalat ve Talaşlı İmalat Çalışmaları

Eklemeli imalat ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımının talaşlı imalatta yüzey kalitesi, kesme

kuvvetleri ve talaş şekli ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Talaşlı kesme sırasında oluşan termal ısı geçişi malzemenin özelliklerini etkilemektedir. Etkilenen malzemenin özelliklerini de kontrol altına alabilmek için eklemeli imalat parametreleriyle de güncellemeler yapmak gerekmektedir. Ti6Al4V alaşımı özelliklerinden dolayı talaşlı imalatta zor bir malzeme olarak yer almaktadır. Bu titanyum alaşımı eklmeli imalatta üretilen diğer alaşımlara göre daha fazla yüzey pürüzlülüğüne sahiptir ve buda talaşlı imalat işlemlerini zorlaştırmaktadır. Standar titanyum malzemelerinde çapak oluşumu daha azdır. Eklemeli imalat ile üretilen Titanyum alaşımlarında çapak oluşumu daha fazladır bu durum eklemeli imalat prosesinde kullanılan lazer gücü ile alakalıdır[74]. Elektron ergitme yöntemiyle üretilen titanyum malzeme alaşımının tornalama prosesinin kesme şartları kuru kesmede ve soğutucu gazlar ile kesme şartları altında incelenmiştir. İncelemede kuru kesme şartlarında ve soğutucu kullanımında kısa süreli yaklaşık 40 saniye boyunca soğutucu kullanılabileceği ve geometrik saplamaların çok olmadığı görülmüştür. Fakat uzun süreli işlemelerde soğutucu kullanımının geometrik sapmalara sebep olduğu ve kullanımının dezavantaj yarattığı görülmüştür[75].Bu alaşımın_talaşlı imalatı_sırasında oluşan yüksek ısıyı azaltmak için kriyojenik soğutma kullanılması hem daha kaliteli bir işleme için iyi olacaktır hemde biyomedikal alanlarda vücuda zararlı olmayan çevreci yöntem olarak artı katacaktır. Sartori'nin yaptığı çalışmada eklemeli imalatta üretilen titanyum alaşımında kuru kesme şartlarında kesici takım üzerinde her zaman krater aşınması meydana gelmektedir [76]. Başka bir çalışmada Bordin, eklemeli imalat ile üretilen Ti6Al4V alaşımının tornalam işlemini kuru kesme ve kriyojenik kesme koşulları altında incelemiştir. Sonuçlara bakıldığında kriyojenik kesme, takım aşınmasını azaltmıştır ve kesici takımda bulunan yüzey kaplamasını korumuştur. Kriyojenik soğutma yüksek basınçtan dolayı ve ani şoklama soğutmasından dolayı talaş kırıcılığını artırmıştır. Kriyojenik soğutmada medikal uygulamalarda sağlıklı sonuçlar vermektedir[75]. Kuru kesme şartlarında ortaya çıkan talaş hem iş parçasına hemde kesici takıma yapışmaktadır. Talaşın kırılıp ortamdan uzaklaşması hem malzeme kalitesi hem kesici takım ömrü hemde operatörün iş güvenliği açısından önemlidir. Eklemeli imalat ile üretilen 316L çeliğinin talaşlı imalatta yüzey frezeleme sonuçları takım aşınması, yüzey kalitesi araştırılmıştır. İlk durumda yüzeyin kalitesi istenilen seviyede çıkmıştır. İkinci durumda yüzey pürüzlülüğüde gittikçe azalmıştır aşağı yönlü frezeleme şekli yukarı yönlü frezelemeye göre avantajlı olduğu analizlerde ortaya çıkmıştır [77]. Yapılan bir diğer çalışmada çevreci soğutma koşulları kullanılarak elektron ergitme yöntemiyle üretilmiş Ti6Al4V

titanyum alaşımının mikro frezelem işlemi gerçekleştirilmiştir. Frezeleme sırasında MQL, kuru kesme ve kriyojenik gazlar kullanılmıştır. Daha öncede bahsedildiği üzere bu soğutma yöntemleri çevreye ve operatöre zarar vermeyen soğutma yöntemleridir. Uygun kesme parametrelerini bulmak için kesme hızları ve ilerleme oranları değiştirilerek testler yapılmıştır. Özellikle yağlama miktarının kesme kalitesini çok etkilemediği görülmüştür [78].



Şekil 1. 19 EBM ile üretilmiş titanyum alaşımı mikro frezeleme işlemi.

1.5.2. Eklemeli İmalat ve Delik Delme Çalışmaları

Rysava ve arkadaşları eklemeli imalat ile üretilen Ti6Al4V alaşımına delik delinmesi sırasında çalışma koşullarını ve malzeme koşullarını incelemişlerdir. Titanyum alaşımı direkt metal lazer sinterleme yöntemi ile üretilmiştr. Herhangi bir soğutmanın kullanılmadığı koşulda 1.6 mm çapında delikler delinmiştir. Deliklerin çapları, diklikleri ve oluşan çapaklar incelenmiştir. Kesme hızı olarak 60m/dk seçilmiştir. İşlem yapılırken diş implantı gibi vidalama olan uygulamalar dikkate alınarak kılavuz çekme durumu dikkate alınmıştır. Sonuçlara göre eğer deliğe kılavuz çekilecekse ideal delme parametreleri seçilmeli ve sonra diş açılmalıdır [79]. Ortaya çıkan talaşlar matkapın ilerlemesine göre değişmektedir. Sürekli veya kesik talaşlar ortaya çıkmaktadır. Matkabın ucuna yapışan talaşlar deliğin kalitesini etkilemekte ve deliğin yüzeyine yapışmktadır [80] Talaşlı imalatta delik delerken istenen unsur, deliğin gometrik toleranslar içerisinde olması, dikliğinin, delik yüzeyinin ve delik çıkışındaki çapağın istenen seviyede olmasıdır. TiAl64V alaşımı düşük termal iletkenlik özelliğine sahip olduğu için kesici takım çok fazla ısınmaktadır. İlerleme ve kesme hızı arttıkça ısınma da artmaktadır. İlerleme ve kesme hızı artması yüzey pürüzlülüğünü ve takım aşınmasıını da artırmaktadır. HSS (Yüksek hız çeliği) matkaplarda WC kaplamalı matkaplara göre daha

fazla yüzey pürüzlülüğü görülmüştür. İlerleme arttıkça delik çapından sapma miktarı arttığı görülmüştür kesme hızı arttıkça sapma miktarı azaldığı görülmüştür [81]. Ti6Al4v alaşımının delinmesinde bir başka çalışmada kesme kuvvetleri, tork, kesici takım aşınması ve deliğin kalitesi incelenmiştir. 140 derece uç açısı ve 6,8 milimetre çaptaki karbür matkap kullanılmıştır. Kesme hızlarında üç farklı kesme hızı kullanılmıştır. Üç farklı kesme hızında sabit ilerleme kullanılmıştır. Kesme hızı ve delk derinliği değiştikçe deliğin kalitesi ve matkapa binen kuvvetlerin değiştiği tespit edilmiştir. Takımın aşınması ve takımda oluşan geometri değişikliklerinin bu etkilere neden olduğu analiz edilmiştir [82]. Bir başka çalışmada ise matkapta meydana gelen aşınmalar ve matkapın hangi bölümlerinde aşınmalar meydana geldiği, sabit kesme hızı ve sabit ilerleme parametreleri kullanılarak üç farklı delme yöntemi uygulnmıştır. Matkapın kesici ağzının merkeze yakın olan kısımlarında ve matkapın yan helis yüzeylerinde aşınmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir [83]. Başka bir çalışmada Ti6Al4V alaşımının mikro delme işlemi MQL ile beraber delinmesi incelenmiştir. Burada alaşımın delinmesi zor olması mikro delme işlemi ve kuru kesme dışında bir işlem araştırılmıştır. Sonuçlara bakıldığında MQL ile kesme de kesme kuvvetlerinin azaldığı görülmüştür ve talaşların matkapa yapışmasının azaldığı görülmüştür[84]. Ayrıca MQL diğer bazı yöntemler gibi çevreci bir yöntemdir biyomedikal uygulamalarda insan sağlığı açısından pozitif bir kesme sıvısı yöntemidir. Aynı alaşımın farklı kesme koşullarında delinmesiyle ilgili bir başka çalışmada kuru kesme, MQL ve kriyojenik gazlar ile delinmesi üzerine inceleme çalışması yapılmıştır. Bu koşulların ve kesme parametrelerinin tork ve itme kuvvetlerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Kriyojenik soğutma ile delme de itme kuvvetleri ve torkun arttığı gözlemlenmiştir. İlerleme hızının artması matkapın çıkışındaki çapak miktarını artırdığı görülmüştür [85].Bir başka çalışmada Ming ve çalışma arkadaşları, direkt metal lazer sinterleme yöntemiyle üretilmiş Ti6Al4V malzemesini kuru kesme şartları altında delme prosesi üzerine çalışmışlardır. Ortaya çıkan talaşların şekilleri ve deliklerin kalitelerini incelemişlerdir. Kullanılan matkapın çapı 6,3 mm, uç açısı 140 derece ve helis açısı 30 derece olan TiN kaplamalı matkaplar kullanılmıştır. Deneme yapılan devirler sırasıyla 500dev/dak, 800,1200 ve 1500 dev/dak'dır. İlerleme oranları ise 0,06, 0,09, 0,12 ve 0,15mm/dev'dir. Matkap üzerie yapışan çeşitli formlardaki talaşlardan ötürü delik yüzeylerinde çizikler meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca deliğin sonlarına doğru talaş sıkışmaları meydana gelmiştir. Bu durum matkapın keskinliğini yitirmesine ve delik yüzeylerinde deformasyona sebep olduğu görülmüştür [80]. Ayrıca Titanyum

malzemeler ve diğer malzemeler talaşlı imalatta işlenirken talaşın uzaması istenmez kırılması istenmektedir. İlerleme hızı arttıkça talaş kırılması artmaktadır fakat kesme hızlarında önemli ölçüde bir fark görülmemiştir [86].Son dönemdeki teknolojik gelişmelerle beraber içten soğutmalı matkaplar üretilmiştir fakat mikro matkaplarda bu teknoloji yaygın değildir. Matkap çapı çok küçük olduğu için içten soğutmayı sağlayacak delik kanalları yerleştirmek oldukça zordur. Titanyum alaşımları arasında en çok kullanılan malzemelerden biri olan Tİ6Al4V üzerine bir başka çalışma Cantero ve çalışma arkadaşları tarafından yapılmıştır. Çalışmada 8mm kalınlığında malzeme iki farklı soğutma yöntemi ile delinmiştir. İlk yöntemde her delme sonunda matkap basınçlı hava ile soğutulmuştur. İkinci soğutmada ise matkap her 8 delmede bir basınçlı hava ile soğutulmuştur. Matkap olarak 6mm çapında TiN kaplamalı karbür matkap kullanılmıştır. Kesme hızları 25-65 m/dak ve ilerleme hızı olarak 0,02-0,07 mm/dev denenmiştir ve uygun olarak 50 m/dak kesme hızı ve 0,07mm/dev ilerleme hızı tespit edilmiş ve sabit tutulmuştur. Matkapın kesici ağızlarında talaş yapışması ve işlem miktarı arttıkça talaşlarda yanma meydana gelmiştir [53]. Bir başka çalışmada Dang ve takım arkadaşları ilk aşamada direkt lazer metal sinterleme yöntemiyle Ti6Al4V alaşımını üretmişlerdir. Çalışmada yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve takımın aşınması ile ilgilenmişlerdir. Kesme sıcaklığı kesme hızı ve ilerleme oranı hızı artışıyla doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. İlerleme oranının yüzey pürüzlülüğüne fazla bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Titreşimin yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilediği de gözlemlenmiştir [87].

Bir başka çalışmada aynı alaşımın delinmesi ısırasında matkap helis açısının yüzey pürüzlülüğüne, aşınmaya ve titreşime etkisi incelenmiştir. İş parçasının kalınlığı 35mm ve 10mm çapında ve 118 uç açısında matkap kullanılmıştır. İlerleme hızları sırasıyla 10, 12 ve 14mm/dak ve kesme hızları ise sırasıyla 600,800 ve 1000 dev/dak'dır. Ayrıca matkap olarak PVD kaplamalı karbür matkap kullanılmıştır. Kesme hızı ve helis açısı arttıkça fazla sürtünme nedeniyle kesme sıcaklığının arttığı ve talaş yapışmasının arttığı ve titreşimin arttığı gözlemlenmiştir. Matkap helis açısının yüzey pürüzlülüğüne fazla bir etkisi olmadığı görülmüştür. Deneyler sonucunda 26,16 derece matkap helis açısının, 10mm/dak ilerleme hızının ve 600dev/dak kesme hızının en uygun parametre olduğu sonucuna varılmıştır [54].

Eklemeli imalat ile üretilen parçalar direkt olarak uygulama alanlarında kullanılması

zordur. Kullanılabilmeleri için son işlemlere ihtiyaç duymaktadırlar. Bir başka çalışmada delikleri iyileştirmek için honlama denemeleri yapılmıştır. Ti6Al4V malzemesine esnek honlama ve yüzey partlatma işlemleri delik içine uygulanmıştır. 1000dev/dak kesme hızı ve 100mm/dak ilerleme de 10mm çapında takım ile parlatma işlemi 100 dev/dak kesme hızı, 165 mm/dak ilerleme hızı, 46 µm ezme derinliğinde uygulanmıştır. Bu işlemler sonucunda yüzey pürüzlülüğünde 15% esnek honlamada ve ezme işlemi sonunda 85% iyileşme meydana geldiği gözlemlenmiştir [72].

Bir başka çalışmada matkap boyunun kesme sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Malzeme olarak Ti6Al4V alaşımı kullanılmıştır. Çalışmada 75 ve 105 mm uzunlukta 6mm çapında AlCrN kaplamalı karbür matkap kullanılmıştır. Kesme hızları sırasıyla 10,20 ve 30 m/dak ve ilerleme oranları 0,05,0,10 ve 0,15mm/dev olarak denenmiştir. Yapılan analizler sonucunda kesme sıcaklığı açısından en büyük faktörün kesme hızı olduğu belirlenmiştir. Matkap boyunun artmasıyla sıcaklığın çok yayılmadığı için takım aşınmalarında uzun matkapın daha avantajlı olduğu belirlenmiştir [88]. Gerçekleştirilen bir başka çalışmada En çok kullanılan alaşımlardan Ti6Al4V alaşımı üzerine bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada alaşım dört farklı matkap ile delinerek en uygun kesme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Deneylerde kullanılan iki matkapın çapı 8 mm'dir ve uç açıları 118 derecedir. Kullanılan bu iki matkapın biri kısa 43 mm boyunda diğeri ise uzun 76 mm boyundadır ve bu matkaplar kaplama olmayan HSS matkaplardır. Diğer kullanılan matkaplardan biri 135 derece uç açılı kaplamalı HSS matkap ve bir diğeri 140 derece uç açılı TiAlN kaplamalı karbür matkaptır. Analiz sonuçlarına bakıldığında uzun matkapların sıcaklığı daha iyi yaydığı ve aşınmaların daha az olduğu belirlenmiştir. Uzun matkaplarda titreşim daha fazla olduğu için deliğin yüzey kalitesi kısa matkaplara göre daha kötü durumda olduğu belirlenmiştir. Kaplamalı olan HSS matkap için en yuğun kesme parametreleri delik kalitesi, geometrik tolerans ve takım aşınması açısından değerlendirildiğinde kesme hızı 12m/dak ve ilerleme oranı ise 0,04mm/dev olarak en uygun parametreler tespit edilmiştir. Titanyum alaşımlarının delik iişlemesinde karbür kaplamalı takımları seçmenin en uygun seçim olduğu belirlenmiştir. Bu tür seçimler takım ömrünü ve geometrik kaliteyi doğrudan etkilemektedir. Ayrıca delme yöntemi oalrak gagalama miktarının az olması gerektiği belirlenmiştir [89]. Yapılan başka bir çalışmada Parida, işlenmesi zor ve ısıl iletkenliği düşük olan Ti6Al4V alaşımını bir simülasyon yazılımı kullanarak delik delme işlemini incelemiştir.

Simülasyonda çıkan sonuçlar gerçeğe oldukça yakındır. Simülasyonda kesme hızı arttıkça takım ile iş parçası arasında temas edilen yüzey azaldığı için kesme kuvvetlerinde azalma olduğu görülmüştür. Düşük ilerleme hızında ve yüksek kesme hızlarında yüzey kalitesinin iyi çıktığı gözlemlenmiştir. Simülasyonda kullanılan parametreler aynı deney ortamında gerçek uygulşamada da yapılmıştır ve sonuçlar birbirine çok yakın çıkmıştır. Böylece simülasyon sonuçları teyitlenmiştir [90]. Bazı delik delme işlemlerinde ortada bir delik yokken iş parçası üzerinde bir delik delinirken, bazı işlemlerde ise önceden oluşturulmuş bir delik vardır. Bu delik tasarımdan gelmektedir eğer tasarım delikli bir şekilde oluşturulursa eklmeli imalattan çıktıktan sonra da delikli bir iş parçası ortaya çıkmaktadır. Bu tür delikler kullanılacakları yerlerde direkt olarak kullanılamayacakları için ikinci bir işleme ihtiyaç duymaktadırlar. Bu konuyla alakalı yapılan bir çalışmada delik çapının büyütilmesi üzerine analizler yapılmıştır. Yağmur ve Pul'un çalışmalarında kullandıkları matkap 14mm çapındadır. Delikleri matkapın çapının yarısı olacak şekilde 7 mm çapında önceden delmişlerdir. Amaçları kesme kuvvetlerini, yüzey kalitesini ve kesme sıcaklıklarını analiz etmektir. Kesme hızları 60,75,90 ve 108 m/dak olarak dört farklı kesme hızı belirlenmiştir ilerleme hızı olarak 0,2mm/dev karbür matkap için belirlenmiştir. Yapılan çalışmada kesme hızları arttıkça kesme kuvvetlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Önden delinen numunelerde ilerleme esnasında ortaya çıkan kuvvetlerde azalma görülmüştür. Önden delinen numunelerde talaş hacmi daha az olduğu için takımda aşınma ve sıkışmadan meydana gelen kuvvetler daha düşük çıkmıştır. Bunlara bağlı olarak kesme sıcaklıklarıda önden delinen delikli numunelerde daha düşük çıkmıştır [91]. Yapılan bir diğer çalışmada Ti6Al4V alaşımının delinmesinde delik kalitesine yönelik araştırmalar yapılmıştır. Deliğin ilk girişindeki çapın deliğin ortasından ve çıkışından daha geniş olduğu tespit edilmiştir. Bu durum iş malzemeine matkap temas ettiğinde bir miktar kayma olduğu için olduğu düşünülmektedir. Bu durumu önlemek için noktalama işlemi yapılabilir [92].

Yapılan bir başka çalışmada direk metal lazer yöntemiyle üretilmiş Ti6Al4V titanyum alaşımı 1.6 mm çapındaki mikro matkaplar ile delinmiştir. Delme için yüksek hassasiyetli 5 eksenli cnc işleme merkezi kullanılmıştır. Delme işlemi kuru kesme şartları altında farklı ilerleme ve kesme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda deliğin geometrik kalitesi incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda kesme hızı ve ilerleme hızının delik kalitesi için en önemli iki parametre olduğu ortaya çıkmıştır [79].Eklemeli imalat ile

rüetilen parçaların geotmetrik toleransları incelendiğinde son işleme ihtiyaç olduğunu analiz edilen çalışmada seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiş Inconel alaşımının talaşlı imalatta delik prosesi performansı incelenmiştir. Kesme hızının artması yüzey kalitesini artırmıştır fakat ilerleme oranı arttıkça yüzeyde çizilmeler ve izler meydana geldiği görülmüştür [93]. Literatür taramasından da görüleceği üzere eklemeli imalat ve ikincil işlemlerde talaşlı imalat araştırmaları oldukça yoğun bir şekilde çalışılmıştır ve çalışılmaya devam etmektedir. Eklemeli imalatın gittikçe yaygınlaştığı düşünüldüğünde yapılan çalışmaların uygulamalarda kullanımı ve faydalarının daha da görüleceği oldukça açıktır. Eklemeli imalat ile üretilen iş parçalarının direkt kullanımlarnın zor olduğu özellikle hassas kullanım alanlarında yeniden işleme gereksinimin olduğu aşikardır. Yüzey kalitesinin iyileştirilmesi ve geometrik konum toleranslarının istenen değer içinde olması için talaşlı imalat veya diğer imalat yöntemlerinin uygulanması gerekliliği ortadadır. Bunun için torna işlemi, delik delme, frezeleme, honlama ve leblelеme gibi işlemler uygulanmaktadır ve yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Eklemeli imalat ile üretilen malzemelerin işlenmeleri gelenekssel yöntemler ile üretilen malzemelerin işlenmelerinden farklı parametreler gerekmektedir. Bu parametreleri belirlemek ve önden fikir ve örnek oluşturmak için araştırmalar çok önemlidir. Aşağıdaki tabloda bugüne kadar eklemeli imalat ve son işleme yöntemlerine göre yapılan bazı çalışmalar yer almaktadır. Tablonun en solunda kullanılan malzeme bir sonraki sütunda sırasıyla eklemeli imalat üretim yöntemi, talaşlı imalat yöntemi ve kullanılan parametreler, kullanılan takım özellikleri ve en son kısımda ölçülen sonuçlar yer almaktadır. Eklemeli imalat ve talaşlı imalat kombinasyonunda genel anlamda bilgi verici bir tablodur. Aşağıdaki tabloda da görüldüğü üzere en yaygın kullanılan titanyum alaşımı Ti6Al4V malzemenin analizleri oldukça yaygındır.

Tablo 1. 5 Eklemeli imalat ile üretilen malzemelerde yapılan talaşlı imalat çalışmaları.

Kullanılan Malzeme	Üretim Yöntemi	İşleme Prosesi					Ölçülen Sonuçlar			
		Kesme Hızı	İlerleme	Kesme Derinliği	Takım Tipi	Takım Çapı	Takım Aşınması	Yüzey Pürüzlülüğü	Kesme Kuvvetleri	SEM/Talaş
316L	LAM	2000 dev/dak	1000 mm/dak	0,3 mm	PCBN-PCD	Ø20	√	√		
Al5Si	WAA M	12000 dev/dak	25 mm/dev	0,4-0,8-1,2-1,6 mm				√		
Al2325	WAA M	1000~8000 dev/dak	1~5 mm/dev	1~3 mm				√		
Ti6Al4V	DED	>50000 dev/dak	2-3,5-5 µm/dev	25-50-75 µm		0,5 mm	√	√	√	√
1018Ç		1040-1345 dev/dak	4-12,48 mm/dev	0,012-0,040 mm	TiAlN		√	√		
FeCr	LAM	150 m/dak	0,02-0,04 mm/dev	4-8-12-16		Ø 20 mm	√		√	√
Ti6Al4V		60000 dev/dak	10-50 mm/dak	0,04 mm	Kaplamasız WC	Ø 0.3 mm	√	√		√
Ti6Al4V	DMLS	60-110 m/dak	10-15-20 mm/dev	5,8mm	Tungsten WC	Ø 1,6 mm	√	√		
Ti6Al4V		1000-2500-5000-7500-1000 dev/dak	5-10-15-30-50-70 mm/dev	3 mm	Kaplamasız WC	Ø 0,7 mm	√	√		√
Ti6Al4 V	EBM	50-80 m/dak	0,2 mm/dev	0,25 mm	Tungsten WC		√	√		√
Ti6Al4 V	EBM	60 m/dak	0,1 mm/dev	0,25 mm			√			
Ti6Al4 V		7,85-22,55 m/dak	0,03-0,09 mm/dev		Tungsten WC, HSS	Ø 10 mm	√	√	√	

Ti6Al4 V		38-45 mm/dak	0,1 mm/de v		WC	Ø 6,8 mm	√	√	√	

Kullanılan Malzeme	Üretim Yöntemi	İşleme Prosesi					Ölçülen Sonuçlar			
		Kesme Hızı	İlerleme	Kesme Derinliği	Takım Tipi	Takım Çapı	Takım Aşınması	Yüzey Pürüzlülüğü	Kesme Kuvvetleri	SEM/Talaş
Ti6Al4V		6-12 mm/dak	0,04-0,06 mm/dev	15 mm	HSS	Ø 37,5 mm	√	√		
Ti6Al4V		20 mm/dak	0,01 mm/dev		WC	Ø 5 mm	√	√		
Ti6Al4V	DLMS	500-1500 dev/dak	0,06-0,15 mm/dev		TiN kaplı WC	Ø 6,3 mm	√	√	√	√
Ti6Al4V	DLMS	500-1500 dev/dak	0,06-0,15 mm/dev	12 mm	HX kaplı WC	Ø 6,35 mm	√	√	√	√
Ti6Al4V		25 – 65 dev/dak	0,02 – 0,07 mm/dev	8 mm	TiN	Ø 6 mm	√	√		√
Ti6Al4V		26 – 55 m/dak	0,05 – 0,2 mm/dev			Ø 3,6 mm	√			
Ti6Al4V	LPBF	40 – 60 m/dak	0,005 – 0,015 mm/dev	10 mm		Ø 5,8 mm		√		
Ti6Al4V		600 – 1000 dev/dak	10 – 14 mm/dak	35 mm	PVD kaplı	Ø 10 mm	√	√		

Ti6Al4V		12,5 – 22,6 m/dak	0,037 – 0,08 mm/dev	28	TiAlN	Ø 8 mm	√	√		
Ti6Al4V		25 – 60 m/dak	0,054 – 0,073 mm/dev			Ø 5 mm	√	√	√	
Ti6Al4V + CFRP		50 m/dak	0,05 mm/dev			Ø 6,1 mm	√	√		
conel 718	SLM	15,30 m/dak	0,025 – 0,075 mm/dev	5 mm		Ø 6,8 mm	√	√		
Ti6Al4V	SLM	25 – 100 m/dak	0,06 – 0,15 mm/dev	0,5 mm	TiAlN	Ø 6 mm	√	√	√	√

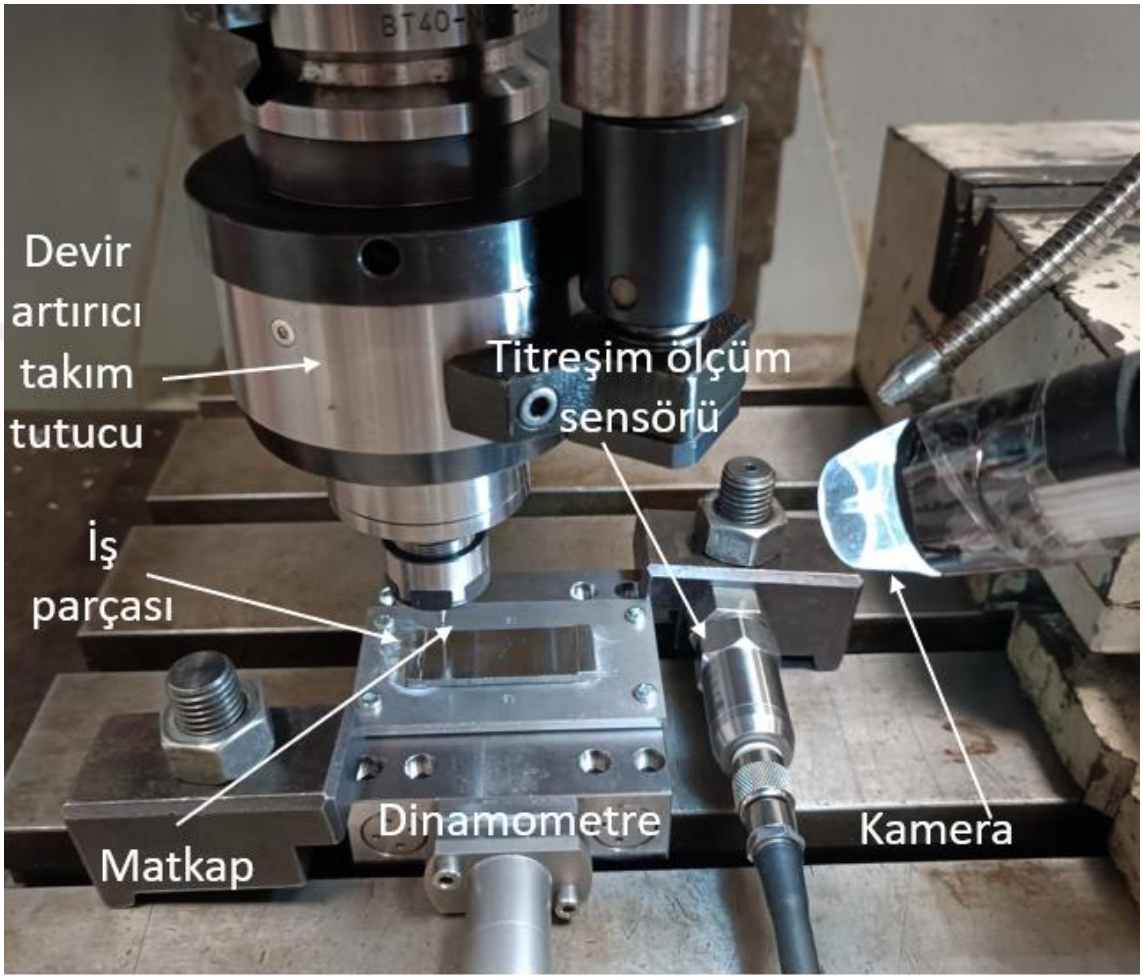
Eklemeli imalat ile üretilen parçalar, havacılık uzay, savunma ve medikal gibi önemli alanlarda kullanılmaktadır. Kullanılan bu parçalarda birleştirme yapmak için delik ve kılavuz kalitesi çok önemlidir. Bu durum çalışmaların önemini artırmaktadır. Üretilen iş parçalarının sıfırdan delinmesi malzeme israfına, zaman kaybına, takım aşınmasına daha çok etkiye ve enerji kaybına yol açacaktır. En doğru çözüm eklemeli üretim sırasında iş parçasını asıl deliğe bir miktar pay bırakacak şekilde delikli halde üretmektir. Daha sonra asıl istenen deliğe ulaşmak için talaşlı imalat makinelerinde delik işlenmelidir.

İş parçasının önden delikli üretilmesi sayesinde,

- ✓ Malzeme tasarrufu ve işçilikten zaman kazanmaya avantaj sağlayacaktır.
- ✓ Matkap ömrü daha uzun olacak ve çeşitli maliyetler daha az olacaktır.
- ✓ Talaş akışı daha kolay olacaktır.
- ✓ Eklemeli üretim süresi kısalacaktır.
- ✓ Delikten sapma azalacaktır giriş ve çıkış çapları arasında fark daha az olacaktır.
- ✓ Matkapta meydana gelen ısınmalar özellikle matkapın uç kısmında daha az olacaktır.

BÖLÜM 2 – MATERYAL ve METOT

2.1 Deneylerde kullanılan test düzeneği genel bakış

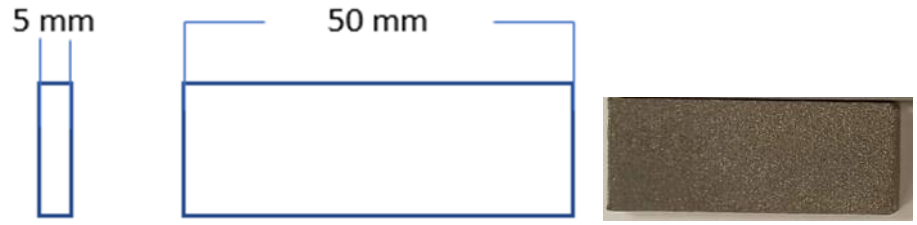


Şekil 2. 1 Deney düzeneği genel tanıtım.

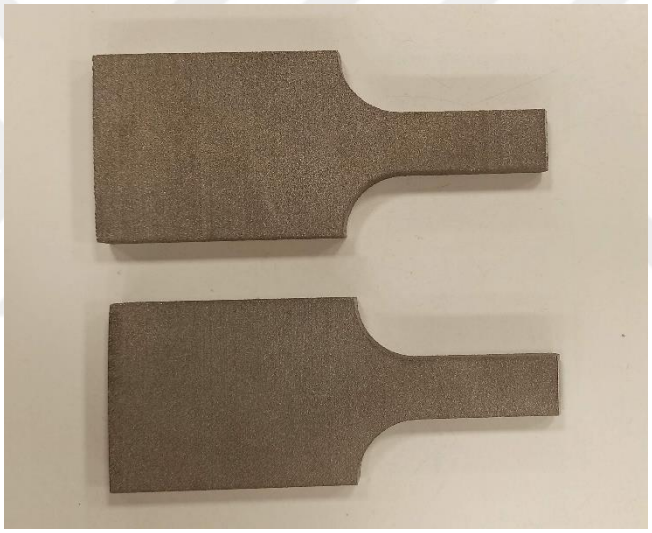
Deney çalışmalarında CNC freze tezgâhı kullanılmıştır. İstenen yüksek devirlere ulaşmak için devir artırıcı kesici takım tutucu seçilmiştir. Bu takım tutucu sayesinde tezgâh maksimum devir sayısı beş katına kadar çıkabilmektedir. Çalışma parçası olan titanyum alaşımı malzeme ise dinamometre üzerine montaj edilmiştir. Matkap ile delik delme çalışmalarında dinamometre içerisinde bulunan kristaller elektriksel sinyaller üreterek kuvvet sonucunu bilgisayar programına aktarmaktadır. Kamera ile delme kontrolü ve talaş akışı gözlemlenmiştir. Ayrıca titreşim ölçüm cihazı sensörü manyetik bir yüzeye sahiptir. Titreşimleri ölçmek için dinamometreye yakın bir konuma tutturulmuştur. Mikro

matkaplar her bir deney sonunda sağlıklı sonuçlar elde etmek için yenisiyle değiştirilmiştir. Deneyde kullanılan ekipmanlar aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

2.2 Malzeme



Şekil 2. 2 Deneylerde kullanılan malzemenin görüntüsü.



Şekil 2. 3 EBM yöntemi ile üretilen yarı mamül malzemeler.

EBM yöntemiyle üretilmiş olan en çok tercih edilen malzemelerden Ti-6Al-4V alaşımlı malzeme kullanılmıştır. Titanyum alaşımı malzeme Arcam EBM adlı firmadan temin edilmiştir. Malzemenin üretimi için kullanılan metal tozları gaz emisyon yöntemi ile üretilmiştir. Boyutları 45 ila 100 mikron arasında değişmektedir. Parça EBM makinesinden ilk çıktığında yukarıdaki şekilde görüldüğü haliyle çıkmaktadır. Daha doğru işlem için ilk olarak parçaya frezeleme işlemi yapılmıştır ve yüzey pürüzlülüğü giderilmiştir. Parça kesildikten sonra frezeleme yapılmıştır ve temiz yüzeyli deney parçası elde edilmiştir. Elde edilen parçanın kalınlığı 5 milimetredir delme kısmı için 3 milimetreye düşürülmüştür.

2.3 CNC Freze Tezgâhı

Doğru ölçümler yapmak ve CNC freze tezgahının istenilen hassasiyette olması çin ortam koşulları çok önemlidir. Bu yüzden kullanılan CNC tezgâh talaşlı imalat labovatuarında uygun ortam koşullarında bulunmaktadır. Mikro işleme yapılırken iş milinde meydana gelen titreşimler çok önemlidir. Titreşimi minimuma indirecek aksiyonlar alınmalıdır. Özellikle yüksek devirlerde titreşim artmaktadır. Yüksek devirlerde iş milinde meydana gelecek titreşimleri azaltmak için sürtünmeler azaltılmadılır. Bunun için uygun yağlama kullanılabilir. Yeni teknolojilerde hafif dayanıklı sürtünmelerin az olduğu seramik ve çelik alaşımlı rulmanlar kullanılmaya başlanmıştır. Kullanılan CNC tezgahında titreşimler ve ısı artışı yüksek hız işlemlerinde azdır. Mekanik olarak uygun bir tezgâh kullanılmıştır. Tezgahlar çalışırken ısı oluşur oluşan ısı tezgâhın mekanik aksamlarında genleşmeye sebep olur. Genleşme CNC tezgâhta ilerleme ölçülerinde hataya sebep olabilir. Yeni teknoloji CNC tezgahlarında bu durumu engellemek için Bilyalı yataklarda delikler bulunmaktadır. Bu deliklerden sıvılar geçer ve soğumayı sağlar.



Şekil 2. 4 Mikro delme işleminde kullanılan CNC freze tezgâhı.

Deneyler sırasında kullanılan freze tezgâhı üç eksenlidir. Kesici takım tabla ile beraber

dairesel hareket yapabilmektedir. Kontrol paneli FANUC'tur. Freze tezgahında kesme işlemi kesici takımın kendi etrafında dönmesiyle gerçekleşir. Kesici takım kendi ekseninde dönerken yukarı aşağı hareket edebilmektedir ve tabla ileri geri ve sağa sola hareket ederek istenilen programa göre kesme işlemi gerçekleşir. Delme işlemi hem freze tezgahlarında hemde matkap tezgahlarında yapılabilmektedir. Freze tezgahında ve matkap tezgahında matkap kendi ekseninde döner ve iş malzemesi üzerinde yukarı veya aşağı yönlü hareket yaparak delme işlemini gerçekleştirir. Delme işlemi yapılırken kesme parametreleri ve delme yöntemi belirlenir. Kesme hızı, ilerleme hızı ve devir belirlenir.

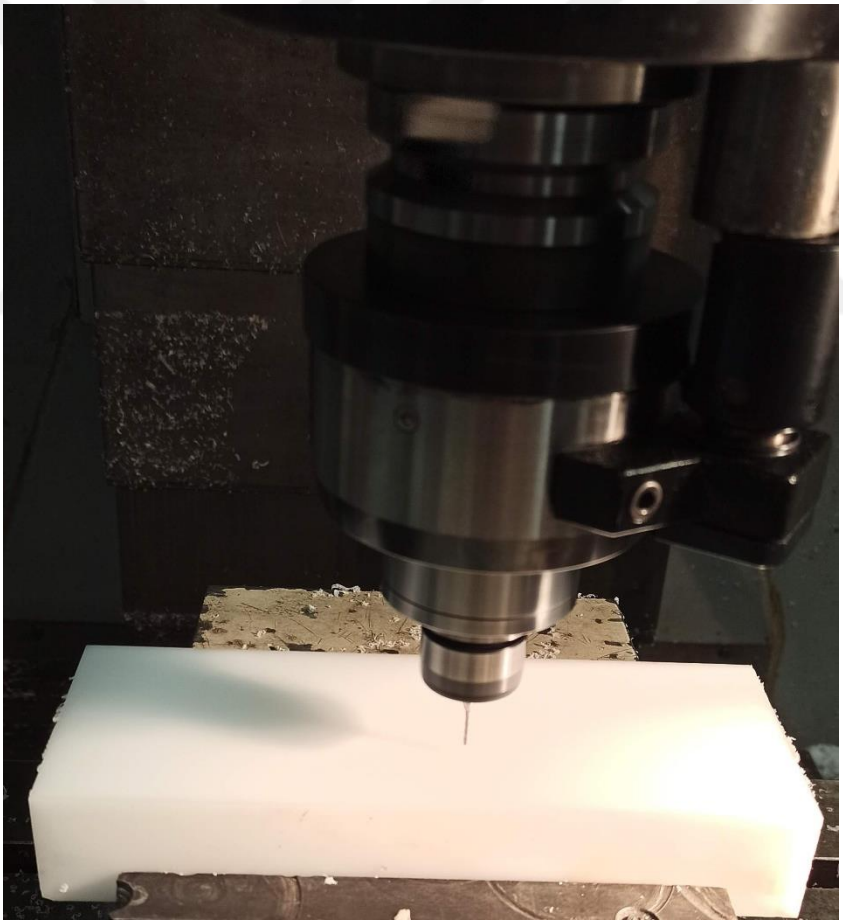
Tablo 2. 1 Çalışmlarda kullanılan CNC tezgâhın teknik özellikleri.

Model	VMC 850
Tabla çalışılabilir yüzeyi	1000 x 500 mm
İş mili motor gücü	10 HP
Tabla ağırlık kapasitesi	900 kg
Tezgah alanı	2,35 x 2,5 m
Makine ağırlığı	5500 kg
X,Y,Z hareket kapasitesi	800 mm, 500 mm, 450 mm

Mikro matkaplar ile delik delebilmek için çok yüksek devirlere çıkmak gerekir. Genel olarak talaşlı imalatta delme işleminde takım çapı büyüdükçe deviri azaltmak, takım çapı küçüldükçe deviri yükseltmek gerekmektedir. Dolayısıyla mikro matkaplar ile çalışma durumunda çok yüksek devirlere çıkılmalıdır. Mevcut CNC freze tezgahında çok yüksek devirlere ççıkabilmek için devir yükseltici aparat kullanılmıştır. NIKKEN firması r-tarafından geliştirilen mekanizma fener milinin normal devirini matkap üzerinde 5 katına kadar çıkarabilmektedir. Mekanizmanın içinde bulunan dişli düzeneği sayesinde devir artırabilme yeteneğine sahiptir.



Şekil 2. 5 NIKKEN devir yükseltici takım bağlama aparatı.



Şekil 2. 6 Devir yükseltici aparat ile kestamit malzeme mikro delme denemeleri.

2.4 Çalışmada Kullanılan Mikro Matkaplar

Delme işleminde karbür kaplama mikro matkaplar kullanılmıştır. Mikro matkaplar devir artırıcı aparata takım pensleri yardımıyla bağlanabilmektedir. Çok yüksek devirlere çıkıldığı için matkapın çok sağlam ve rijit bir şekilde aparata bağlanması önemlidir. Talaşlı imalat teorilerine göre kesici takım çapı küçüldükçe devir sayısı yükselmelidir. Mikro matkaplar ile çalışırken çok yüksek devirlere çıkmak gerekmektedir. Deneylerde 0.5 mm, 0.6 mm 0.7 mm matkap çapları kullanılmıştır.



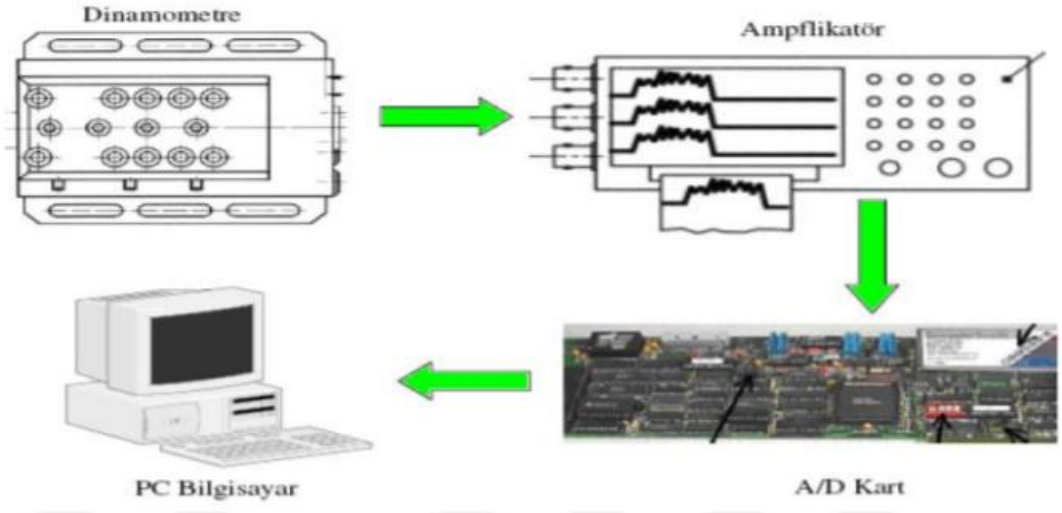
Şekil 2. 7 Çalışmada kullanılan 0,5 mm, 0,6 mm ve 0,7 mm mikro matkaplar.

2.5 Ölçüm Cihazları

Kesme Kuvvetleri Ölçüm Cihazı

Kesme kuvvetlerini ölçmek için İsveç menşeili KISTLER marka yük amplifikatörü kullanılmıştır. Bu cihaz kesici takıma gelen yükleri x, y ve z eksenelerine göre ayrı ayrı hesaplayabilmektedir. Dinamometreden gelen sinyalleri yükselterek volt cinsine çevirir ve kuvvet hesaplanmasına yardımcı olur. Cihaz üzerinden kuvvetler okunabilir ayrıca bilgisayara aktarılabilmektedir. Bilgisayarda bulunan Dynoware yazılımına gelen veriler Fx, Fy ve Fz kuvvetlerini Newton cinsinden hesaplar ve bu hesaplamaları grafik ve sayısal değerlere aktarır. Tornalama, taşlama delik delme ve frezeleme gibi işlemlerde sistem kuvvet ölçümü yapmaktadır. Aşağıdaki resimde cihazın çalışma şekli özet olarak

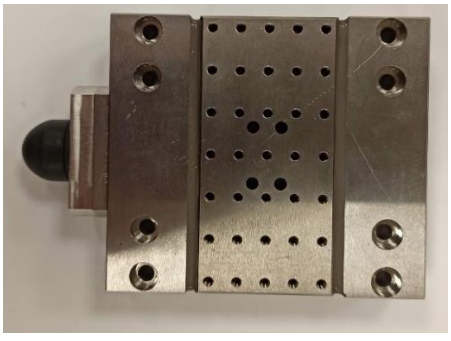
aktarılmıştır[94].Sistem üç boyutlu kuartz dinamometre, üç kanallı amplifikatör, dinamometreden veri alma aparatı ve bilgisayara bağlanma aparatını içermektedir.



Şekil 2. 8 Yük amplifikatörü çalışma şeması.

Kuartz Dinamometre

Delme işleminde üç eksenden gelen kuvvetleri öçme sırasında kullanılmaktadır. Rijitliği çok yüksektir ve yüksek doğal frekansa sahiptir. İki metal plaka arasına yerleştirilmiş dört adet kuvvet sensörü bulunmaktadır. Sensörlerde üçer çift kuartz plaka yer almaktadır. Kuartz plakalar üzerlerine gelen yükleri değerlendirilmesi için amplifikatöre gönderir. Delme işlemi yapılan malzeme resimde görünen dinamometre üzerine sabitlenmiştir ve delme işlemleri yapılmıştır. Dinamometre üzerinden kesme kuvvetleri elde edilmiştir.



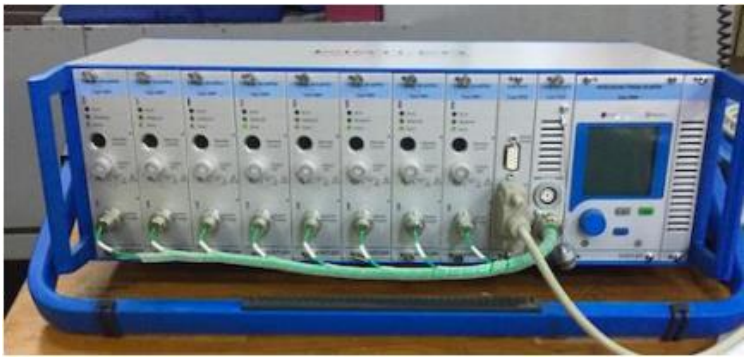
Şekil 2. 9 Kuartz dinamometre.

Özellik	Sembol	Birim	Değerler
Ölçme Aralığı	Fx,Fy	kN	-15/15
	Fz	kN	-10/30
Aşırı yük	Fx,Fy	kN	-20/20
	Fz	kN	-12/40
Hassasiyet	Fx,Fy	pC/N	~-8
	Fz	pC/N	~-3,8
Rijitlik	Cx,Cy	kN/µM	~0,8/1
	Cz	kN/µM	~2
Doğal frekans	(x,y), F0(z)	kHz	~1,5/1,7
Çalışma sıcaklığı		°C	≤0,02(0-70)

Şekil 2. 10 Dinamometre teknik özellikleri.

Amplifikatör

KISTLER marka yük amplifikatörü üç eksenden gelen kuvvetleri ayrı ayrı değerlendirip grafiklere ve sayısal verilere aktarabilmektedir. Üç kanallı mikro işlemci ile kontrol sağlamaktadır. Parametre ayarları cihaz üzerinde bulunan kısımlardan ayarlanabilmektedir. Ayrıca sonuçları bilgisayara aktarmaktadır.



Şekil 2. 11 KISTLER yük amplifikatörü.

Arayüz		RS-232C
Bağlantı		Fischer 9pol.Neg
Açıklama		19'' Rack
Frekans aralığı		0……..>45Hz
Ölçüm aralığı		±200-200000pC
Çıktı sinyali		200-240V
Kanal sayısı		8

Şekil 2. 12 KISTLER yük amplifikatörü özellikleri.

Titreşim Ölçüm Cihazı

Matkap ile delme sırasında ortaya çıkan titreşimi ve değişimleri ölçmek için Brüel & Kjaer firması tarafından üretilen VibroTest60 cihazı kullanılmıştır. Cihazı frezeleme, tornalama delik delme gibi işlemlerde kullanılabilir. Cihaz makine çalışırken doğal frekans ve diğer frekansları ayırt edebilmektedir veri ve grafik analizleri sağlayabilmektedir. Cihazda bulunan karta kaydedilen veriler bilgisayara aktarılıp daha sonra Vibro Report programında analiz edilmiştir.



Şekil 2. 13 Titreşim ölçüm cihazı.

BÖLÜM 3 – DENEYSEL UYGULAMA ÇALIŞMALARI

3.1 Deney Yöntemi

Tablo 2. 2 Deneylerde kullanılan mikro matkap özellikleri.

Mikro matkap çapları	0,5 mm – 0,6 mm – 0,7 mm
Matkap kaplaması	Karbür
Delici kısım uzunluğu	6 mm
Toplam boy	35 mm
Sap boyu	3,25 mm
Uç açısı	118 ± 5
Helis açısı	30 °

Tablo 2. 3 Deney çalışmaları genel tablosu.

Çap (mm)	0,5 mm	0,6 mm	0,7mm
Devir 1 (rpm)	5000 rpm	5000 rpm	5000 rpm
Devir 2 (rpm)	10000 rpm	10000 rpm	10000 rpm
Devir 3 (rpm)	15000 rpm	15000 rpm	15000 rpm
İlerleme oranı 1 (mm/dak)	1 mm/min	1 mm/min	1 mm/min
İlerleme oranı 2 (mm/dak)	2 mm/min	2 mm/min	2 mm/min
İlerleme oranı 3 (mm/dak)	3 mm/min	3 mm/min	3 mm/min
Delme derinliği (mm)	3 mm	3 mm	3 mm

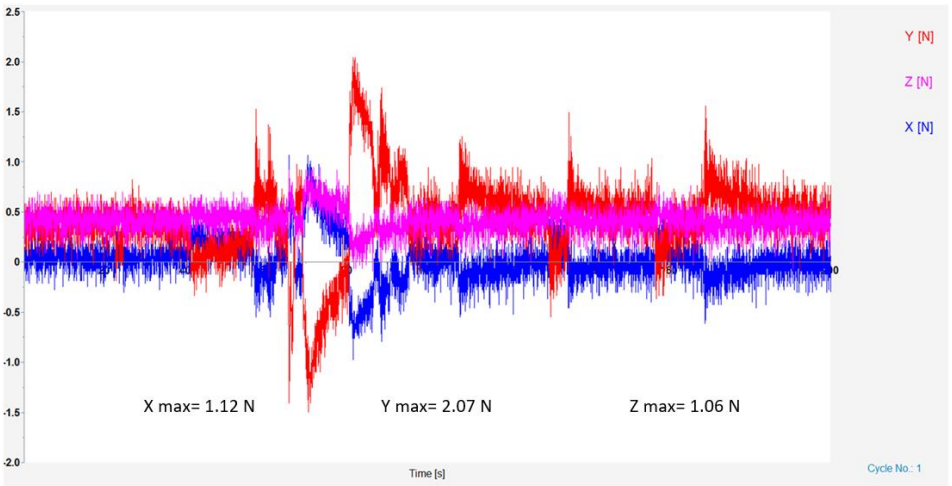
Deneyler kullanılan matkap özellikleri yukarıdaki tabloda paylaşılmıştır. Her bir deney sonunda kullanılan matkap yenisi ile değiştirilmiştir. Toplamda dokuz adet deney yapılmıştır. Her bir deney setinde çap sabit tutularak sırasıyla ilerleme hızı ve devir değiştirilmiştir. Deney sırasında kuvvet ve titreşim ölçümleri yapılmıştır.

Delik delme deneylerinde toplamda dokuz adet çalışma gerçekleşmiştir. Deney sonuçları fotoğraflanarak aşağıda listelenmiştir. En son kısımda ise genel bir tabloda sonuçlar gösterilmiştir. Ortaya çıkarılan delik sonuçları mikro kamera altında görüntülenmiştir ve malzeme üzerindeki delikler aşağıda yer almaktadır.

Aşağıdaki resimde görülebileceği üzere çalışma parçasının üzerinde dokuz adet delik bulunmaktadır. Delikler sırasıyla 0.7 mm, 0.6 mm ve 0.5 mm çaplarındadır. Her bir deney için sırasıyla değişken ilerleme hızları ve devir sayıları kullanılmıştır. Yapılan çalışmada delik delme sırasında oluşan kesme kuvvetleri ve titreşimler analiz edilmiştir. Tireşim ve kesme kuvvetlerinin delik çapı üzerindeki etkileri sonuçlar kısmında yorumlanmıştır. Aynı zamanda kaliteli bir işlem için delik başlangıcı ve delik sonu konumları, çapaklar, doğrusallık ve delik içi kalitesi analiz edilecektir.

3.2 Deneyler

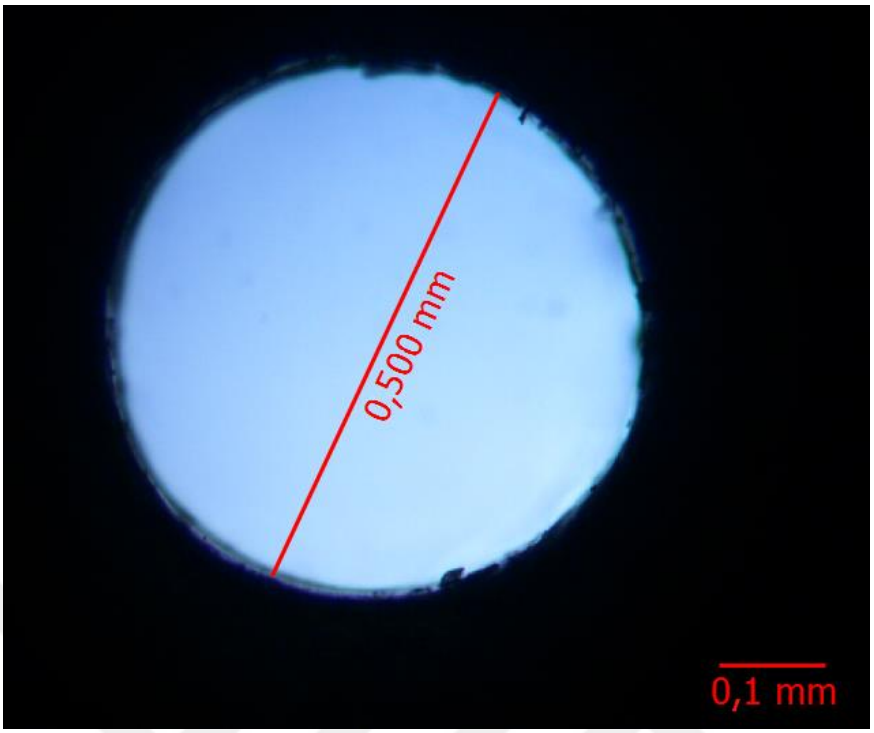
Birinci deney çalışmasında mikro matkap çapı olarak 0,5 mm kullanılmıştır. Birinci deneyde ilerleme hızı dakikada 1mm'dir devir sayısı ise dakikada 5000 rpm'dir. Her bir deneyde deney süresi boyunca görülen maksimum kesme kuvvetleri ve titreşim değeri dikkate aınmıştır. Birinci deney 3 mm kalınlığında iş parçası olduğu için üç dakika sürmüştür. Birinci deneye ait görüntüler aşağıda paylaşılmıştır. Diğer deney sonuçları genel tabloda belirtilmiştir.



Şekil 3. 1 Birinci deney kuvvet grafiği.

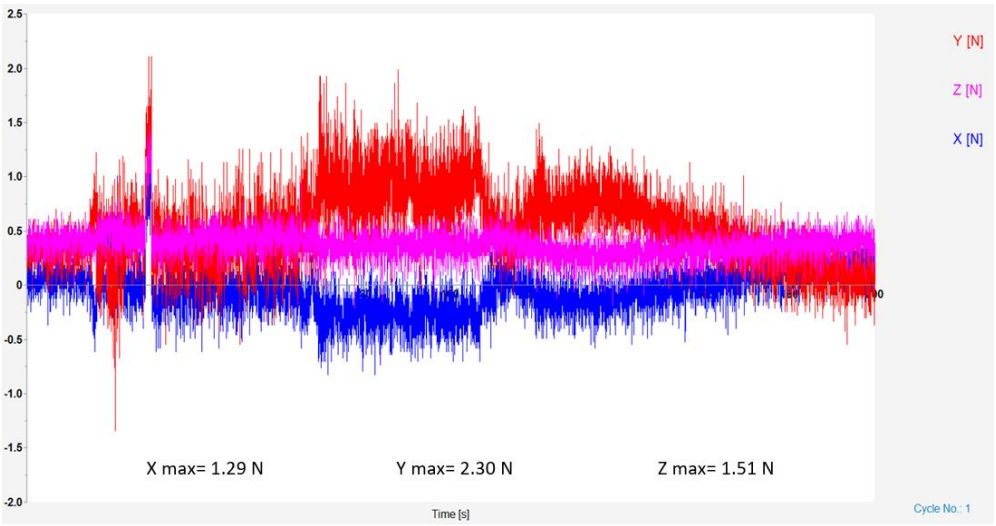
Birinci deneyde 0,5 mm çapında mikro matkap kullanılmıştır. Delme süresi boyunca ölçülen maksium kuvvetler görüntüde paylaşılmıştır. Ayrıca aşağıda bulunan tabloda

ölçülen bütün kuvvetler gösterilmiştir. X, Y ve Z eksenlerinde kuvvet ölçümleri yapılmıştır ve analiz programında farklı renkler ile gösterilmiştir.



Şekil 3. 2 Birinci deney delik görüntüsü.

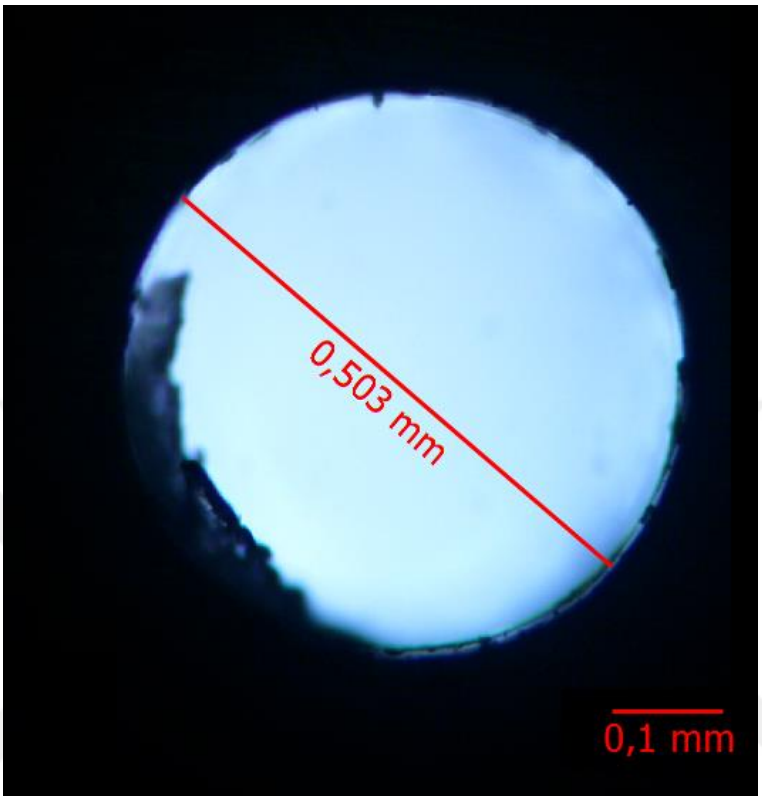
Birinci deney çalışmasından sonra oluşan delik mikroskop görüntüsü paylaşılmıştır. Aşağıda bulunan tabloda her bir deneyde ne kadar sapma olduğu ve bunların analizi yer almaktadır. Delik içi çap ekteki resimde de görülebileceği üzere 0,500 mm olarak görüntülenmiştir.



Şekil 3. 3 İkinci deney kuvvet grafiği.

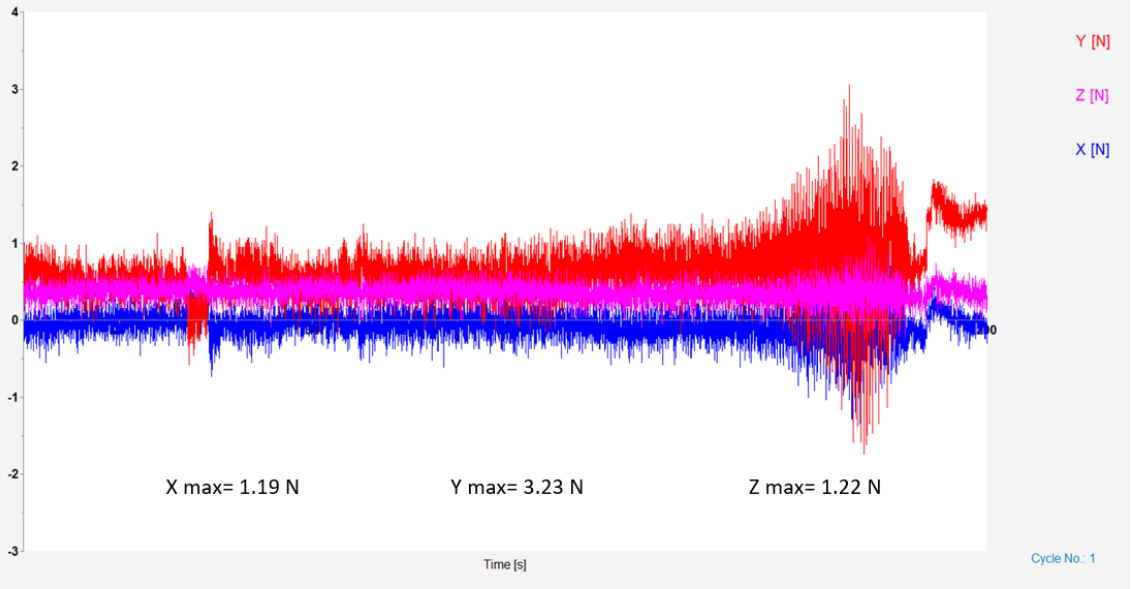
İkinci deneyde 0,5 mm çapında mikro matkap kullanılmıştır. Birinci deneyden farklı olarak ilerleme hızı ve devir değiştirilmiştir. Delme süresi boyunca ölçülen maksium

kuvvetler görüntüde paylaşılmıştır. Ayrıca aşağıda bulunan tabloda ölçülen bütün kuvvetler gösterilmiştir. X, Y ve Z eksenlerinde kuvvet ölçümleri yapılmıştır ve analiz programında farklı renkler ile gösterilmiştir.



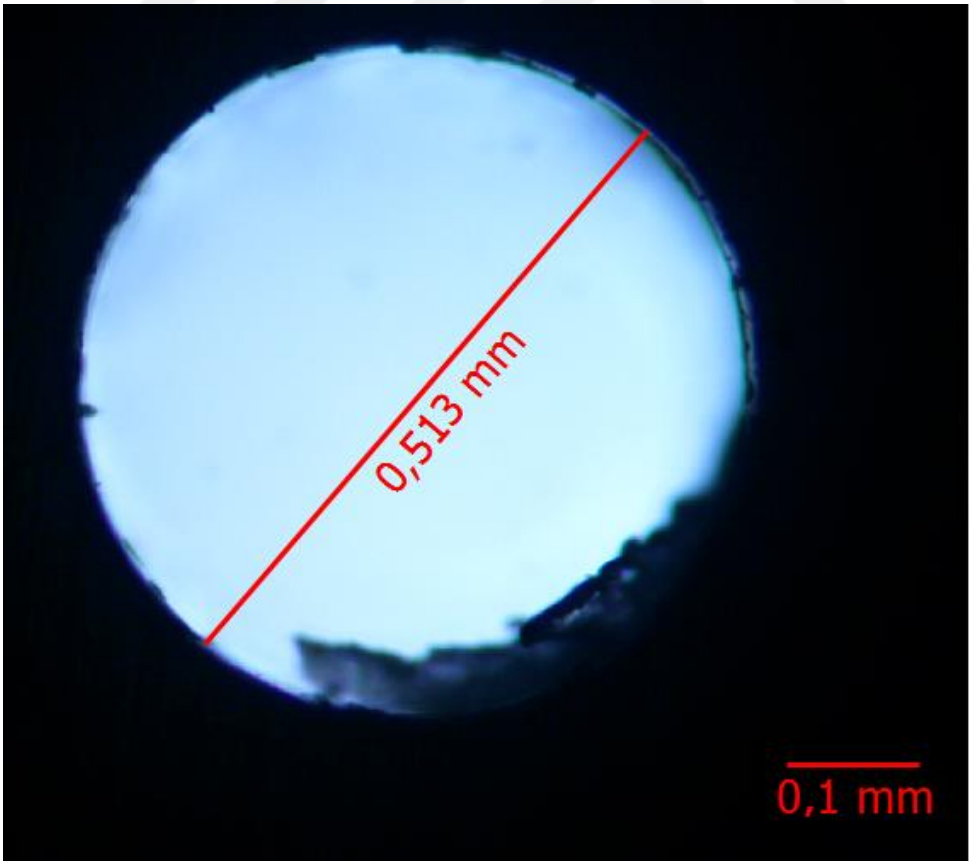
Şekil 3. 4 İkinci deney delik görüntüsü.

İkinci deney çalışmasından sonra oluşan delik mikroskop görüntüsü paylaşılmıştır. Oluşan kuvvetler ve matkapta oluşan titreşim dolayısıyla fotoğrafta da görülebileceği üzere 0,5 olması istenen delikte sapmalar meydana gelmiştir. Oluşan kuvvetlerin ve titreşimlerin etkisi görülmektedir.

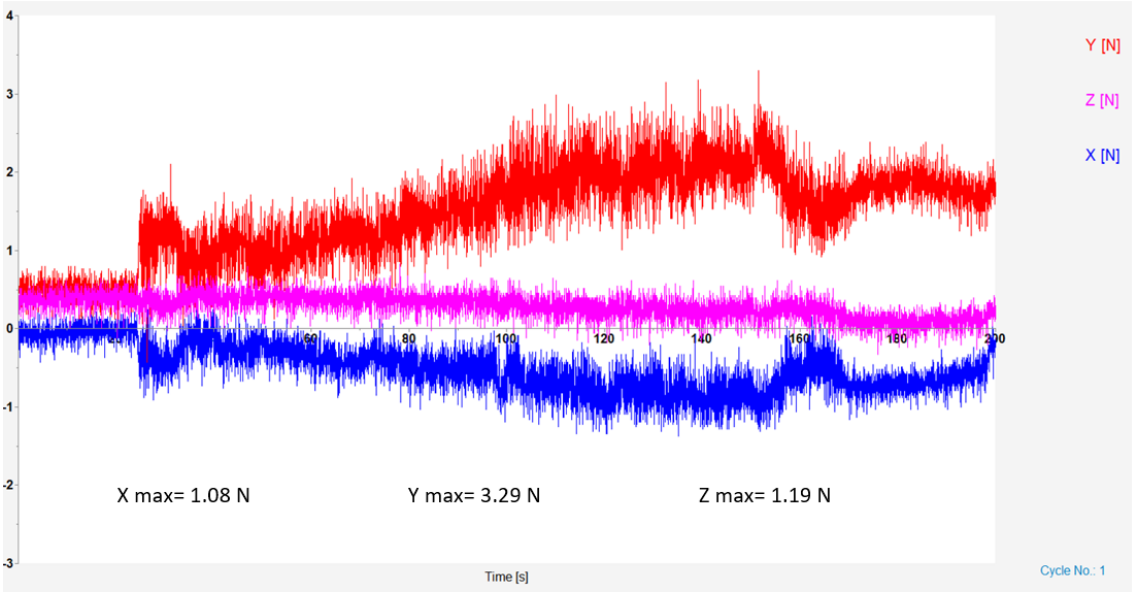


Şekil 3. 5 Üçüncü deney kuvvet grafiği.

Üçüncü deney çalışmasında yeni bir 0,5 mm çapında mikro matkap kullanılmıştır. Üçüncü deneyde devir ve ilerleme maksimum düzeye çıkarılmıştır. Bu seviyede kuvvetler ve titreşimler artmakta ve bunun etkisi delik kalitesinde de görülmektedir.

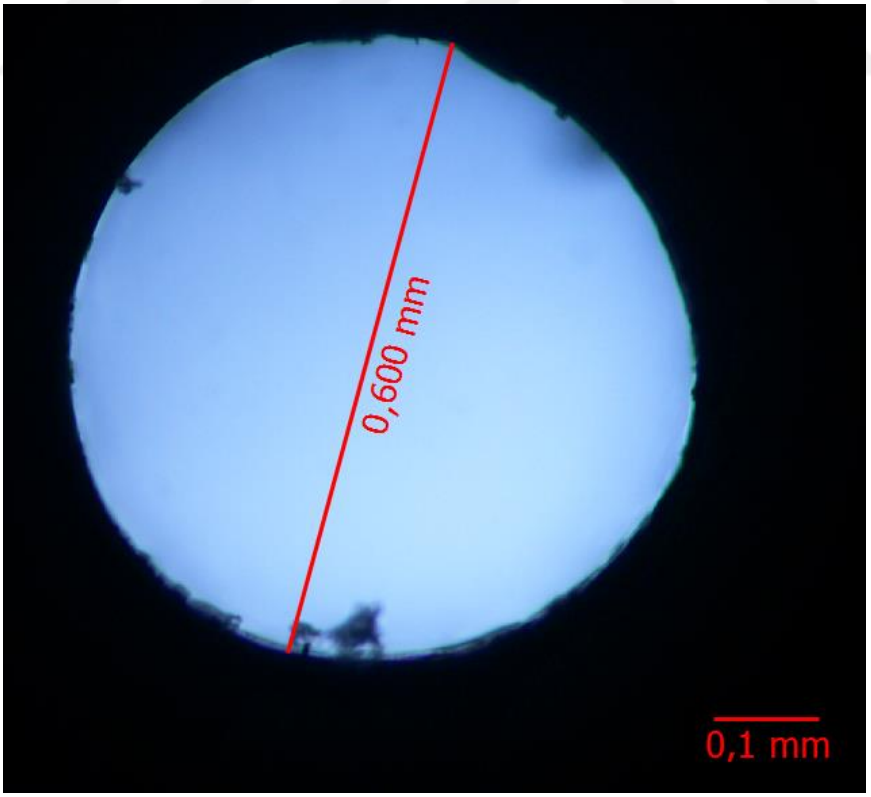


Şekil 3. 6 Üçüncü deney delik görüntüsü.

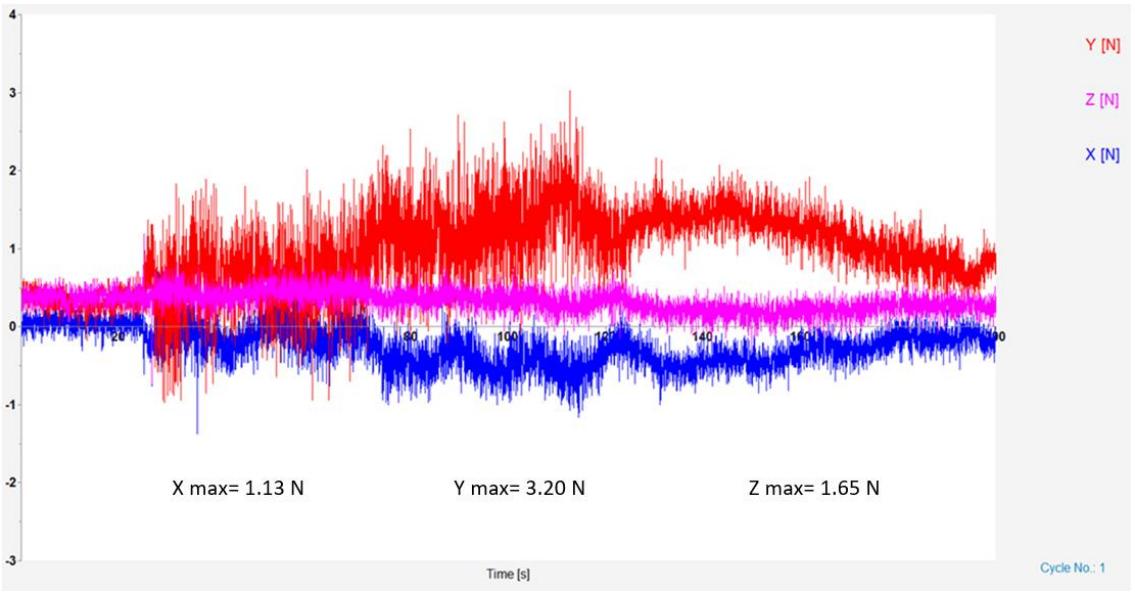


Şekil 3. 7 Dördüncü deney kuvvet grafiği.

Dördüncü deneyde 0,6 mm mikro matkap kullanılmıştır. Matkabın çapının büyümesi ile titreşim ve kuvvetlerde değişkenlikler görülmüştür. Aşağıda bulunan genel tabloda analizler paylaşılmıştır. Devir ve ilerleme düşük seviye de iken deliklerin ölçüleri daha kaliteli çıktığı kolaylıkla gözlemlenmektedir.

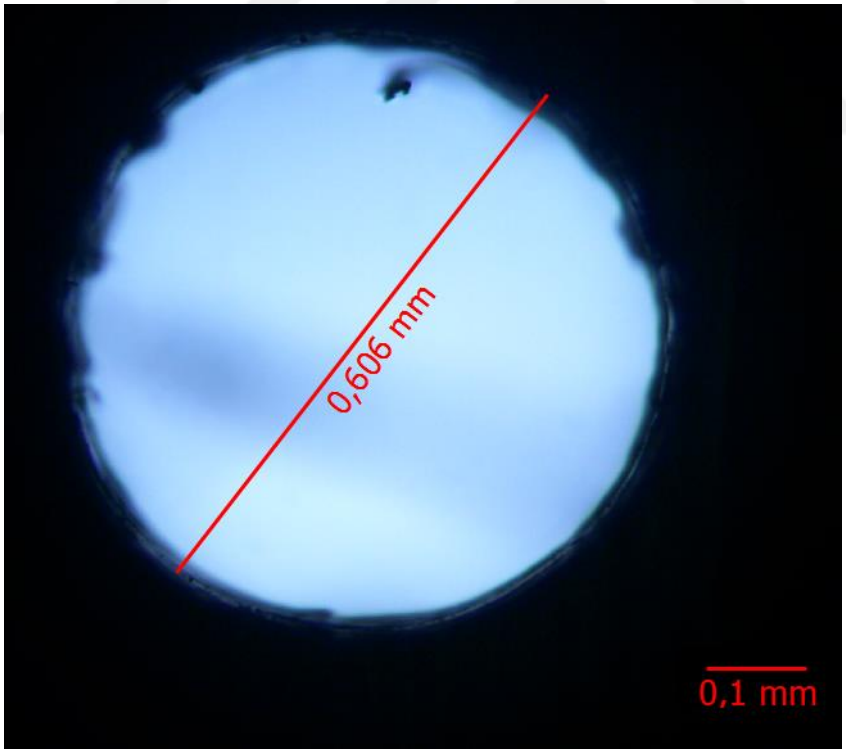


Şekil 3. 8 Dördüncü deney delik görüntüsü.

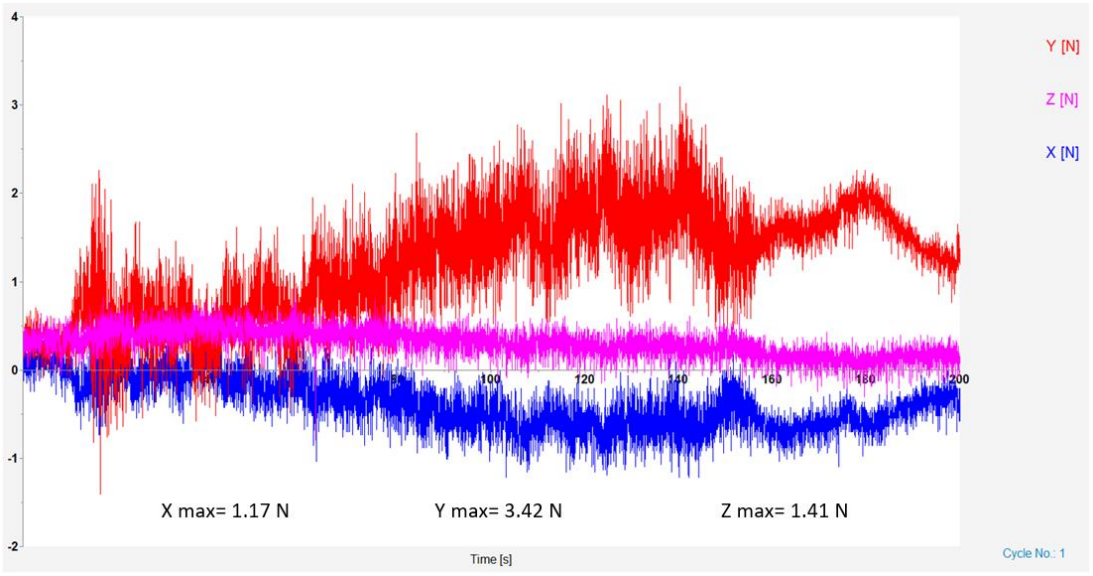


Şekil 3. 9 Beşinci deney kuvvet grafiği.

Beşinci deneyde de 0,6 mm mikro matkap kullanılmaya devam edilmiştir. Deney taleplerine göre devir ve matkap ilerleme hızı artırılmıştır.

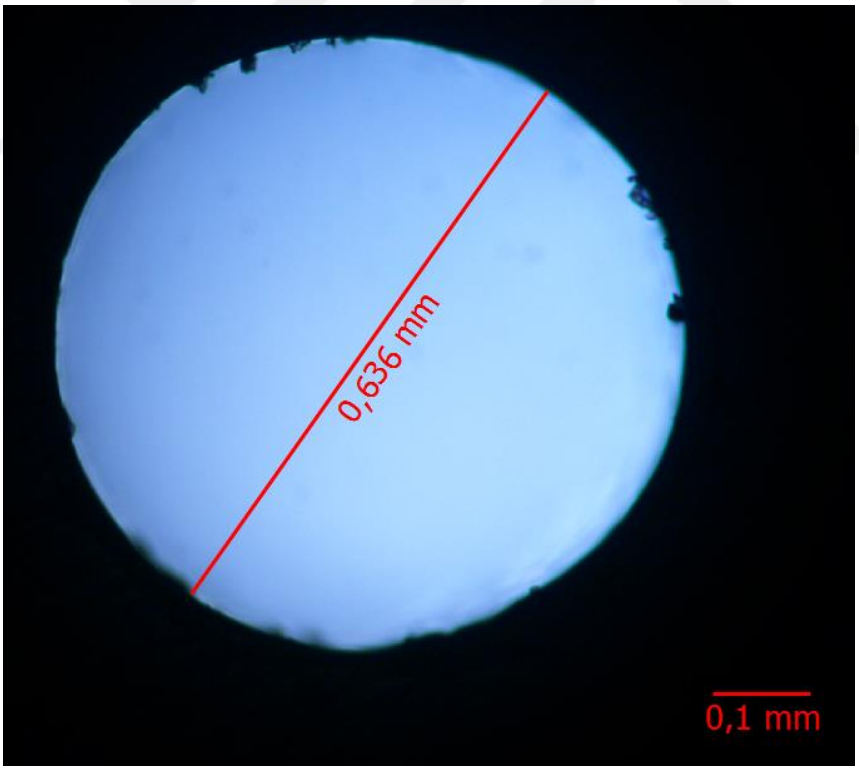


Şekil 3. 10 Beşinci deney delik görüntüsü.

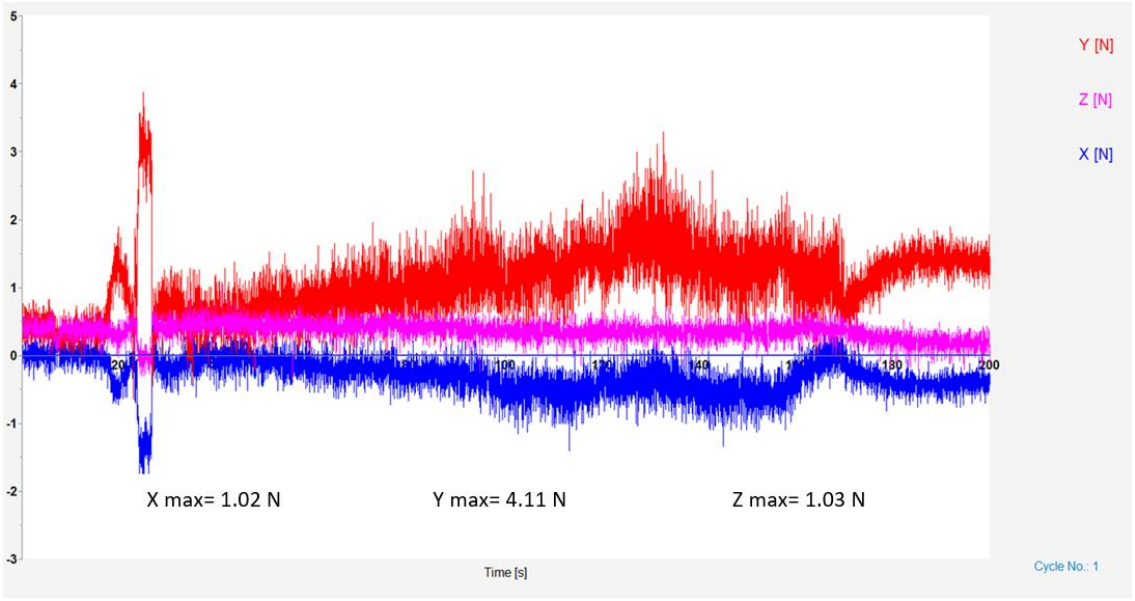


Şekil 3. 11 Altıncı deney kuvvet grafiği.

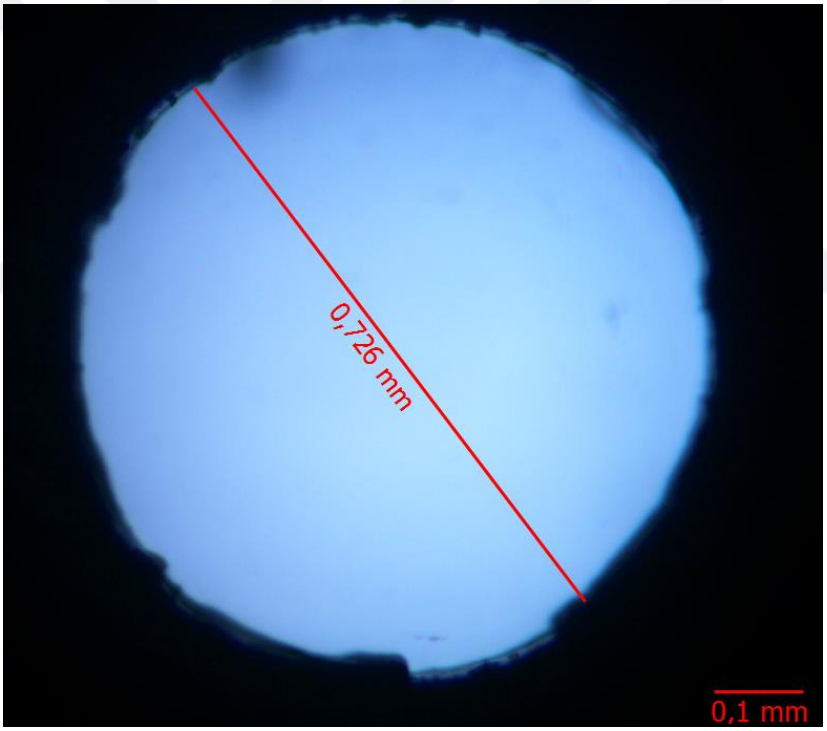
Yukarıda ki görüntü de altıncı deneye ait kuvvet grafiği yer almaktadır. 0,6 mm mikro matkap ile maksimum ilerleme ve devir sayısında ölçümler alınmıştır. İlerleme hızının ve devir sayısının artmasının etkileri sonuçlarda net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3. 12 Altıncı deney delik görüntüsü.

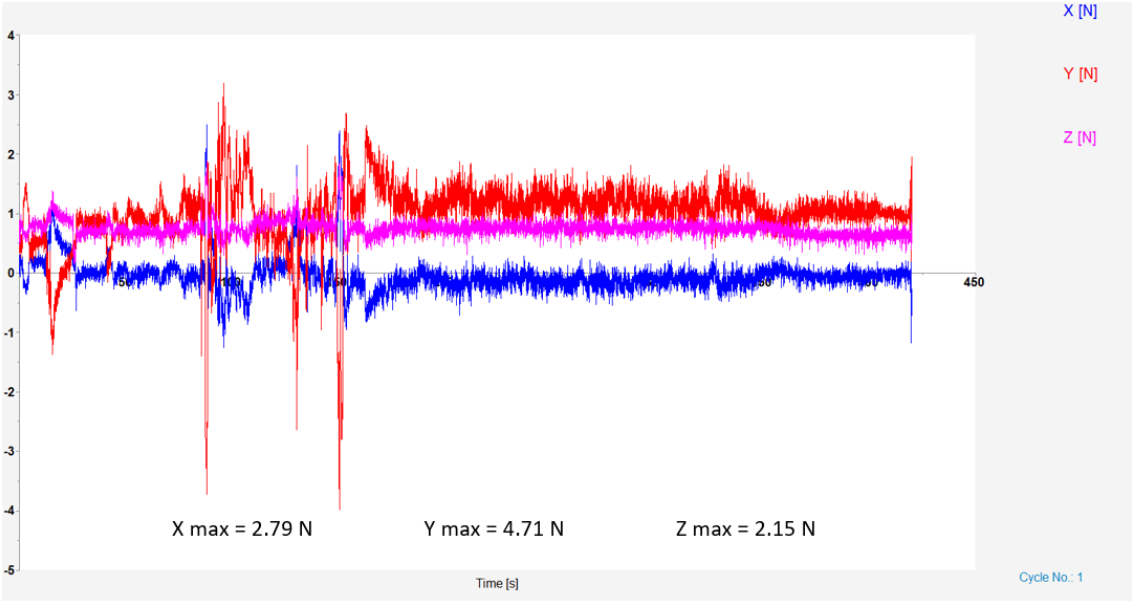


Şekil 3. 13 Yedinci deney kuvvet grafiği.

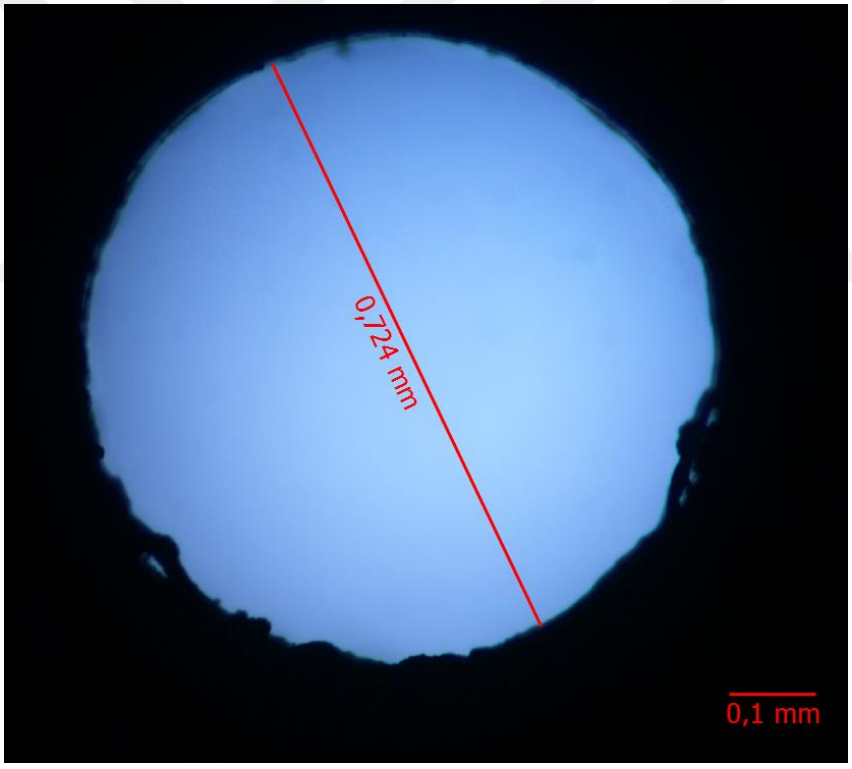


Şekil 3. 14 Yedinci deney delik görüntüsü.

Yedinci deneyde son deney üçlüsüne geçilmiştir. 0,7 mm çapında mikro matkap kullanılmaya başlanmıştır. Matkabın çapı arttıkça kaldırdığı talaş miktarı artmaktadır. Dolayısıyla sürtünmeler yüzeye temas artmaktadır.

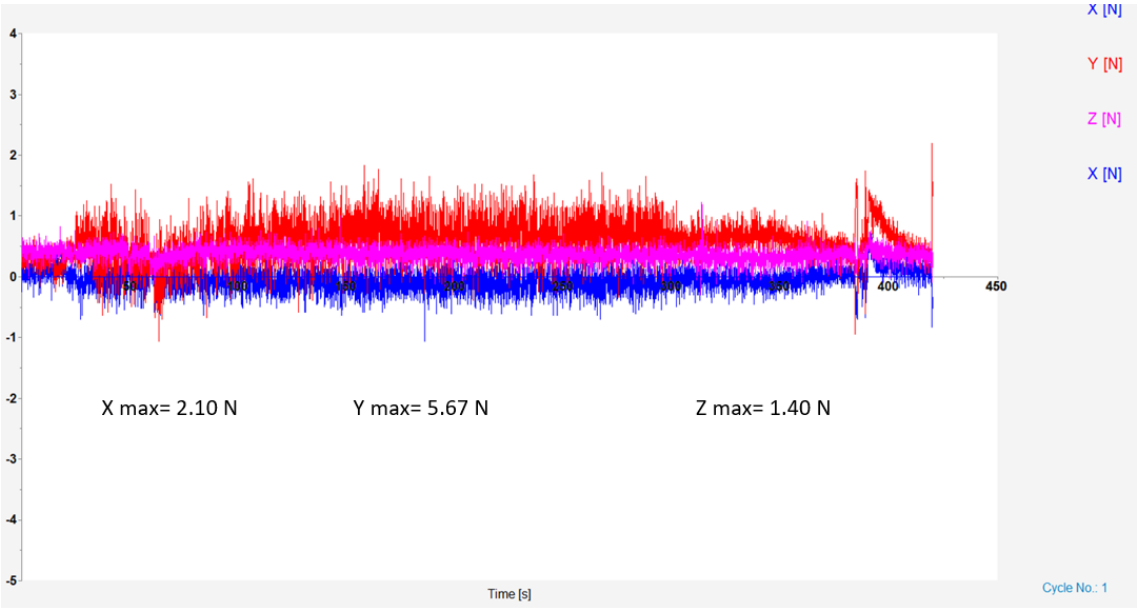


Şekil 3. 15 Sekizinci deney kuvvet grafiği.

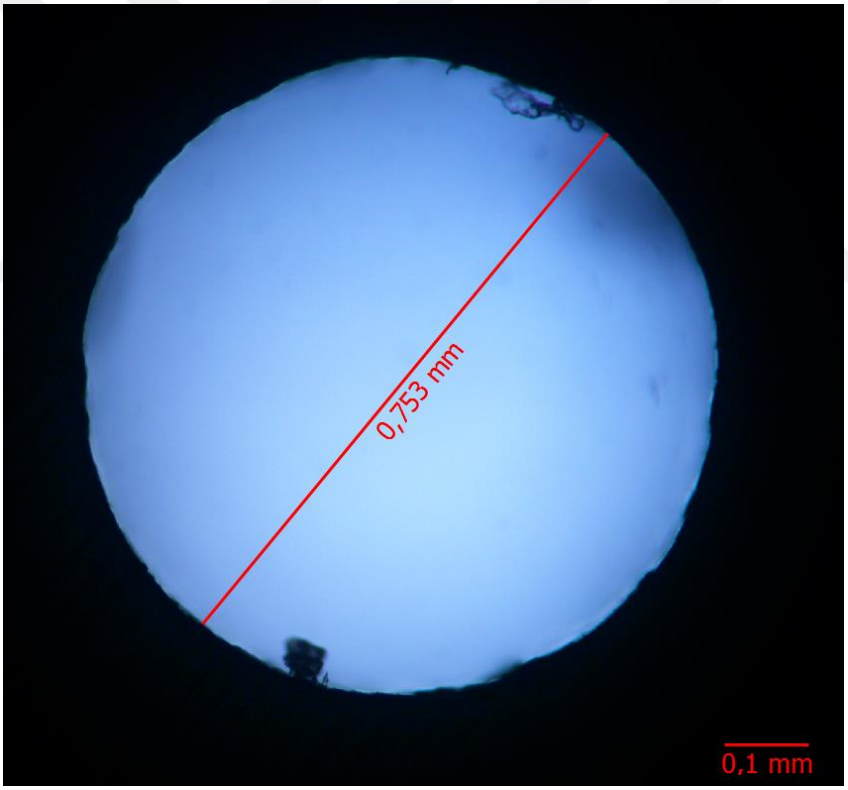


Şekil 3. 16 Sekizinci deney delik görüntüsü.

Sekizinci deneyde 0,7 mm çapında matkap kullanılmaya devam edilmiştir. Matkap ilerleme hızı artırılmıştır ve devir sayısı artırılmıştır.

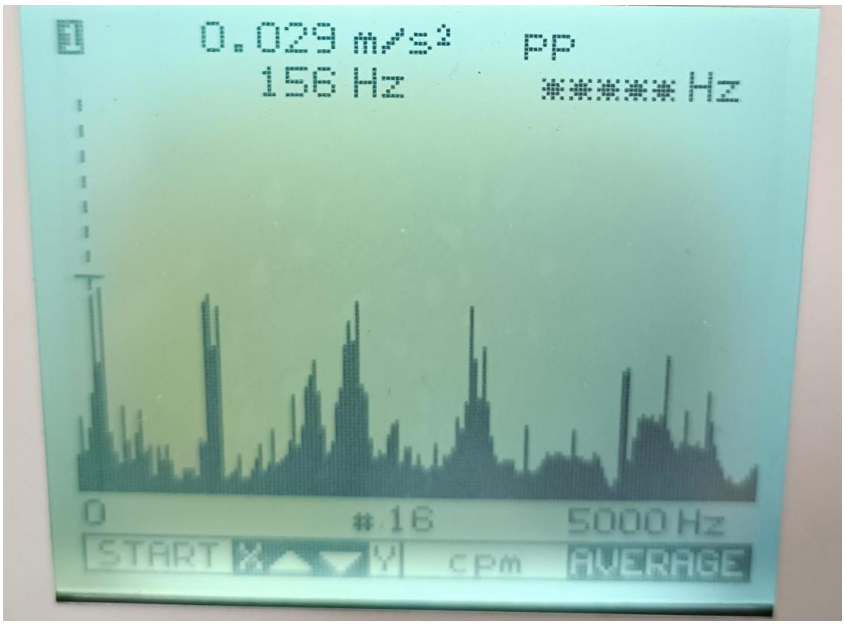


Şekil 3. 17 Dokuzuncu deney kuvvet grafiği.



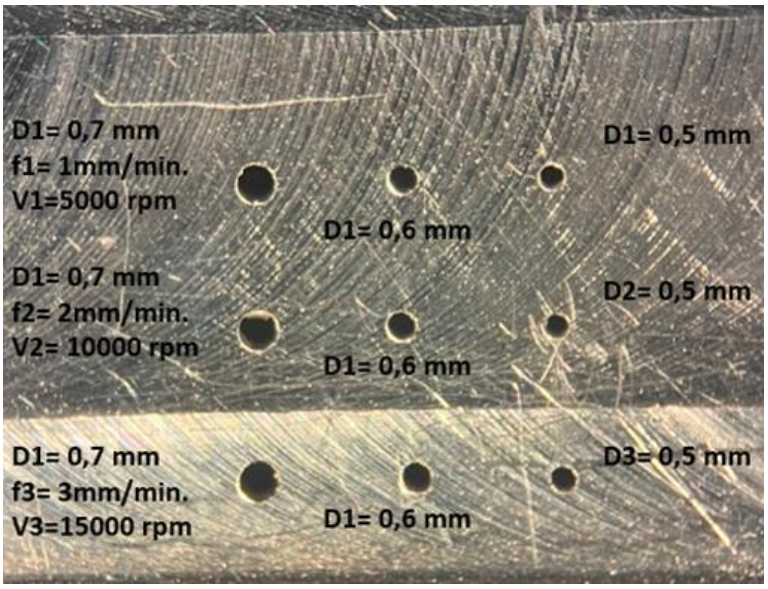
Şekil 3. 18 Dokuzuncu deney delik görüntüsü.

Dokuzuncu deneyde deney setinde kullanılan en büyük mikro matkap çapı olan 0,7 mm çap kullanılmaya devam edilmiştir. Deney maksimum ilerleme hızında ve devir sayısında gerçekleşmiştir. Ekteki görüntülerden de görülebileceği üzere kuvvetler ve delik çapında sapmalar meydana gelmiştir.



Şekil 3. 19 Titreşim ölçüm cihazı ekranından alınan ölçüm örneği.

Delme işlemi süresince matkap iş parçası üzerinde kuvvetler oluşturmaktadır. Oluşan kuvvetler dinamometre içerisinde bulunan kristaller tarafından elektriksel sinyaller olarak bir bağlantı kablosu yardımıyla kuvvet analiz programına aktarılmaktadır. Aktarılan kuvvet sonuçları yukarıdaki fotoğraftaki gibidir maksimum kuvvet ve minimum kuvvetler program vasıtasıyla analiz edilebilmektedir. Ayrıca her bir saniyede oluşan kuvvetlerin çıktısı elde edilebilmektedir. Yukarıdaki görüntüde örnek olarak bir sonuç paylaşılmıştır. Diğer deney sonuçları aşağıda bulunan tabloda yer almaktadır.



Şekil 3. 20 İş parçası üzerindeki deliklerin toplu görüntüsü.

Tablo 2. 4 Deney sonuçları tablosu.

Çap (mm)	Test Numarası	Titreşim (Hz)	Maks. X (N)	Maks. Y (N)	Maks. Z (N)	Maksimum Bileşke Kuvvet (N)	Delme Zamanı (dak)	Derinlik (mm)
0.5 mm	Test 1	188 Hz	1.12	2.07	1.06	2.58	3 min	3 mm
0.5 mm	Test 2	188 Hz	1.29	2.30	1.51	3.03	1,5 min	3 mm
0.5 mm	Test 3	234 Hz	1.19	3.23	1.22	3.65	1 min	3 mm
0.6 mm	Test 4	1750 Hz	1.08	3.29	1.19	3.66	3 min	3 mm
0.6 mm	Test 5	1969 Hz	1.13	3.20	1.65	3.77	1,5 min	3 mm
0.6 mm	Test 6	2000 Hz	1.17	3.42	1.41	3.87	1 min	3 mm
0.7 mm	Test 7	2000 Hz	1.02	4.11	1.03	4.35	3 min	3 mm
0.7 mm	Test 8	2969 Hz	2.79	4.71	2.15	5.88	1,5 min	3 mm
0.7 mm	Test 9	2969 Hz	2.10	5.67	1.40	6.20	1 min	3 mm

Tablo 2. 5 Deney sonuçları ve delik çapı kıyaslama tablosu.

Çap (mm)	Test Numarası	Titreşim (Hz)	Maks. X (N)	Maks. Y (N)	Maks. Z (N)	Maksimum Bileşke Kuvvet (N)	Matkap Çapı (mm)	Ölçülen Çap (mm)	Sapma (mm)
0.5 mm	Test 1	188 Hz	1.12	2.07	1.06	2.58	0.5	0.500	0
0.5 mm	Test 2	188 Hz	1.29	2.30	1.51	3.03	0.5	0.503	0.003
0.5 mm	Test 3	234 Hz	1.19	3.23	1.22	3.65	0.5	0.513	0.013
0.6 mm	Test 4	1750 Hz	1.08	3.29	1.19	3.66	0.6	0.600	0
0.6 mm	Test 5	1969 Hz	1.13	3.20	1.65	3.77	0.6	0.606	0.006
0.6 mm	Test 6	2000 Hz	1.17	3.42	1.41	3.87	0.6	0.636	0.036
0.7 mm	Test 7	2000 Hz	1.02	4.11	1.03	4.35	0.7	0.726	0.026
0.7 mm	Test 8	2969 Hz	2.79	4.71	2.15	5.88	0.7	0.724	0.024
0.7 mm	Test 9	2969 Hz	2.10	5.67	1.40	6.20	0.7	0.753	0.053

BÖLÜM 4 – SONUÇ VE ÖNERİLER

Tabloda görüldüğü gibi matkap çapı büyüdükçe kuvvetler ve oluşan titreşimler artmaktadır. Bu durumun ana sebebi malzeme ile temas eden yüzeyin artmasıdır. Matkabın kesici kenarları daha fazla temas sağlar. Kesici takıma etki eden kesme kuvvetleri artar. Aynı zamanda üretilen talaş miktarı kesmeyi zorlaştırır. Delikler açılırken malzemenin ısınması sünekliğe neden olabilir. Bu, talaşın matkaba yapışmasına ve kesmeyi zorlaştırmasına neden olabilir. Aynı durum titreşimin artmasına neden olacaktır. İlerleme hızı arttıkça malzeme üzerindeki basınç da artar. Aynı zamanda kuvvet ve titreşim artar. Kesilen yüzey boyutu da titreşimi doğrudan etkiler. Kesme kuvvetlerini ve titreşimi birçok faktör etkiler. Bunlardan biri kesici takım ve fikstürün rijitliğidir. Rijit olmayan bir matkap veya iş parçası, kuvvet dalgalanmalarına ve boyut farklılıklarına neden olur. Takım çapı arttığında titreşim ve kuvvetler artar. Ancak ilerleme hızına ve takım döngüsüne göre titreşimde önemli bir değişiklik olmaz. Delme denemelerinin sonuçlarına göre, titreşim, kesme hızı ve ilerleme hızı ile önemli ölçüde değişmemektedir. Tabloda görüldüğü üzere titreşim ve kesme kuvvetleri ilerleme hızından, matkap çapından ve devir sayısından etkilenmektedir. Titreşim ve kesme kuvvetleri arttıkça delik kalitesi geometriksel olarak düşmektedir. Ortaya çıkan sonuçlara göre titreşim ve kuvvetler arttıkça deliklerde oluşan ölçü sapmaları artmaktadır. En son deney üçlüsünde matkap çapı 0,7 mm iken devir ve ilerleme hızı artırıldığında en büyük titreşim ve kuvvetler görülmüştür ve sonuçlardan da görüleceği üzere delik çapı daha büyük ölçülmüştür bu sonuç işçiliğin kalitesini düşürmektedir. Bu nedenle kesme kuvvetlerine odaklanmalıyız. Kesme kuvvetlerini azaltmak için ilerleme hızı malzeme ve takım tiplerine göre ayarlanmalıdır.

Optimum ilerleme hızı, minimum kesme kuvvetleri, maksimum takım ömrü ve kalite sağlayacaktır. Ayrıca eklemeli imalat süreçleri seri üretim gibi değildir. Seri üretimde bir parçanın en hızlı şekilde üretilmesi amaçlanır. Bununla birlikte, eklemeli imalat şu anda yavaş bir süreçtir ve genellikle prototipler için kullanılır. Bu nedenle, kesme kuvvetlerini azaltmak için ilerleme hızı minimum olarak seçilebilir. Titreşim ve kesme kuvvetlerini azaltmak için de bazı çözümler vardır. Kesme sıvıları, kesme işlemi sırasında kesici takımın çıkarılmasına yardımcı olur ve ısınmayı önler. Bir sonraki çalışmada çeşitli yapay veya çevre dostu kesme sıvıları kullanılarak testler yapılabilir. Kesme sıvıları kesme işlemini kolaylaştırdığından kuvvetler azalır. Kesme kuvvetleri kesici takımın ömrünü doğrudan etkiler. Ayrıca farklı matkap malzemeleri denenebilir.

KAYNAKLAR

1. Inagaki, I., et al., *Application and features of titanium for the aerospace industry.* Nippon steel & sumitomo metal technical report, 2014. 106(106): p. 22-27.
2. Jackson, M., et al., *Titanium and titanium alloy applications in medicine*, in *Surgical Tools and Medical Devices*. 2016, Springer. p. 475-517.
3. Flynn, J.M., et al., *Hybrid additive and subtractive machine tools–Research and industrial developments.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016. 101: p. 79-101.
4. Kara, N., *Havacilikta katmanli imalat teknolojisinin kullanimi.* Engineer & the Machinery Magazine, 2013(636).
5. Pereira, T., J.V. Kennedy, and J. Potgieter, *A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job.* Procedia Manufacturing, 2019. 30: p. 11-18.
6. Hashmi, S. and I.A. Choudhury, *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. 2020: Elsevier.
7. Sürmen, H.K., *EKLEMELİ İMALAT (3B BASKI): TEKNOLOJİLER VE UYGULAMALAR.* Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 2019. 24(2): p. 373-392.
8. Wong, K.V. and A. Hernandez, *A review of additive manufacturing.* International scholarly research notices, 2012. 2012.
9. Ahn, D.-G., *Applications of laser assisted metal rapid tooling process to manufacture of molding & forming tools—state of the art.* International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2011. 12(5): p. 925-938.
10. Attaran, M., *The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing.* Business Horizons, 2017. 60(5): p. 677-688.
11. Sofu, M.M., *Hızlı direkt imalatta kullanılan seçici lazer sinterleme ve ergitme cihazının gövde tasarımı ve imalatı*. 2007, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
12. Karlsson, J., et al., *Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti–6Al–4V powder fractions.* Journal of materials processing technology, 2013. 213(12): p. 2109-2118.
13. Cansizoglu, O., *Mesh Structures with Tailored Properties and Applications in Hip Stems.* 2009.
14. Moiduddin, K., et al., *Structural and mechanical characterization of custom design cranial implant created using additive manufacturing.* Electronic Journal of Biotechnology, 2017. 29: p. 22-31.
15. Wooten, J. and D. Dennies, *Electron Beam Melting Manufacturing for Production Hardware.* SAE International, 2008.
16. Safdar, A., et al., *Evaluation of microstructural development in electron beam melted Ti-6Al-4V.* Materials Characterization, 2012. 65: p. 8-15.
17. Thijs, L., *Microstructure and Texture of Metal Parts Produced by Selective Laser Melting (Microstructuur en textuur van metalen stukken geproduceerd via selectief laser smelten).* 2014.
18. Kaynak, Y. and O. Kitay, *The effect of post-processing operations on surface characteristics of 316L stainless steel produced by selective laser melting.* Additive Manufacturing, 2019. 26: p. 84-93.
19. Bourell, D., et al., *Materials for additive manufacturing.* CIRP annals, 2017. 66(2): p. 659-681.

20. Kıran, K., *Seçici lazer ergitme ile üretilmiş 316l paslanmaz çelik parçaların ince tornalama işlemleri*. 2011, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
21. Yalçın, B. and B. Ergene, *Endüstride yeni eğilim olan 3-d eklemeli imalat yöntemi ve metalurjisi.* Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 2017. 9(3): p. 65-88.
22. Herzog, D., et al., *Additive manufacturing of metals.* Acta Materialia, 2016. 117: p. 371-392.
23. Duman, B. and M.C. Kayacan, *Doğrudan metal lazer sinterleme/ergitme yöntemi ile imal edilecek parçanın mekanik özelliklerinin tahmini.* Teknik Bilimler Dergisi, 2017. 7(1): p. 12-28.
24. Kayacan, M.Y. and N. YILMAZ, *DMLS eklemeli imalatta süreç ve maliyet modeli geliştirilmesi.* Politeknik Dergisi, 2019. 22(3): p. 763-770.
25. Frazier, W.E., *Metal additive manufacturing: a review.* Journal of Materials Engineering and performance, 2014. 23(6): p. 1917-1928.
26. Murr, L.E., et al., *Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies.* Journal of Materials Science & Technology, 2012. 28(1): p. 1-14.
27. Körner, C., *Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting—a review.* International Materials Reviews, 2016. 61(5): p. 361-377.
28. Liu, S. and Y.C. Shin, *Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review.* Materials & Design, 2019. 164: p. 107552.
29. Lewandowski, J.J. and M. Seifi, *Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties.* Annual review of materials research, 2016. 46: p. 151-186.
30. Kok, Y., et al., *Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review.* Materials & Design, 2018. 139: p. 565-586.
31. Li, H., X. Wu, and G. Li, *Prediction of forming limit diagrams for 22MnB5 in hot stamping process.* Journal of materials engineering and performance, 2013. 22(8): p. 2131-2140.
32. Liu, S., *Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy/Liu, YC Shin.* A review, Mater, 2018. 107552.
33. Pauzon, C.N.G., *Tailored process gases for laser powder bed fusion*. 2021: Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden).
34. Carroll, B.E., T.A. Palmer, and A.M. Beese, *Anisotropic tensile behavior of Ti–6Al–4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing.* Acta Materialia, 2015. 87: p. 309-320.
35. Wolff, S., et al., *Anisotropic properties of directed energy deposition (DED)-processed Ti–6Al–4V.* Journal of Manufacturing Processes, 2016. 24: p. 397-405.
36. Wysocki, B., et al., *Laser and electron beam additive manufacturing methods of fabricating titanium bone implants.* Applied Sciences, 2017. 7(7): p. 657.
37. Edwards, P., A. O'conner, and M. Ramulu, *Electron beam additive manufacturing of titanium components: properties and performance.* Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2013. 135(6).
38. Geiger, M., et al., *Microforming.* CIRP annals, 2001. 50(2): p. 445-462.
39. Vollertsen, F., H.S. Niehoff, and Z. Hu, *State of the art in micro forming.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006. 46(11): p. 1172-1179.
40. Ucun, İ., K. Aslantaş, and F. Bedir. *Kesici Takım Kaplama Malzemesinin Mikro Frezeleme İşleminde Takım Elastik Deformasyonu Üzerindeki Etkisi [The Effect*

of Cutting Tool Coating Material on Tool Elastic Deformation in Micro Milling]. in *Proceedings of 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*. 2011.
41. Çiçek, A., *İmalat alanında yaygın olarak kullanılan mikro işleme teknikleri.* Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2011. 15(1): p. 46-59.
42. Heinemann, R., et al., *The performance of small diameter twist drills in deep-hole drilling.* 2006.
43. Tansel, I., et al., *Micro-end-milling—I. Wear and breakage.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998. 38(12): p. 1419-1436.
44. Yang, Z., Q. Tan, and L. Wang, *Principle of precision micro-drilling with axial vibration of low frequency.* International journal of production research, 2002. 40(6): p. 1421-1427.
45. Hasan, M., J. Zhao, and Z. Jiang, *A review of modern advancements in micro drilling techniques.* Journal of Manufacturing Processes, 2017. 29: p. 343-375.
46. Okasha, M., et al., *Sequential laser and mechanical micro-drilling of Ni superalloy for aerospace application.* CIRP annals, 2010. 59(1): p. 199-202.
47. Yazid, M., et al., *Tool Wear when Finish Turning Inconel 718 under Dry Conditions.* International Journal of Science Engineering and Technology, 2009. 2(3): p. 53-57.
48. Sharif, S., E. Rahim, and H. Sasahara, *Machinability of titanium alloys in drilling.* Titanium Alloys-Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications, 2012. 3: p. 117-137.
49. Astakhov, V.P., *Geometry of single-point turning tools and drills: fundamentals and practical applications*. 2010: Springer Science & Business Media.
50. Bhandari, B., et al., *Development of a micro-drilling burr-control chart for PCB drilling.* Precision Engineering, 2014. 38(1): p. 221-229.
51. Bahçe, E., E. Kılıçkap, and C. Özel, *Al-5005" in Delinmesinde Delme Parametrelerinin Çapak Oluşumuna Etkisinin Araştırılması. 2.* Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, 2010: p. 242-250.
52. Kıvak, T., *Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin Tİ-6AL-4V alaşımının delinebilirliği üzerindeki etkilerinin araştırılması.* Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 2012.
53. Cantero, J., et al., *Dry drilling of alloy Ti–6Al–4V.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005. 45(11): p. 1246-1255.
54. Balaji, M., et al., *Optimization of drilling parameters for drilling of TI-6Al-4V based on surface roughness, flank wear and drill vibration.* Measurement, 2018. 114: p. 332-339.
55. Parus, A., et al., *Active vibration control in milling flexible workpieces.* Journal of Vibration and Control, 2013. 19(7): p. 1103-1120.
56. Motorcu, A.R., A. Kuş, and I. Durgun, *The evaluation of the effects of control factors on surface roughness in the drilling of Waspaloy superalloy.* Measurement, 2014. 58: p. 394-408.
57. Freyer, B.H., N.J. Theron, and P.S. Heyns, *Simulation of tool vibration control in turning, using a self-sensing actuator.* Journal of Vibration and Control, 2008. 14(7): p. 999-1019.
58. Rothberg, S. and J. Bell, *On the application of laser vibrometry to translational and rotational vibration measurements on rotating shafts.* Measurement, 2004. 35(2): p. 201-210.
59. Prasad, B.S., M. Sarcar, and B.S. Ben, *Surface textural analysis using acousto optic emission-and vision-based 3D surface topography—a base for online tool*

condition monitoring in face turning. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011. 55(9-12): p. 1025-1035.
60. Rao, K.V., B. Murthy, and N.M. Rao, *Cutting tool condition monitoring by analyzing surface roughness, work piece vibration and volume of metal removed for AISI 1040 steel in boring.* Measurement, 2013. 46(10): p. 4075-4084.
61. Sharif, S. and E. Rahim, *Performance of coated-and uncoated-carbide tools when drilling titanium alloy—Ti–6Al4V.* Journal of materials processing technology, 2007. 185(1-3): p. 72-76.
62. Chen, Y. and Y. Liao, *Study on wear mechanisms in drilling of Inconel 718 superalloy.* Journal of Materials Processing Technology, 2003. 140(1-3): p. 269-273.
63. Zhaojun, Y., et al., *Study for increasing micro-drill reliability by vibrating drilling.* Reliability engineering & system safety, 1998. 61(3): p. 229-233.
64. Hong, S.Y. and Y. Ding, *Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001. 41(10): p. 1417-1437.
65. Carrilero, M., et al., *A SEM and EDS insight into the BUL and BUE differences in the turning processes of AA2024 Al–Cu alloy.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002. 42(2): p. 215-220.
66. Venugopal, K., S. Paul, and A. Chattopadhyay, *Tool wear in cryogenic turning of Ti-6Al-4V alloy.* Cryogenics, 2007. 47(1): p. 12-18.
67. Bermingham, M., et al., *New observations on tool life, cutting forces and chip morphology in cryogenic machining Ti-6Al-4V.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011. 51(6): p. 500-511.
68. Kudla, L., *Deformations and strength of miniature drills.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2006. 220(3): p. 389-396.
69. Heinemann, R., et al., *Effect of MQL on the tool life of small twist drills in deep-hole drilling.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006. 46(1): p. 1-6.
70. Meetham, G., *The Development of Gas Turbines*. 1981: Springer.
71. Donachie, M.J., *Titanium.* A technical guide, 2000. 2: p. 5-123.
72. ÖKMEN, H. and E. Ümit, *Ti6Al4V ALAŞIMINDA ESNEK HONLAMA VE SİLİNDİRİK PARLATMA İŞLEMLERİNİN DELİK YÜZEY ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ.* Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2020. 28(2): p. 128-135.
73. Hong, S.Y., I. Markus, and W.-c. Jeong, *New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V.* International journal of machine tools and manufacture, 2001. 41(15): p. 2245-2260.
74. Bonaiti, G., et al., *Micro-milling machinability of DED additive titanium Ti-6Al-4V.* Procedia Manufacturing, 2017. 10: p. 497-509.
75. Bordin, A., et al., *Feasibility of Cryogenic Cooling in Finishing Turning of Acetabular Cups Made of Additive Manufactured Ti6Al4 V.* Procedia CIRP, 2016. 46: p. 615-618.
76. Sartori, S., et al., *On the tool wear mechanisms in dry and cryogenic turning Additive Manufactured titanium alloys.* Tribology International, 2017. 105: p. 264-273.
77. Gong, Y. and P. Li, *Analysis of tool wear performance and surface quality in post milling of additive manufactured 316L stainless steel.* Journal of Mechanical Science & Technology, 2019. 33(5).

78. Bruschi, S., et al., *Environmentally clean micromilling of electron beam melted Ti6Al4V*. Journal of Cleaner Production, 2016. 133: p. 932-941.
79. Rysava, Z., et al., *Micro-drilling and threading of the ti6al4 v titanium alloy produced through additive manufacturing.* Procedia CIRP, 2016. 46: p. 583-586.
80. Ming, W., et al., *Chip formation and hole quality in dry drilling additive manufactured Ti6Al4V*. Materials and Manufacturing Processes, 2020. 35(1): p. 43-51.
81. Yıldız, H., *Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin delik üzerine ve kesici takıma etkisinin araştırılması*. 2015, Batman Üniversitesi.
82. Gültekin, U., S.A. Yaşar, and İ. Korkut, *Ti-6Al-4V Alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine ve delik kalitesine etkisinin incelenmesi.* Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 2017. 7(2): p. 469-475.
83. Çiftçi, İ. and H. Gökçe, *Ti6Al4V Titanyum alaşımının delinmesinde delme yönteminin aşınmaya etkisinin incelenmesi.* Politeknik Dergisi, 2019. 22(3): p. 627-631.
84. Nam, J. and S.W. Lee, *Machinability of titanium alloy (Ti-6Al-4V) in environmentally-friendly micro-drilling process with nanofluid minimum quantity lubrication using nanodiamond particles*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2018. 5(1): p. 29-35.
85. Perçin, M., et al., *Micro-drilling of Ti–6Al–4V alloy: The effects of cooling/lubricating.* Precision engineering, 2016. 45: p. 450-462.
86. Zhu, Z., et al., *Evaluation of novel tool geometries in dry drilling aluminium 2024-T351/titanium Ti6Al4V stack.* Journal of Materials Processing Technology, 2018. 259: p. 270-281.
87. Dang, J., et al., *Experimental investigation on machinability of DMLS Ti6Al4V under dry drilling process.* Materials and Manufacturing Processes, 2019. 34(7): p. 749-758.
88. Yiğit, C., *Ti6al4v malzemesinin farklı geometrideki matkaplarla delinmesi esnasında matkap sıcaklığının incelenmesi*. 2020, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
89. Bıçakcı, N., *Ti6Al4V titanyum alaşımının delinebilirliğinin araştırılması.* Karabük Üniversitesi, 2015.
90. Parida, A.K., *Simulation and experimental investigation of drilling of Ti-6Al-4V alloy*. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2018. 1(3): p. 197-205.
91. YAĞMUR, S. and P. Muharrem, *Ti-6Al-4V Titanyum Alaşımının Delinmesinde Ön Delik Uygulamasının İşlenebilirliğe Etkisinin İncelenmesi.* International Journal of Engineering Research and Development, 2021. 13(1): p. 170-177.
92. Waqar, S., et al. *Effect of drilling parameters on hole quality of Ti-6Al-4V titanium alloy in dry drilling*. in *Materials science forum*. 2017. Trans Tech Publ.
93. Karabulut, Y. and Y. Kaynak, *Drilling process and resulting surface properties of Inconel 718 alloy fabricated by Selective Laser Melting Additive Manufacturing.* Procedia CIRP, 2020. 87: p. 355-359.
94. Köklü, U., *Değişik şekillerde aralıklı (Kesikli) yüzeylerin, taşlanmasında oluşan şekil hatalarının Deneysel Incelenmesi*. 2009, Marmara Universitesi (Turkey).

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Sertaç ACER

Eğitim Bilgileri:

Derece	Alan	Üniversite	Yıl
Lise	Makine Teknolojileri	İsmet Aktar Teknik Lisesi	2009-2013
Lisans	Makine Mühendisliği	Marmara Üniversitesi	2015-2019
Yüksek Lisans	Makine Mühendisliği	Marmara Üniversitesi	2019-Devam

İş Tecrübeleri:

Sıralama	Pozisyon	Şirket	Yıl
1.	Makine Mühendisi	BSH Ev Aletleri	2020- Devam