**MARMARA ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# EKSTRÜZYON İLE İMAL EDİLMİŞ ISIL İŞLEM UYGULANMIŞ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARDAN AA2024'ÜN KADEMELENDİRME FORMUNUN GERİ YAYLANMA HESAPLARININ SAYISAL VE DENEYSEL YOLLA BELİRLENMESİ

SEDAT IŞIK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Mühendisliği Programı

**DANIŞMAN**

Dr. Öğr. Üyesi Oğuz GİRİT

İSTANBUL, 2022

**MARMARA ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# EKSTRÜZYON İLE İMAL EDİLMİŞ ISIL İŞLEM UYGULANMIŞ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARDAN AA2024'ÜN KADEMELENDİRME FORMUNUN GERİ YAYLANMA HESAPLARININ SAYISAL VE DENEYSEL YOLLA BELİRLENMESİ

SEDAT IŞIK

(523217045)

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Mühendisliği Programı

**DANIŞMAN**

Dr. Öğr. Üyesi Oğuz GİRİT

İSTANBUL, 2022

**TEŞEKKÜR**

Yüksek Lisans tez çalışmam süresince desteğini esirmeyen ve değerli bilgilerini paylaşan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Oğuz GİRİT'e teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresi boyunca çeşitli imkanlar sunarak tezimin sonuçlanmasını sağlayan TUSAŞ'a(Türk Havacılık ve Uzay Sanayi) teşekkür ederim. Ayrıca çalışmam boyunca tecrübelerini paylaşan ve danışmanlık yapan çalışma arkadaşım Emre EROL'a, tez konumun olgunlaşmasını sağlayan, gerekli materyallerin temini için yardımlarını esirgemeyen ve tecrübelerini paylaşan çalışma arkadaşım Hakan AYDIN'a ve TUSAŞ Takım Tasarım Mühendisliği bölümündeki arkadaşlarıma desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecimde kendisine ayıracağım zamandan fedakârlık ettiğim, beni sürekli destekleyen ve motive eden sevgili eşim Zübeyde IŞIK'a teşekkürlerimi sunarım.

Bugüne kadar eğitim hayatımda yol gösterici olan ve desteklerini esirgemeyen değerli babam Ahmet IŞIK'a ve annem Zeynep IŞIK'a teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

**TEŞEKKÜR** ..... **İ**

**İÇİNDEKİLER** ..... **İİ**

**ÖZET** ..... **İV**

**ABSTRACT** ..... **V**

**SEMBOLLER** ..... **Vİ**

**KISALTMALAR** ..... **Vİİİ**

**ŞEKİLLER** ..... **İX**

**TABLOLAR** ..... **Xİİ**

**1. GİRİŞ** ..... **1**

**1.1 Tezin Amacı** ..... **2**

**1.2 Kademeli Parçaların Hava Araçlarında Kullanıldığı Yerler** ..... **3**

**1.3 Kalıp ile Kademe(joggle) Formu Verme İşlemi** ..... **6**

**1.4 Alüminyum Alaşım Çeşitleri ve Özellikleri** ..... **9**

1.4.1 AA2024 Alaşımı ..... 12

1.4.2 AA7075 Alaşımı ..... 13

**1.5 Literatür Araştırması** ..... **14**

**2. METOT VE YÖNTEM** ..... **16**

**2.1 Deneysel Yöntem** ..... **16**

2.1.1 Kalıp tasarımı ve kalıp elemanları ..... 17

2.1.2 Deneysel çalışmanın yapıldığı tezgahın yapısı ve özellikleri ..... 18

2.1.3 Deney düzeneğinin kurulumu ve yapılışı ..... 19

**2.2 Sayısal Yöntem ..... 23**

2.2.1 Çekme testi ..... 23

2.2.2 Çekme testi sonuçları ..... 25

2.2.3 Sonlu elemanlar yöntemi ..... 27

2.2.4 Ağ yapısı ve eleman tipinin modellenmesi ..... 28

2.2.5 Malzeme modellerinin tanımlanması ..... 29

2.2.6 Analiz sınır şartları ve temas yüzeyleri ..... 33

**3. BULGULAR VE TARTIŞMA ..... 35**

**3.1 Deney Sonuçları ..... 35**

**3.2 Sayısal Yöntem Sonuçları ..... 38**

**4. SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 41**

**4.1 Sonuçlar ..... 41**

**4.2 Öneriler ..... 42**

**KAYNAKLAR ..... 43**

**ÖZGEÇMİŞ**

## ÖZET

## EKSTRÜZYON İLE İMAL EDİLMİŞ ISIL İŞLEM UYGULANMIŞ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARDAN AA2024'ÜN KADEMELENDİRME FORMUNUN GERİ YAYLANMA HESAPLARININ SAYISAL VE DENEYSEL YOLLA BELİRLENMESİ

Bu çalışmada ekstrüzyon yöntemi ile imal edilmiş olan alüminyum alaşımlardan 2024-T3 ve 7075-T6'ya kalıp ile kademe formu verilirken oluşan geri yaylanma miktarları deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır. Öncelikle uçak parçalarındaki kademe formu standartları incelenmiş ve genellikle tercih edilen kademe oranları belirlenmiştir. Kademe oranı uzunluğun derinliğe oranı ile hesaplanmaktadır. Uzunluğunun derinliğe oranı 3, 5 ve 6 olan kademe formlarının çokça kullanıldığı görülmüştür.

Çalışmamda havacılık standartlarına uygun, kademe oranı 3, 5 ve 6 olan ekstrüzyon uçak parçası tasarlanıp bu parçalara kademe formu vermek için uygun kalıp tasarımları yapılmıştır. Belirlenen değişkenler ile parçalara kademe formu verilmiş ve ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırılmış ve verilerin kontrolü sağlanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi için Pam-stamp analiz programı kullanılarak ekstrüzyon yöntemi ile imal edilmiş olan parçalar için analiz modellemesi sağlanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde bazı geri yaylanma değerlerinin ölçü toleranslarının dışında kaldığı görülmüştür. AA7075-T6'daki geri yaylanmanın AA2024-T3'e göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kalınlık arttıkça ve kademe oranı büyüdükçe geri yaylanmanın arttığı tespit edilmiştir. Kademe formu verilirken soğuk şekillendirme yönteminde sıcak şekillendirme yöntemine göre daha fazla geri yaylanma olduğu görülmüştür.

Bu çalışma sayesinde geri yaylanma değerleri ile ilgili veriler kullanılarak ve Pam-stamp analiz programında çözümleme yaparak geri yaylanma değerleri önceden tahmin edilmiştir. Bu tezin sonucunda kalıbı tekrar işleme maliyeti düşürülmüş, kalıp hurda miktarı ve uçak parçası hurda miktarları azaltılmıştır.

**ABSTRACT**

**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE SPRING BACK CALCULATION JOGGLE FORM OF AA2024 ALUMINUM ALLOY TO APPLIED HEAT TREATMENT PRODUCED BY EXTRUSION**

In this study, the springback values that occur while the aluminum alloys 2024-T3 and 7075-T6 which are produced by the extrusion method while given the joggle form with the mold were investigated by experimental and finite element method. First of all, joggle form parts were researched standards in aircraft and joggle ratios were determined generally preferred. The joggle ratio is calculated by the ratio of length to depth. It has been seen that joggle forms with a length to depth ratio of 3, 5 and 6 are used widely.

In my study, extruded aircraft part was designed with joggle ratio of 3, 5 and 6 in accordance aviation standards and conforming mold designs were made to give joggle form to these parts. Joggle form was given the parts with the predetermined variables and they measured. The obtained results were compared with the finite element analysis and the data were checked. For the finite element method, analysis modeling was made for the parts manufactured by the extrusion method with the Pam-stamp analysis program. When the results were inspected, some springback values were out of tolerances. The springback in AA7075-T6 was higher than in AA2024-T3 according this study. In addition, it was determined that the springback increased as the thickness increased and the joggle ratio increased. There was more springback in the cold forming method than in the hot forming method.

Thanks to this study, the springback values were predicted by using the data results and analyzing in the Pam-stamp analysis program. As a result of this thesis, the cost of reworking the mold was reduced, the amount of mold scrap and aircraft of part scraps were reduced.

**SEMBOLLER**

| | |
|---|---|
| **"** | **:** inç |
| **°C** | Derece Santigrat |
| **AA** | **:** Alüminyum alaşım |
| **AAO** | **:** Alüminyum oksit |
| **cm** | **:** Santimetre |
| **Cr** | **:** Krom |
| **Cu** | **:** Bakır |
| **D** | **:** Derinlik |
| **Fe** | **:** Demir |
| **g** | **:** Gram |
| **GPa** | **:** Gigapaskal |
| **$H_2O$** | **:** Su |
| **K** | **:** Dayanım katsayısı |
| **kg** | **:** Kilogram |
| **km** | **:** Kilometre |
| **L** | **:** Uzunluk |
| **Li** | **:** Lityum |
| **m** | **:** Metre |
| **mm** | **:** Mili Metre |
| **Mg** | **:** Magnezyum |
| **Ml** | **:** Mililitre |
| **Mn** | **:** Manganez |
| **Mol** | **:** Mol |

**MPa** **:** Megapaskal

**N** **:** Newton

**n** **:** Pekleşme üsteli

**R** **:** Yarı çap

**O2** **:** Oksijen

**OH** **:** Hidroksit

**Pa** **:** Paskal

**T** **:**Sac kalınlığı

**ε** **:** Mühendislik gerinimi

$\varepsilon_g$ **:** Gerçek gerinim

**μ** **:**Sürtünme katsayısı

**ρ** **:**Öz kütle

$\boldsymbol{\sigma_g}$ **:**Gerçek gerilim

$\boldsymbol{\sigma}$ **:** Mühendislik gerilimi

**ν** **:**Poisson oranı

**KISALTMALAR**

**AND** : Army Navy Drawing Extrusions

**AMS** : Aerospace Materials Specifications

**ASTM** : American Society for Testing and Materials

**BAC** : Boeing Airplane Company

**CAE** : Computer Analaysis Engineering

**IGS** : International GNSS Service

**TUSAŞ** : Türk Havacılık ve Uzay Sanayi

## ŞEKİLLER

**Şekil 1.1** Uçak yapısal parçaları[24] ..... 3

**Şekil 1.2** Jet motorlu hava aracının bölümleri ..... 4

**Şekil 1.3** Pervaneli hava aracının bölümleri ..... 4

**Şekil 1.4** Uçağa etki eden kuvvetler[2] ..... 4

**Şekil 1.5** Kanat içerisindeki yapısal parçalar ..... 5

**Şekil 1.6** Kuyruk bölümündeki yapısal parçalar[24] ..... 6

**Şekil 1.7** Sac malzemelerin kademe yapısı ..... 7

**Şekil 1.8** Birden fazla parçanın bağlayıcı elemanlar ile kademe bölgelerinde birleşimi .. 7

**Şekil 1.9** Kademe formunun tasarım tanımları[26] ..... 8

**Şekil 1.10** Kademe formu veren kalıp örnekleri[26] ..... 8

**Şekil 1.11** Hidrolik pres tezgahı ..... 9

**Şekil 2.1** L kesitli deney numunesinin teknik resim gösterimi[29] ..... 16

**Şekil 2.2** L kesitli malzemenin ölçüleri[29] ..... 16

**Şekil 2.3** Catia V5 programında tasarlanmış olan deney kalıbı ..... 17

**Şekil 2.4** TUSAŞ tesislerinde üretilmiş olan deney kalıbının önden görüntüsü ..... 18

**Şekil 2.5** TUSAŞ tesislerinde üretilmiş olan deney kalıbının üstten görüntüsü ..... 18

**Şekil 2.6** Deney için kullanılan pres tezgahı ..... 18

**Şekil 2.7** Gruplara ayrılmış ve etiketlenmiş olan deney numuneleri ..... 20

**Şekil 2.8** Kalıbın tezgaha bağlanması ve numunelerin kalıba yerleştirilmesi ..... 20

**Şekil 2.9** Soğuk Şekillendirilmiş olan numuneler ..... 20

**Şekil 2.10** Uçak parçalarının ısıtıldığı fırın ..... 21

**Şekil 2.11** Kalıbın rezistanslar ile ısıtılması ..... 21

**Şekil 2.12** Deney numunelerinin ölçüm düzeneği ..... 22

**Şekil 2.13** Yüzeyler arası derinlik farkının ölçümü ..... 22

**Şekil 2.14** Çekme Numunesi teknik ölçüleri..... 24

**Şekil 2.15** Çekme testinde kullanılan AA7075-T6 ve AA2024-T3 test numuneleri..... 24

**Şekil 2.16** Çekme testi sonucu oluşan AA7075-T6'ya ait gerilme-gerinim diyagramı . 25

**Şekil 2.17** Çekme testi sonucu oluşan AA2024-T3'e ait gerilme-gerinim diyagramı ... 26

**Şekil 2.18** Elemanların görsel yapısı ..... 27

**Şekil 2.19** Analiz için kullanılacak olan analiz yüzeyleri..... 28

**Şekil 2.20** Pam-stamp programında oluşturulan ağ yapısı..... 29

**Şekil 2.21** SP1-AA2024-T3'ün gerçek gerinim gerilme grafiği ..... 30

**Şekil 2.22** SP1-AA2024-T3'ün logaritmik skalada gerinim gerilme grafiği..... 31

**Şekil 2.23** SP1-AA7075-T6'nın gerçek gerinim gerilme grafiği ..... 31

**Şekil 2.24** SP1-AA7075-T6 'nın logaritmik skalada gerinim gerilme grafiği ..... 31

**Şekil 2.25** AA7075-T6 malzemesinin K ve n değerlerinin programa girilmesi ..... 32

**Şekil 2.26** AA2024-T3 malzemesinin K ve n değerlerinin programa girilmesi ..... 33

**Şekil 2.27** Temas yüzeyleri ..... 34

**Şekil 2.28** Dişi kalıba hareket tanımlanması..... 34

**Şekil 3.1** 25°C'de Kalınlık 1.6 mm için L/D'nin geri yaylanmaya etkisi-AA7075-T6.. 36

**Şekil 3.2** 25°C'de L/D=5 için kalınlığın geri yaylanmaya etkisi-AA7075-T6 ..... 36

**Şekil 3.3** L/D=5 ve kalınlık 1.6 mm için sıcaklığın geri yaylanmaya etkisi-AA7075-T6 ..... 36

**Şekil 3.4** 25°C'de kalınlık=1.6 mm için L/D'nin geri yaylanmaya etkisi-AA2024-T3 . 37

**Şekil 3.5** 25°C'de L/D=5 için kalınlığın geri yaylanmaya etkisi-AA2024-T3 ..... 37

**Şekil 3.6** L/D=5 ve kalınlık=1.6 mm için sıcaklığın geri yaylanmaya etkisi-AA2024-T3 ..... 37

**Şekil 3.7** Analiz programı Pam-stamp ile şekillendirilmiş kalınlık 1.6 mm L/D=5 AA7075-T6 numunesi..... 38

**Şekil 3.8** Analiz programı Pam-stamp ile geri yaylanma değeri hesaplanmış olan kalınlık 1.6 mm ve L/D=5 AA7075-T6 numunesi ..... 38

**Şekil 3.9** Analiz programı Pam-stamp ile geri yaylanma değeri hesaplanmış olan kalınlık 1.6 mm ve L/D=5 AA2024-T3 numunesi ..... 38

**Şekil 3.10** AA7075-T6 için analiz ve deney sonuçları grafiği ..... 40

**Şekil 3.12** AA2024-T3 için analiz ve deney sonuçları grafiği ..... 40

## TABLOLAR

**Tablo 1.1** Saf Alüminyumun özellikleri[9] ..... 10

**Tablo 1.2** AA2024'ün kimyasal bileşenleri[11,15] ..... 12

**Tablo 1.3** AA2024-T3'ün mekanik özellikleri[12] ..... 12

**Tablo 1.4** AA7075'in kimyasal bileşenleri ..... 13

**Tablo 1.5** AA7075-T6'nın mekanik özellikleri ..... 13

**Tablo 2.1** AA2024-T3 Malzemesinin Deney Gruplanması ..... 19

**Tablo 2.2** AA7075-T6 Malzemesinin Deney Gruplanması ..... 19

**Tablo 2.3** Çekme Numunesi ölçü değerleri[27] ..... 24

**Tablo 2.4** AA7075-T6'ya ait çekme testlerinin sonuçları ..... 25

**Tablo 2.5** AA2024-T3'e ait çekme testlerinin sonuçları ..... 26

**Tablo 2.6** Sayısal analiz değişkenleri ..... 33

**Tablo 3.1** AA2024-T3 malzemesinin deney sonucu oluşan geri yaylanma değerleri ... 35

**Tablo 3.2** AA7075-T6 malzemesinin deney sonucu oluşan geri yaylanma değerleri ... 35

**Tablo 3.3** Analiz programı Pam-stamp ile geri yaylanma değeri hesaplanmış olan AA7075-T6 numunelerinin değerleri ..... 39

**Tablo 3.4** Analiz programı Pam-stamp ile geri yaylanma değeri hesaplanmış olan AA2024-T3 numunelerin değerleri ..... 39

**Tablo 3.5** AA7075-T6 için analiz ve deney karşılaştırma tablosu ..... 39

**Tablo 3.6** AA2024-T3 için analiz ve deney karşılaştırma tablosu ..... 40

# 1. GİRİŞ

Hava araçlarının çoğunluğunu uçak, jet ve helikopter oluşturmaktadır. Hava araçlarının istenilen performansta ve verimlilikte görevini yürütebilmesi için yer çekimi kuvvetine en az direnç göstermesi gerekmektedir, en az direnci gösterebilmesi içinde hafif olması gerekir. Hava araçları bu şartı sağlarken en önemli kriteri olan güvenlikten ödün vermemesi gerekmektedir.

Havacılık endüstrisinde kullanılan malzemelerin %50'sini kompozit %20'sini alüminyum alaşımlar %15'ini titanyum %10'nunu çelik %5'inide diğer metaller oluşturmaktadır[1]. Alüminyumları haddeleme yöntemi ile üretilmiş sac metaller, ekstrüzyon ile üretilmiş sac metaller ve döküm yöntemi üretilmiş metallerden oluşmaktadır.

Gelişen teknoloji ile daha hafif alaşımlar ve kompozit yapılar keşfedilmektedir. Hava araçlarında kullanılan malzemelerin yoğunluk değerleri alüminyum 2.7 gr/cm³, titanyum 4.5 gr/cm³, çelik 7.8 gr/cm³, kompozit malzemeler 1.4-1.8 gr/cm³'tür[7].

Bu malzemelerin yoğunluk değerleri ele alındığında hava aracı isterlerini karşılaması için en çok alüminyum alaşımlar ve giderek gelişmekte olan kompozit yapıların kullanılması yaygınlaşmaktadır.

Hava aracına ait olan bütün metalleri şekillendirmek için çeşitli form kalıpları (gerdirme kalıpları, sıvama kalıpları, erkek dişi kalıplar, bükme kalıpları) kullanılmaktadır. Sac malzemelerin şekillendirilmesi esnasında metallerin içyapılarında oluşan gerilmelerden dolayı kararlı oldukları forma dönmek istemektedirler, buda sac malzemelerin istenilen formda kalmasını zorlaştırmaktadır.

Sac metallerin geri yaylanma özelliği form verme işlemini oldukça karmaşık ve zor kılmaktadır. Form verme işlemi malzemenin plastik deformasyon limitinde gerçekleşse de bir miktar geri yaylanma olmaktadır. Üzerine kuvvet uygulanan malzemenin üzerindeki kuvvet etkisi kalktıktan sonra elastik özellik göstererek uygulanan kuvvet yönüne ters yönde hareket etmesine geri esneme veya geri yaylanma denir [6].

## 1.1 Tezin Amacı

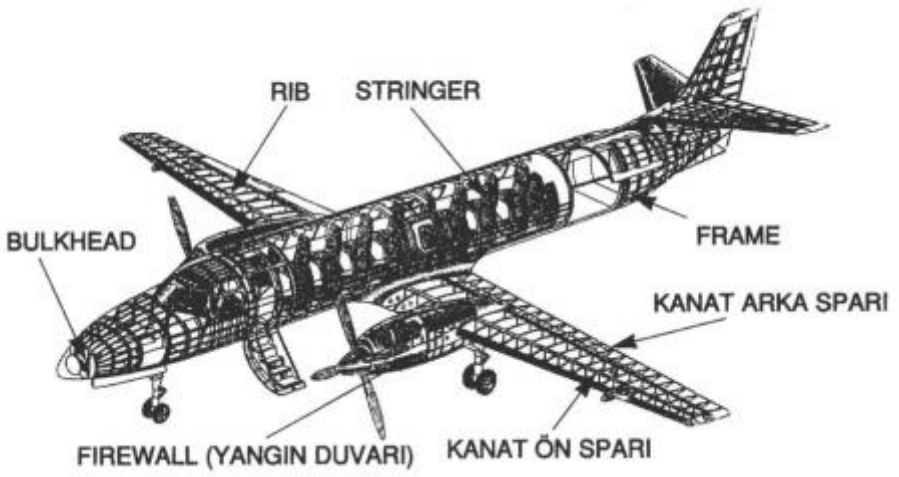
Ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiş alüminyum alaşımlı sac metallerin geri esnemesi çalışmamın temel konusunu oluşturmaktadır. Ekstrüzyon ile üretilmiş alüminyum alaşımlı sac malzemelere kademe (joggle) formunu verirken oluşan geri yaylanma değerlerini belirlemek hedeflenmiştir.

Ekstrüzyon ile imal edilmiş alüminyum alaşımlar uçaklarda oldukça çok kullanılan yapısal elemanların büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır. Kademe yapılarının parçalara verilmesinin ana sebebi, hava araçlarında birleştirme yöntemi olarak bağlayıcı elemanlar ile birleştirme yönteminin kullanılmasıdır. Bu yapısal elemanlara kademe formu verilirken geri yaylanmadan dolayı belirtilen ölçü toleranslarının dışına çıkan parçalar işçilik ve zaman kayıplarına yol açmaktadır.

Sac malzemeye kademe formu verildikten sonra eğer kademelendirme istenilen tolerans da değilse muayene işleminden geri dönerek uygun toleranslarda kademelendirilmenin yapılması isteniyor. Kalıp yeni bir işlemden geçtikten sonra parçaya tekrar bir form verme yapılabiliyorsa var olan kiriş kullanılıyor, yapılamıyor ise kiriş ıskarta edilip yeni bir kiriş ile değerler sağlanacak şekilde kademelendirme formu veriliyor. Bu gibi durumlarda kalıbın tekrar işlenmesi, parçaların tekrar temin edilmesi, oluşan ıskarta parçalar maliyeti arttırmaktadır.

Bu çalışma ekstrüzyon ile imal edilmiş alüminyum alaşımlara kalıpla şekillendirme yöntemi ile kademe formu verilirken oluşacak olan geri yaylanma miktarını kalıp tasarımına başlamadan önce hesaplayabilmek. Uygun kalıp tasarımını gerçekleştirerek tek seferde doğru parça üretimini sağlayıp Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş'nin (TUSAŞ) şekillendirme takımları tasarım mühendisliği bölümünün teknik bilgi ihtiyacını karşılamayı ve kalıbı tekrar işleme maliyetini azaltmayı amaçlamıştır.

## 1.2 Kademeli Parçaların Hava Araçlarında Kullanıldığı Yerler

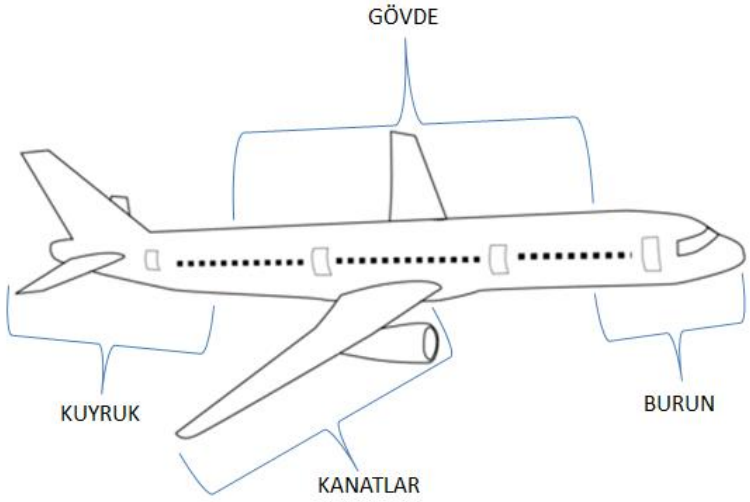



**Şekil 1.1** Uçak yapısal parçaları[24]

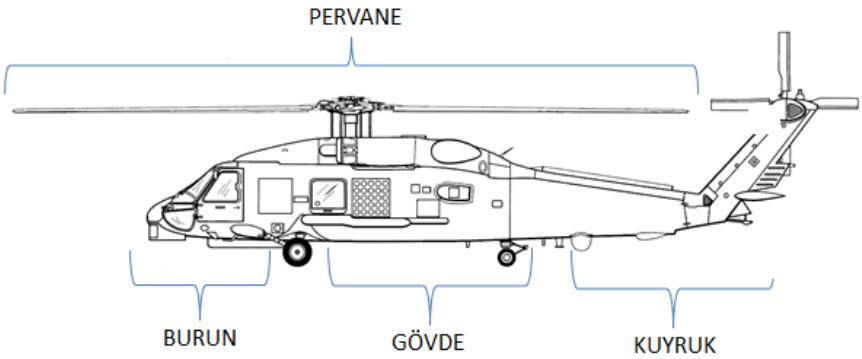
Hava araçlarında metaller birbirine bağlayıcı elemanlar ile birleştirilir. Kademelendirme işlemi iki veya daha fazla uçak parçasını birleştirebilmek için kullanılmaktadır. Kademelendirme işlemi çoğunlukla hava aracında yük taşıyıcı eleman olan kirişlere(stringer) ve yapısal parçalara uygulanmaktadır. Ekstrüzyon yöntemi ile imal edilmiş, uçak yapısal elemanı olarak kullanılan ve kademe formu verilen parçalar çeşitli standartlar ile sınıflandırılmıştır. Boeing firmasının BAC, Aerospace Materials Specifications (AMS) veya Army Navy Drawing Extrusions(AND) ekstrüzyon malzeme standartları bulunmaktadır[23].

Kademelendirme işlemi bir biri ile kesişen detayların alın alına değil de bağlantı elemanı kullanılarak yüzeylerinden bir birine bağlanmasını sağlamak amacı ile yapılmaktadır. Hava araçlarında detayları birleştirme işlemi çoğunlukla bağlayıcı elemanlar ile sağlanmaktadır yük dağılımını bağlayıcılar üzerinden ana elemanlara aktarılarak yükün taşınması sağlanır. Özellikle kiriş elemanları uçak içerisinde oluşan kabin basıncını ve gerilmeleri ana yapısal elemanlara ileterek yük taşıma kabiliyetine destek olmaktadır.

Hava araçlarını genel olarak jet motorlu ve pervaneli olarak düşündüğümüzde yapısal olarak aşağıdaki gibi bölümlere ayırabiliriz.




**Şekil 1.2** Jet motorlu hava aracının bölümleri




**Şekil 1.3** Pervaneli hava aracının bölümleri

Hava araçlarına etki eden başlıca kuvvetler yerçekimi kuvveti(gravity), taşıma kuvveti(lift), sürükleme kuvveti (drag), itme kuvvetidir(thrust). Şekil 1.4'te gösterilmiştir.

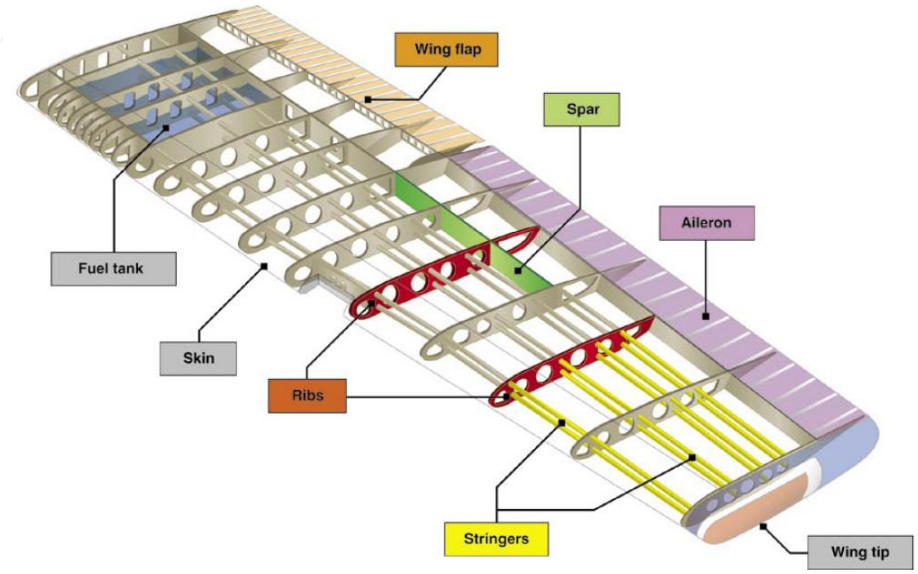



**Şekil 1.4** Uçağa etki eden kuvvetler[2]

Gövde ve burun hava aracının kullanılacağı alana göre yolcu, kargo ve diğer elemanlar için yeterli hacmi sağlayan bölümdür[24]. Bu bölüme hava aracının kanat, pervane ve kuyruk kısımları montajlanarak bütün bir yapıyı taşıyan ana iskelet oluşturulur. Gövdeye uçağın uçuş konumuna göre dört kuvvette etki etmektedir. Bundan dolayı gövdenin yapısal elemanları büyük bir öneme sahiptir. Gövde bölümünün yapısal elemanları çerçeveler(frame), kirişler(stringer) ve basınç duvarları(bulkhead) oluşturmaktadır.

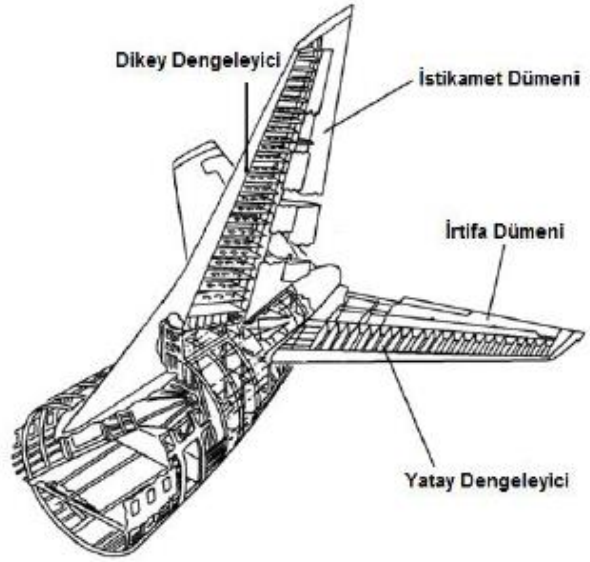
Kademelendirme kiriş ve çerçevelerin birbirine montajlamasında oldukça çok kullanılmaktadır. Kademe formu her bir kirişe verildikten sonra montaj işlemi yapılmaktadır.

Kanatlar uçağın havalanmasını sağlayan ve havada dengede kalarak ilerlemesini sağlayan en önemli yapılardır. Uçağın tüm yükünü taşıdığı için en önemli yapısal elemanların başında gelmektedir. Kanatın kendi içinde bulunan yapısal elemanları kanat kaburgaları(rip), kanat boyunca uzanan eleman (spar), kaburgaları birbirine bağlayan kiriş(stringer), hareketli yapı elemanları olarak aileron ve flap'ler oluşturmaktadır.




**Şekil 1.5** Kanat içerisindeki yapısal parçalar

Kuyruk bölümünde hava aracının yönlendirilmesi ve kalkış için yardımcı yapısal elemanlar bulunmaktadır. Kuyruk bölümünde yatay stabilizer, dikey stabilizer, istikamet dümeni(rudder), irtifa dümeni(elevatör) elemanları bulunmaktadır. Stabilizerler uçağın düz bir konumda uçmasını sağlamaktadır. İstikamet dümeni hava aracının yatay eksende sağa ve sola hareket etmesini sağlamaktadır. Hava sürtünmesinden dolayı üzerine büyük kuvvetler etki etmektedir. İrtifa dümeni uçağın dikey eksende yukarı ve aşağı hareket etmesini sağlamaktadır özellikle kalkış esnasında büyük yüklere maruz kalmaktadır.



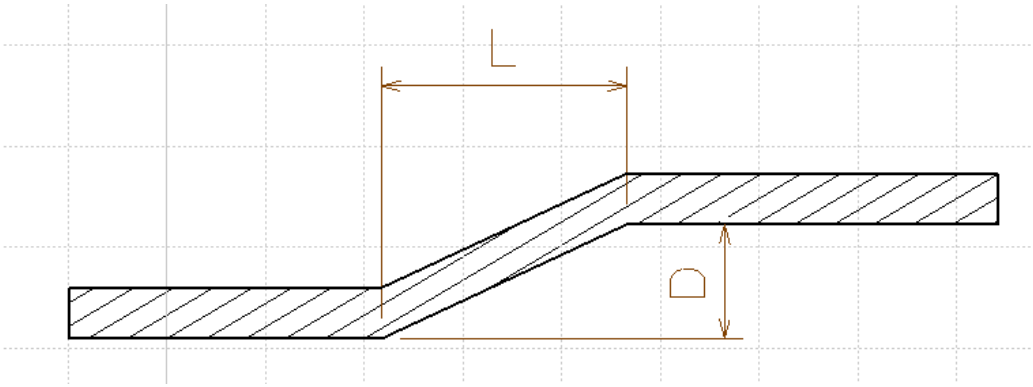

**Şekil 1.6** Kuyruk bölümündeki yapısal parçalar[24]

## 1.3 Kalıp ile Kademe(joggle) Formu Verme İşlemi

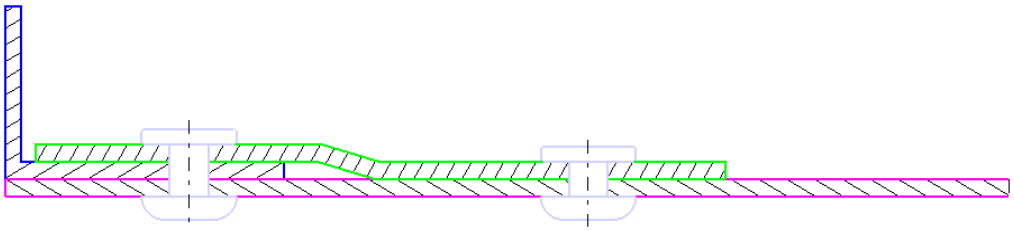
Kademelendirme işlemi Uzunluk(L) ve derinlik(D) ölçülerine göre sınıflandırılmaktadır. Kademeli yapılar hava aracında iki metalin birleşmesini sağlamak için oluşturulmaktadır. Farklı detaylar ve yapılar bu kademe bölgelerinde birleşme sağladığı için form işleminin istenilen tolerans aralığında olması montaj işleminin yapılabilmesi için büyük bir önem arz etmektedir.

Form verme işlemi dişi ve erkek kalıp arasına sac malzemenin istenilen konumda yerleştirilerek belirli basınçla sac malzemenin dişi ve erkek kalıba sıvanması ile gerçekleşmektedir.

Şekil 1.7'de sac metal kademe yapısı gösterilmiştir. Şekil 1.8'de sac metallerin kademe yapısı sayesinde bir birine montajlanması gösterilmiştir.



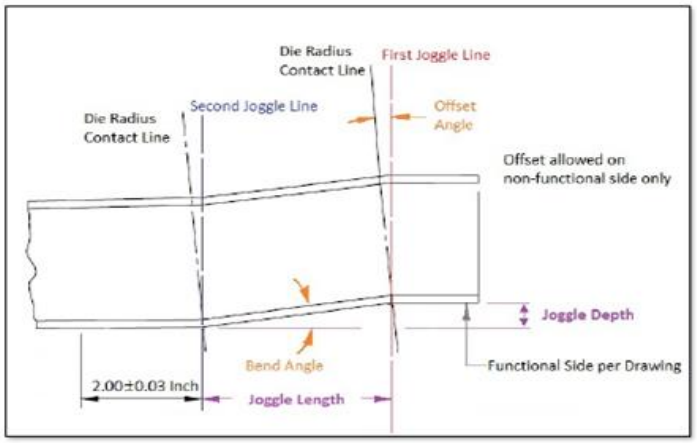

**Şekil 1.7** Sac malzemelerin kademe yapısı



**Şekil 1.8** Birden fazla parçanın bağlayıcı elemanlar ile kademe bölgelerinde birleşimi

Sikorsky Aircraft, Boeing, Airbus, Agusta westland ve TUSAŞ firmalarının joggle formu ile ilgili standartları mevcuttur. Bu standartlarda önerilen kademelendirme ölçülerini, oluşabilecek şekil bozuklukları ve toleransları ile ilgili bilgiler yer almaktadır.

Genel olarak havacılık sektöründeki kademe formunun ölçü toleransları aşıdaki gibidir. Uzunluk ±0.75 mm, derinlik ± 0.25 ve kademenin konumu ±0.75 olarak belirtilmektedir. Her firmanın kendi üretim standartları ve teknik isterleri bulunmaktadır. Genel olarak bu tanımlamalar ve öneriler malzemenin hangi kondisyonda soğuk mu veya sıcak mı şekillendirileceği, kalınlıklara göre kademe oranlarının önerileri yer almaktadır. TUSAŞ'ın standardında gerekli kademe formu isterlerini belirtmiştir.

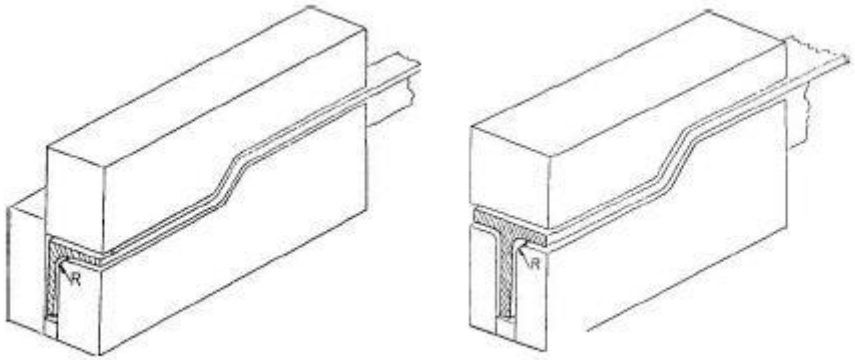



$$L = Joogle\ Length$$

$$D = \text{Joggle Depth or Joggle Height}$$

$$Joggle\ Ratio = \frac{Joggle\ Length\ (L)}{Joggle\ Depth\ (D)}$$

**Şekil 1.9** Kademe formunun tasarım tanımları[26]




**Şekil 1.10** Kademe formu veren kalıp örnekleri[26]

Kalıp tasarlanırken sac malzemenin geri esneme miktarı düşünülerek kalıbın tasarımı gerçekleştirilir. Şekil 1.10 kalıp örnek görselleri paylaşılmıştır.

Kalıp tasarımı ve üretimi tamamlandıktan sonra şekillendirme işlemi için kalıp hidrolik pres tezgahına bağlanarak özel bir durum belirtilmediği müddetçe 100 bar basınç oda sıcaklığı veya sıcak şekillendirme 94-177 C° form verme işlemi gerçekleştirilir.




**Şekil 1.11** Hidrolik pres tezgahı

## 1.4 Alüminyum Alaşım Çeşitleri ve Özellikleri

Saf alüminyum doğada bulunabilen 2.7 g/cm³ yoğunluğa sahip bir metal çeşididir. İlk olarak 1825 yılında Dersted saf alüminyum hazırlama çalışmaları yürütmüştür. 1950'li yıllara gelindiğinde alüminyum üzerine birçok çalışma yapılmış ve endüstride çeşitli alaşımlar ile birlikte kullanılarak demir çelikten sonra en çok kullanılmaya başlanan metal olmuştur[9].

**Tablo 1.1** Saf Alüminyumun özellikleri[9]

| | |
|---|---|
| Sembol | Al |
| Atom Numarası | 13 |
| Yoğunluğu | 2.7 gr/cm$^3$ |
| Ergime Noktası | 660°C |
| Buharlaşma Noktası | 2450°C |
| Elastisite Modülü | 7.2*10$^3$ kg/cm$^2$ |
| Akma Dayanımı | 1-3 kg/mm$^2$ |
| Çekme Dayanımı | 4-9 kg/mm$^2$ |

Saf alüminyumun mukavemet ve sertlik değerleri düşük olduğu için çeşitli kimyasal elementler ile birleştirilerek mukavemet değerler yükseltilmiş ve sanayide kullanım alanları arttırılmıştır. Günümüzde beyaz eşya, otomotiv ve havacılık alanlarında çeşitli alüminyum alaşımlar kullanılmaktadır.

Alüminyum alaşımların oluşturulması için kullanılan başlıca kimyasallar; Silisyum(Si), Bakır(Cu), Magnezyum(Mg), Çinko(Zn), Lityum(Li)'dur. Bu kimyasallar kullanılarak çeşitli mekanik özelliklere sahip alüminyum alaşımlar oluşturulmuştur.

Alüminyum alaşımların serileri;

- 1XXXX: Saf alüminyum
- 2XXXX: Al-Cu yoğunluklu alaşımdır. Diğer alaşım elementleri de bulunabilir
- 3XXXX: Al-Mn yoğunluklu alaşımdır
- 4XXXX: Al-Si yoğunluklu alaşımdır
- 5XXXX: Al-Mg yoğunluklu alaşımdır
- 6XXXX: Al-Mg-Si yoğunluklu alaşımdır
- 7XXXX: Al-Zn yoğunluklu alaşımdır
- 8XXXX: Al-Li yoğunluklu alaşımdır

Her bir serinin mekanik özellikleri birbirinden farklı olduğu gibi her seri ısıl işleme tabi tutularak mekanik özellikleri arttırılmaktadır.

Her ısıl işlem basamağında malzemenin form vermeye karşı direnci farklılık

göstermektedir. Alüminyumların mukavemet kazanması için yapılan ısıl işlemler; çözeltiye(solüsyona) alma, doğal yaşlandırma ve yapay yaşlanma olmak üzere üç basamaktan oluşur.

Alüminyum alaşımların ısıl işlem kondisyonları aşağıdaki gibidir;

O: Tavlı, rekristalize olmuş hali

W: Solüsyona alma işleminden sonraki kalıcı olmayan yapıyı ifade eder

T: ısıl işlem yapılmış olan temperi ifade eder;

T3: Solüsyona alma işlemi uygulanır, soğuk işlemden geçirilir ve doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir

T4: Solüsyona alma işlemi uygulanır, yapay yaşlandırma ile sertleştirilir

T5: Sıcak işlemden sonra soğutulur, yapay yaşlandırma ile sertleştirilir

T6: Solüsyona alma işlemi uygulanır ve yapay yaşlanma ile sertleştirilir [2,10].

Havacılık alanında kullanılan alüminyum alaşımlardan 2024 ve 7075'in O, W, T3,T6 kondisyonları detay parçaların büyük bir çoğunluğunu oluşturmaktadır.

Forma verme işlemi alüminyum malzemeler için düşük kararlı hallerde verilip, form verme işleminden sonra istenilen mukavemet değerlerini elde etmek için ısıl işlem uygulanma yöntemi, en çok tercih edilen yöntemlerdendir.

### 1.4.1 AA2024 Alaşımı

Kimyasal yapısındaki bileşenlerin oranı;

**Tablo 1.2** AA2024'ün kimyasal bileşenleri[11,15]

| Element | Cu | Mg | Mn | Fe | Si | Zn | Ti | Cr | Al |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ağırlık % | 4,0-5,0 | 0,2-0,9 | 0,4-1,2 | 0,25-1 | 0,5-1,2 | 0,2-0,25 | 0,01-0,04 | 0,01-0,1 | Kalan |

İçerisinde bakır elementini ana elemen olarak kullanan 2024 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri bakımından iyi değerlere sahip olurken korozyona karşı direnci düşük bir metaldir.

Havacılık endüstrisinde önemli olan mekanik özelliklerden biride yorulmaya karşı dirençtir. AA2024 yorulma direnci iyi değerlere sahip olduğu için hava araçlarında genellikle yapısal parçalarda kullanıldığı görülmektedir.

Sac ve plaka veri tabanlarındaki yorulma ve tokluk puanlamasında en iyi değerleri almıştır[12].

**Tablo 1.3** AA2024-T3'ün mekanik özellikleri[12]

| **Mekanik özellikler** | **AA 2024-T3** |
|---|---|
| Çekme Dayanımı(MPa) | 450-490 |
| Akma Dayanımı(MPa) | 320-360 |
| Elastisite Modülü(GPa) | 73,1 |
| Uzama(%) | 18-22 |
| Yorulma Dayanımı(MPa) | 120-150 |

### 1.4.2 AA7075 Alaşımı

Kimyasal yapısındaki bileşenlerin oranı

**Tablo 1.4** AA7075'in kimyasal bileşenleri

| Element | Cu | Mg | Mn | Fe | Si | Zn | Ti | Cr | Al |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ağırlık % | 1,20-2,00 | 2,10-2,90 | 0,30 | 0,50 | 0,40 | 5,10-6,10 | 0,10-0,20 | 0,18-0,28 | Kalan |

İçerisinde çinko(Zn) elementini ana elemen olarak kullanan 7075 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri bakımından diğer alüminyum alaşımlarından daha iyi değerlere sahip olurken aynı zamanda da korozyona karşı direnci yüksek bir metaldir. Şekillendirilebilme zorluğu eksik yönünü oluştururken ulaştığı yüksek mukavemet değerleri ile beraber hafif olması sebebiyle havacılık ve uzay sanayisinde kapsamlı şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Gelişen teknoloji ile birlikte kazanılan deneyimler ile şekillendirile bilirliğini iyileştirmektedir[15,16].

**Tablo 1.5** AA7075-T6'nın mekanik özellikleri

| **Mekanik özellikler** | **AA 7075-T6** |
|---|---|
| Çekme Dayanımı(MPa) | 550-600 |
| Akma Dayanımı(MPa) | 450-500 |
| Elastisite Modülü(GPa) | 71,7 |
| Uzama(%) | 11-16 |
| Yorulma Dayanımı(MPa) | 150-165 |

## 1.5 Literatür Araştırması

Akbaş yaptığı çalışmada AA7075 T6 kondisyonun da ki alüminyum alaşımı test malzemesi seçerek form verme işleminde oluşan çatlak, buruşma, yanlış form ve geri yaylanma parametrelerini incelemiştir. L/D oranı ve sıcaklık arttıkça parçalarda daha az çatlak, buruşma ve geri yaylanmanın olduğunu gözlemlemiştir[6].

Nanda Kishore ve arkadaşları kompozit malzemelerde yapıştırıcı kullanarak düz alın alına yapıştırmayı ve kademelendirme uygulayarak yapıştırmayı deneyler yaparak karşılaştırmış ve kademelendirme yöntemi ile yapılan birleştirme yönteminin alın alına yapılandan daha verimli olduğunu görmüşlerdir[8].

M. Satyanarayana Gupta ve D. Ramana Reddy yaptığı deneysel V büküm de oluşan geri yaylanma hesabında, kalınlık ve büküm açısını değişken olarak belirleyip deneyler yapmıştır. Deneyler sonucunda özelikle 90°'den sonraki bükümlerde geri yaylanmanın fazla olduğunu görmüştür. Malzeme kalınlığı arttıkça geri yaylanmanın azaldığı görülmüştür[13].

Karaağaç, bakır ve pirinç malzemeleri üzerinde yaptığı V büküm deneysel çalışmasında büküm açısını ve basıncı değişken olarak belirlemiştir. Yaptığı deneyler sonunda büküm bölgesinin iç yüzeyinde basma dış yüzeyinde çekmenin artması ve kuvvet kalktıktan sonra basma ve çekme kuvvetlerinin dengelenerek formun son halini oluşturduğunu belirtmiştir.15° dereceden başlayarak on beşer derece ile artan 90° kadar ulaşan kalıplar ile deneyler gerçekleştirmiştir. Bu deneyleri klasik yöntem şekil verme ve 10, 12 ve 14.4 MPa basınç ve 0,5,10 saniye bekleme sürelerini şekil verme sınır koşullarını uygulamıştır. Büküm açısı arttıkça geri yaylanmanın arttığını, bekleme süresi ve basınç arttıkça geri yaylanmanın azaldığını gözlemlemiştir[14].

H. Gürün ve arkadaşları AA2024 Alaşımının V-Bükme işlemi sonrasında geri esneme davranışlarının incelemişlerdir. Deneylerinin sınırları olarak 60°, 90° ve 120° bükme açılarını, malzeme kalınlığı 1 mm, 1.5 mm ve 2 mm, zımba uç radyüsü içinde R=1 mm, 2mm ve 4 mm belirleyerek deneyler gerçekleştirmişlerdir. Küçük zımba uç radyüsünün malzemelerin bükme ekseninde kırılmaya neden olduğunu gözlemlemişlerdir.
Kalınlığın artmasının gerisi esnemeyi azalttığını gözlemlemişlerdir. Haddeleme yönüne

dik numunelerde oluşan geri esnemenin haddeleme yönüne paralel olan numunelere göre daha az olduğunu gözlemlemişlerdir[20].

Tomoyoshi ve arkadaşları, titanyum alaşımlara kademe formunu verirken sıcak şekillendirme yöntemini kullanarak ısıtılan bölgenin şekil alma kabiliyetini incelemiştir. Kademe bölgesini de içine alacak şekilde 20 mm ve 75 mm'lik bölümlerini rezistansla ısıtarak incelemişlerdir. Kademe oranı 3 olan titanyum alaşımda çatlak gözlememişlerdir Yüzeylerde parça genişliği boyunca bozulmalar görülmüş ve yüzey alanı az ısıtılan parçada bu bozulmanın az olduğu gözlemlemişlerdir[22].

Haddeleme yöntemi ile imal edilmiş alüminyum sac metallerin büküm ve form verme işleminde geri esneme durumlarına yönelik çalışmalar literatür de oldukça çoğalmış ve değerler saptanmıştır[3,4].

Fakat ekstrüzyon ile üretilmiş olan sac malzemelerin yapıları haddeleme yöntemi ile üretilmiş olan malzemeler ile benzerlik göstermediğinden geri esneme miktarları da farklı olmaktadır. Ayrıca ekstrüzyon ile imal edilen sac malzemeler belirli bir formda ekstrüzyon edilmektedir (L, U, Z, Kare veya Dikdörtgen). Malzemenin ekstrüzyon edilirken oluşan bağ yapısı haddeleme ile elde edilen malzemeden farklı olmaktadır. Literatür de bilgi eksikliği fark edildiğinden bu çalışmanın yapılması hedeflenmiştir.

## 2. METOT VE YÖNTEM

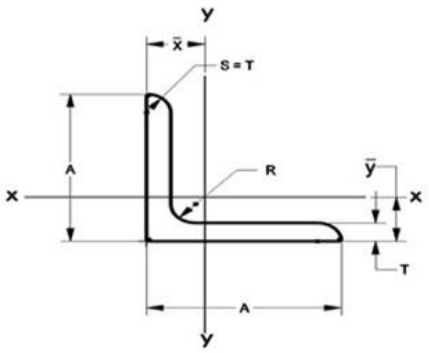
Deneysel yöntem için Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş'nin şekillendirme kalıpları tasarım mühendisliği bölümünün verileri incelenerek en çok kullanılan kademelendirilmiş uçak parçalarının özellikleri belirlendi. L/D oranı 3 ve 5 olan L ve Z kesitli AA2024-T3 ve AA7075-T6 ekstrüzyon malzemelerinin çoğunluğu oluşturduğu görülmüştür.

Değerler ve malzeme durumu göz önünde bulundurularak deneylerde kullanılmak üzere L kesit formlu Amerika malzeme standartlarında(AMS10133) üretilmiş olan ekstrüzyon AA2024-T3 ve AA7075-T6 malzemelerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

### 2.1 Deneysel Yöntem

Deney değişkenleri olarak iki farklı kalınlık 1.6 mm ve 2.4 mm, üç farklı L/D oranı 3, 5 ve 6, iki farklı sıcaklık 25°C ve 94-177°C, iki farklı malzeme AA2024-T3 ve AA7075-T6 belirlenmiştir.

Deney malzemesi olarak AMS10133-07xx standardında üretilmiş olan L kesitli ekstrüzyon malzemesinin teknik ölçüleri Şekil 2.1 ve Şekil 2.2 'deki gibidir.




**Şekil 2.1** L kesitli deney numunesinin teknik resim gösterimi[29]

| | NOMINAL DIMENSIONS | | | AREA | SECTION ELEMENTS | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | T | R | | ȳ & x̄ | I | ρ |
| AND or AMS Extrusion Number | Inches | | | Square Inches | Inch | Inches$^4$ | Inch |
| AND10133-0701 | .875 | .063 | .094 | .107 | .236 | .0075 | .265 |
| AND10133-0702 | | .094 | | .154 | .246 | .0106 | .262 |
| AND10133-0703 | | .125 | | .198 | .256 | .0129 | .256 |

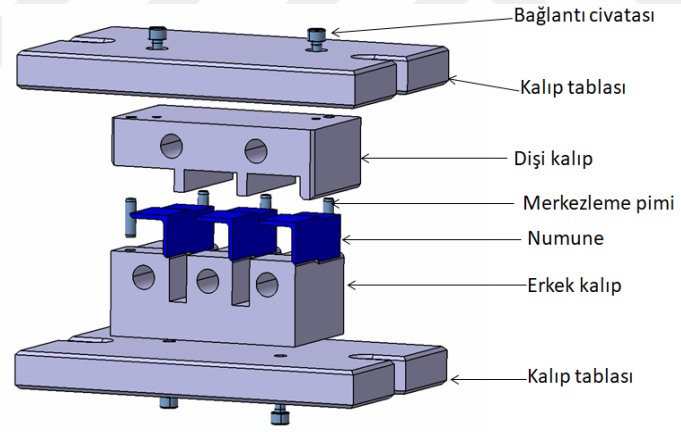
**Şekil 2.2** L kesitli malzemenin ölçüleri[29]

### 2.1.1 Kalıp tasarımı ve kalıp elemanları

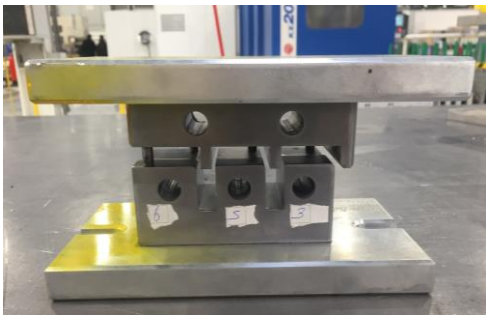
Belirlenen AMS10133-07xx L kesitli ekstrüzyon malzemesinin ölçülerine göre Catia V5 programında kalıp tasarımı 3 gözlü ve her bir gözündeki kademe oranı deney standardında belirlenen L/D oranı 3, 5 ve 6 olacak şekilde tasarlanmıştır. Kalıp, AISI4130 malzemesi seçilerek belirtilen teknik şartlara göre TUSAŞ tesislerinde üretilmiştir. Aşağıdaki Şekil 2.3, 2.4 ve 2.5'te tasarlanmış ve üretilmiş olan deney kalıbı gösterilmiştir.

Kalıp elemanları;

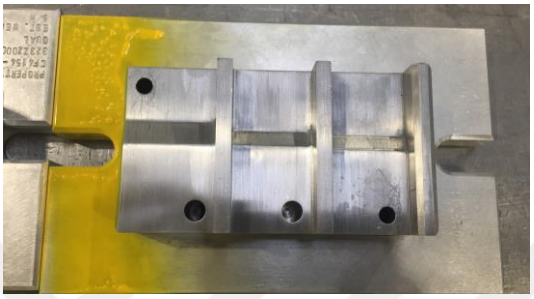
- Kalıp tablası
- Erkek kalıp
- Dişi kalıp
- Merkezleme pimleri




**Şekil 2.3** Catia V5 programında tasarlanmış olan deney kalıbı



**Şekil 2.4** TUSAŞ tesislerinde üretilmiş olan deney kalıbının önden görüntüsü



**Şekil 2.5** TUSAŞ tesislerinde üretilmiş olan deney kalıbının üstten görüntüsü

### 2.1.2 Deneysel çalışmanın yapıldığı tezgahın yapısı ve özellikleri

TUSAŞ tesislerinde bulunan Hidro Mode pres tezgahı kullanılmıştır. Tezgah tabla boyutları 3500 mm x 4200 mm, tabla derinliği 1500 mm basma kuvveti 120 ton/240 bar kapasiteye sahip açık kolonlu bir pres tezgahıdır.




**Şekil 2.6** Deney için kullanılan pres tezgahı

### 2.1.3 Deney düzeneğinin kurulumu ve yapılışı

İlk olarak deneyde kullanılan malzemeler parametrelerine göre gruplara ayrılarak etiketlenmiştir.

**Tablo 2.1** AA2024-T3 Malzemesinin Deney Gruplanması

| ETİKET NUMARASI | MALZEME | L/D ORANI | KALINLIK (mm) | SICAKLIK (°C) |
|---|---|---|---|---|
| **D1** | AL 2024-T3 | 3 | 1,6 | 25 |
| **D2** | AL 2024-T3 | 3 | 2,4 | 25 |
| **D3** | AL 2024-T3 | 5 | 1,6 | 25 |
| **D4** | AL 2024-T3 | 5 | 1,6 | **94** |
| **D5** | AL 2024-T3 | 5 | 2,4 | 25 |
| **D6** | AL 2024-T3 | 5 | 2,4 | **94** |
| **D7** | AL 2024-T3 | 6 | 1,6 | 25 |
| **D8** | AL 2024-T3 | 6 | 2,4 | 25 |

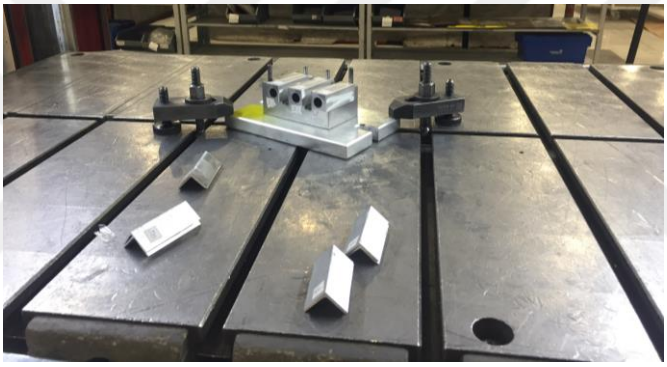
**Tablo 2.2** AA7075-T6 Malzemesinin Deney Gruplanması

| ETİKET NUMARASI | MALZEME | L/D ORANI | KALINLIK (mm) | SICAKLIK (°C) |
|---|---|---|---|---|
| **S1** | **AL 7075-T6** | 3 | 1,6 | 25 |
| **S2** | **AL 7075-T6** | 3 | 2,4 | 25 |
| **S3** | **AL 7075-T6** | 5 | 1,6 | 25 |
| **S4** | **AL 7075-T6** | 5 | 1,6 | **177** |
| **S5** | **AL 7075-T6** | 5 | 2,4 | 25 |
| **S6** | **AL 7075-T6** | 5 | 2,4 | **177** |
| **S7** | **AL 7075-T6** | 6 | 1,6 | 25 |
| **S8** | **AL 7075-T6** | 6 | 2,4 | 25 |



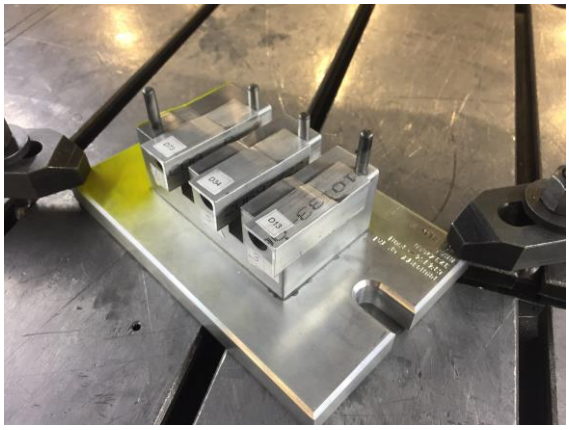

**Şekil 2.7** Gruplara ayrılmış ve etiketlenmiş olan deney numuneleri

Deneyler 5 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Üretilmiş olan kalıp deney tezgahına bağlanarak prosesin kontrolünü yaptıktan sonra deney gerçekleştirilmiştir. Her basım işleminde 3'er adet parça basılmıştır.



**Şekil 2.8** Kalıbın tezgaha bağlanması ve numunelerin kalıba yerleştirilmesi

İlk olarak soğuk şekillendirilecek gruplar 100 Bar sabit basınçta oda sıcaklığında şekil verme işlemi tamamlanmıştır.

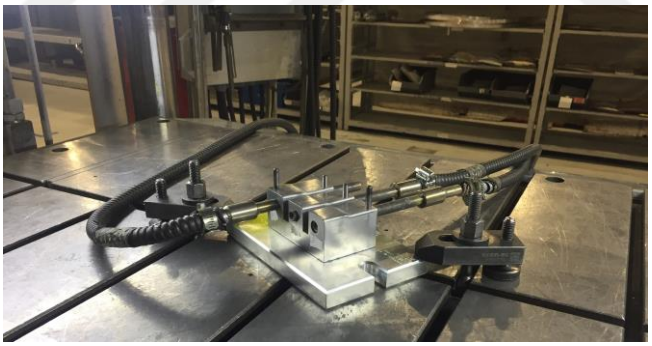


**Şekil 2.9** Soğuk Şekillendirilmiş olan numuneler

Soğuk şekillendirme işlemi tamamlandıktan sonra hem deney numuneleri hem de kalıp; standartta belirtilen sıcaklıkta belirlenmiş olan süre kadar bekletildikten sonra sıcak şekil verme işlemi tamamlanmıştır. TUSAŞ tarafından tasarlanmış ve üretilmiş olan fırının kontrol cihazı doğruluğu ±1.1ºC, sistemin doğruluğu (cihaz + sensör) ±2.8°C hassasiyetinde çalışmaktadır.




**Şekil 2.10** Uçak parçalarının ısıtıldığı fırın



**Şekil 2.11** Kalıbın rezistanslar ile ısıtılması

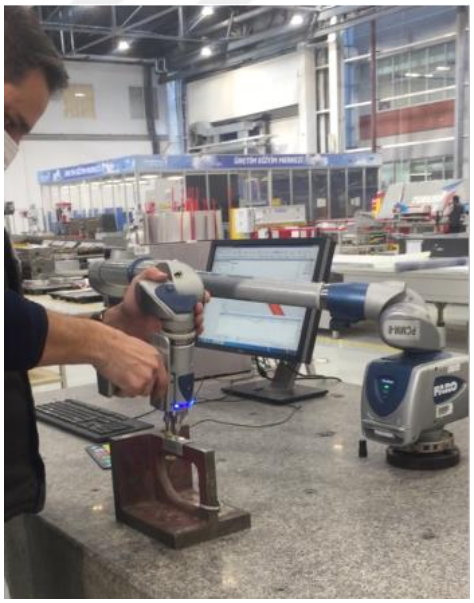
Sıcak şekillendirme işleminden sonra oda koşullarına bırakılarak numuneler soğutulmuştur.

Deney işlemi tamamlandıktan sonra numunelerde oluşan geri esnemenin ölçülmesi için FARO marka ölçüm cihazı kullanılmıştır. Cihaz 0,018 mm ölçüm hassasiyeti ve 1,2 mm çalışma aralığına sahip, taşınabilir 3 Boyutlu bir koordinat ölçüm cihazıdır. Ölçüm işlemi için numuneleri sabitleyeceğimiz düzenek oluşturulmuştur.




**Şekil 2.12** Deney numunelerinin ölçüm düzeneği

Ölçüm düzeneği hazırlanıp kalibrasyon yapıldıktan sonra kademe farkı olan yüzeylerin dört köşesinden dokunarak oluşturulan iki farklı yüzey arasındaki yükseklik farkları ölçülmüştür.



**Şekil 2.13** Yüzeyler arası derinlik farkının ölçümü

Yapılan ölçüm sonuçları ile olması gereken ölçülerin farkları hesaplanarak geri yaylanma değerleri bulunmuştur.

## 2.2 Sayısal Yöntem

Sayısal analizde kullanılmak üzere gerinim-gerilme değerleri çekme testi yapılarak elde edilmiştir. Çekme testi numuneleri AMS10133-07xx standardında üretilmiş olan ekstrüzyon malzemeden elde edilmiştir.

### 2.2.1 Çekme testi

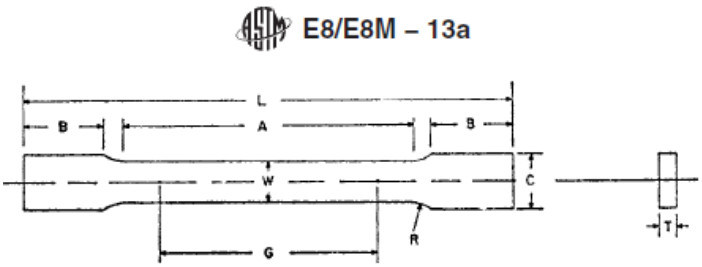
Çekme testinin amaçlarından biride malzemelerin gerilme özelliklerini belirleyerek şekillene bilirliği ve yük altındaki davranışlarını öngörmeyi sağlamaktadır. Yapılan deneylerde malzemenin ısıl işlem basamağı verilerin yorumlanmasında büyük önem arz etmektedir. Bilindiği gibi ısıl işlem malzemelerin mekanik özelliklerini büyük ölçüde değiştirmektedir.

Çekme deneyi statik yük altında belirlenen standartlara göre oluşturulmuş olan numunelerin tek eksende koparıncaya kadar yük uygulanması ile yapılır. Uygulanan yük ve oluşan gerilme sistem tarafından ölçülerek değerler elde edilir.

Çekme deneyi ile elde edilen gerilme- birim uzama eğrisi, çekme diyagramı olarak tanımlanır.

Grafik ile elde edilen değerler malzemenin akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve kopma gerilmesi göstermektedir. Bu değerler çeşitli bilgisayar destekli analiz programları için malzeme verilerinin girdilerini belirlemek için kullanılmaktadır.

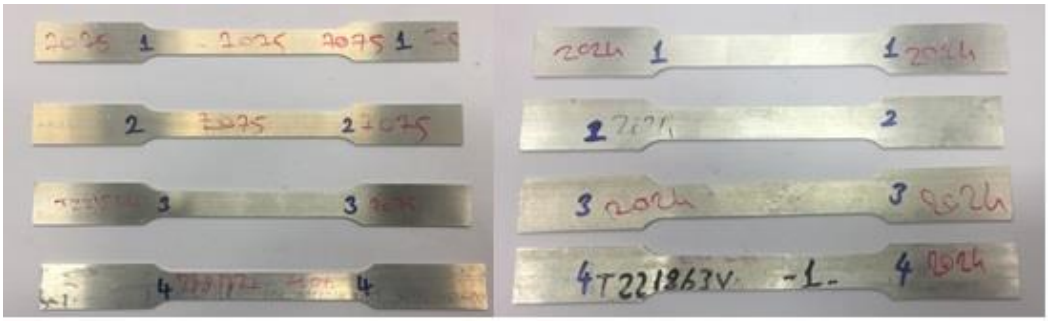
American Society for Testing and Materials(ASTM) E8 standardının aşağıdaki belirttiği ölçüler, L kesitli ekstrüzyon malzemeden kesilerek elde edilmiştir[27].




**Şekil 2.14** Çekme Numunesi teknik ölçüleri

**Tablo 2.3** Çekme Numunesi ölçü değerleri[27]

| | **12,5 mm standart test parçası(mm)** | **6 mm standart test parçası(mm)** |
|---|---|---|
| G-Kalibre boy | 50 | 25 |
| W-Genişlik | 12,5 | 6 |
| T-Kalınlık | Malzeme kalınlığı | Malzeme kalınlığı |
| R-Yuvarlatma Yarıçapı | 12,5 | 6 |
| L-Tüm Uzunluk | 200 | 100 |
| A-İnceltilmiş Alan Boyu | 57 | 32 |
| B-Kavrama Bölgesi Boyu | 50 | 30 |
| C-Kavrama Bölgesi Genişliği | 20 | 10 |



**Şekil 2.15** Çekme testinde kullanılan AA7075-T6 ve AA2024-T3 test numuneleri

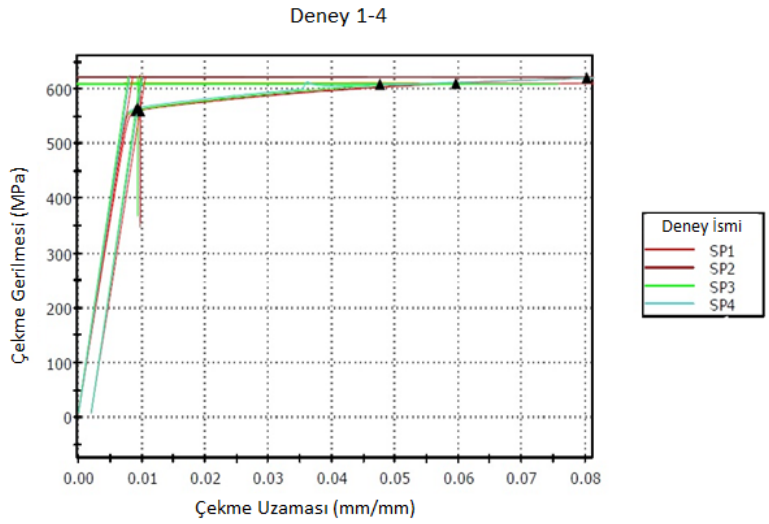
### 2.2.2 Çekme testi sonuçları

ASTM E8-13a teknik standardına göre genişliği 12,5 mm olan deney numuneleri kullanılmıştır.

Kalınlık: 1,6 mm

İlk Boy: 50mm

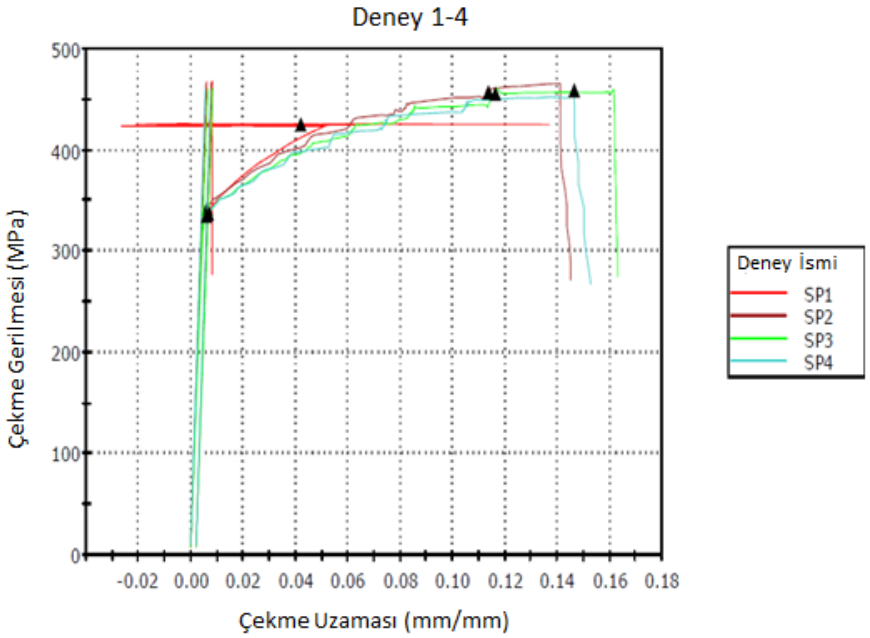
100 KN kapasiteli instron marka test cihazında AA2024-T3 ve AA7075-T6 malzemeleri ile 4'er adet deney gerçekleştirilmiştir. Deney sonucu elde edilen gerilme-gerinme diyagramları aşağıdaki şekillerde gösterildiği gibidir.




**Şekil 2.16** Çekme testi sonucu oluşan AA7075-T6'ya ait gerilme-gerinim diyagramı

**Tablo 2.4** AA7075-T6'ya ait çekme testlerinin sonuçları

| | Deney ismi | Kalınlık [mm] | Genişlik [mm] | İlk Boy [mm] | Son Boy [mm] | Çekme Dayanımı [MPa] | Akma Dayanımı (0.2 %) [MPa] | Elastisite Modülü [GPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | SP1 | 1.635 | 12.55 | 50.00 | 54.72 | 610.3 | 560.8 | 71.5 |
| 2 | SP2 | 1.635 | 12.53 | 50.00 | 55.16 | 621.6 | 561.7 | 75.7 |
| 3 | SP3 | 1.620 | 12.53 | 50.00 | 53.64 | 609.3 | 561.0 | 78.4 |
| 4 | SP4 | 1.620 | 12.49 | 50.00 | 54.44 | 620.8 | 565.0 | 76.0 |
| Ortalama | | 1.628 | 12.52 | 50.00 | 54.49 | 615.5 | 562.1 | 75.4 |
| SS | | 0.0087 | 0.0252 | 0.0000 | 0.6395 | 6.6 | 2.0 | 2.9 |
| Maksimum | | 1.635 | 12.55 | 50.00 | 55.16 | 621.6 | 565.0 | 78.4 |
| Minimum | | 1.620 | 12.49 | 50.00 | 53.64 | 609.3 | 560.8 | 71.5 |




**Şekil 2.17** Çekme testi sonucu oluşan AA2024-T3'e ait gerilme-gerinim diyagramı

**Tablo 2.5** AA2024-T3'e ait çekme testlerinin sonuçları

| | Deney ismi | Kalınlık [mm] | Genişlik [mm] | İlk Boy [mm] | Son Boy [mm] | Çekme Dayanımı [MPa] | Akma Dayanımı (0.2 %) [MPa] | Elastisite Modülü [GPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | SP1 | 1.626 | 12.57 | 50.00 | 58.20 | 425.2 | 339.0 | 74.7 |
| 2 | SP2 | 1.626 | 12.52 | 50.00 | 57.76 | 456.8 | 342.6 | 78.8 |
| 3 | SP3 | 1.663 | 12.52 | 50.00 | 57.65 | 455.3 | 337.0 | 70.0 |
| 4 | SP4 | 1.665 | 12.56 | 50.00 | 56.56 | 458.6 | 335.1 | 81.1 |
| Ortalama | | 1.645 | 12.54 | 50.00 | 57.54 | 449.0 | 338.4 | 76.2 |
| SS | | 0.0220 | 0.0263 | 0.0000 | 0.6968 | 15.9 | 3.2 | 4.9 |
| Maksimum | | 1.665 | 12.57 | 50.00 | 58.20 | 458.6 | 342.6 | 81.1 |
| Minimum | | 1.626 | 12.52 | 50.00 | 56.56 | 425.2 | 335.1 | 70.0 |

Testlerde elde edilen değerler teorik değerler ile karşılaştırılmış ve uygun değerlerin elde edildiği gözlenmiştir[17].

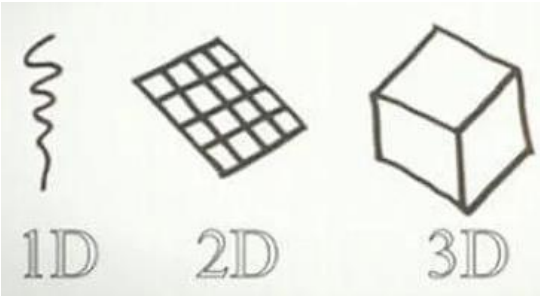
Çekme Testinde elde edilen değerler kullanılarak sayısal analiz için kullanacağımız bilgisayar destekli analiz programı olan Pam-stamp'e malzeme tanımlamasının yapılabilmesini sağlamıştır.

### 2.2.3 Sonlu elemanlar yöntemi

Sayısal yöntem olarak sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminin temelini matematik oluşturmaktadır. İlk örnek çalışmaları 1956'da Turner, Clough, Martin ve Topp tarafından yapılmıştır. Fakat literatüre sonlu elemanlar yöntemi terimsel ifadesi 1960 yılında Clough tarafından kazandırılmıştır[18]. Yöntemin genel prensibinde küçükten büyüğe, parçadan tümevarım vardır. Elemanlar üzerinde çalışılan malzemenin veya sistemin iki ve üç boyutlu parçalarının bir parçası veya bir bölümüdür. Gerçek geometrilerin büyüklüğü ve karmaşıklığı bu yöntem ile elemanlara indirgenerek hesaplamaların yapılabilmesini sağlamaktadır. Daha sonra belirlenen sınır şartları fizik kurallarına bağlı kalarak hazırlanan elemanlara uygulanarak çözüme ulaşılır. Elemanların boyutu ve uygunluğu problemin doğruluğunu arttırmaktadır. Bu yöntem ile birçok mühendislik problemleri ve analizleri çözümlenebilmektedir. Bilgisayarların problem çözmede gelişmesi ile beraber elemanları bilgisayar ortamında tanımlanabilmesi ile problemlerin çözümünde hız ve doğruluğu yönünde ilerleme kaydedilmiştir[19].

Bütün olan geometriden elemanların oluşturulması için bir ağ yapısına gerek duyulmaktadır. Ağ yapısının uygun boyutta seçilmesiyle oluşan elemanlara sayısal model denmektedir. Elemanların birbiri ile bağlantı oluşturduğu yerlere düğüm noktası denmektedir.

Elemanların tek boyutlu(1D), iki boyutlu (2D) ve katı model(3D) çeşitleri vardır.




**Şekil 2.18** Elemanların görsel yapısı

Günümüzde sonlu elemanlar metodu ile çözüm üreten birçok CAE (Computer Analaysis Engineering) programı mevcuttur. Programların çalışma mantığı uygun bilgisayar modeli oluşturulan elemanlara sınır şartları uygulanarak matematik

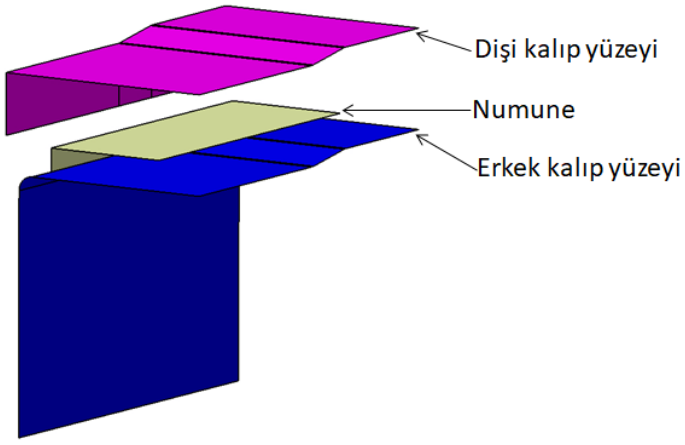
probleminin çözülmesi ile sonuçlanmaktadır. Elemanlar sayesinde oluşan geometrik model bilgisayar tarafından tanımlanabilmesi için malzeme özelliklerinden akma değeri, poisson oranı, elastisite modülü ve yoğunluğu gibi değerleri veri girişi olarak, kullanılan programa girmemiz gerekmektedir. Bu sayede oluşan sayısal modele uygulanan kuvvetler, düğüm noktaları ile elemanlar arasında oluşan farklı durumlar için matrisler oluşmaktadır. Oluşan matrislerin ile çözümlemeler yaparak oluşan gerilme ve gerinimlerin sonucu şekil değişimleri elemanların üzerinde sonuç olarak görünmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi günümüzde çeşitli mühendislik dallarında kullanılmaktadır.

En çok kullanılan alanlardan birisi yapısal analiz, akış analizleri, elektromanyetik analizlerdir. Sektörde ağırlıklı olarak havacılık ve otomotiv alanlarında yoğun kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılan yazılımlardan biride Pam-stamp programıdır. Tezimde bu programı kullanarak sayısal model çözümlemesini gerçekleştirdim. Yaptığım çalışmada malzeme tanıtımı için Holloman bağıntısını kullandım ve programa malzeme verisi olarak bağıntının gereksinimlerinin girişini yaptım.

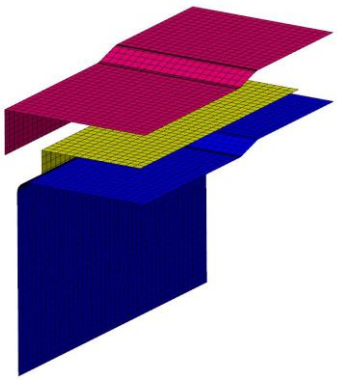
### 2.2.4 Ağ yapısı ve eleman tipinin modellenmesi

Kullanılan malzemelerin kalınlıkları az ve sac malzeme kategorisine girdiği için analiz modelinde 2D eleman tipi kullanılmasına karar verilmiştir. Catia V5 programında tasarlanmış olan kalıp yüzeylerinin çıkarılması ile 2D modeller elde edilmiştir. Her bir L/D oranına sahip kalıp yüzeyi ayrı ayrı oluşturulmuştur.




**Şekil 2.19** Analiz için kullanılacak olan analiz yüzeyleri

Oluşturulan yüzeyler Pam-stamp programına IGS formatına dönüştürülerek aktarılmıştır. Kalıp yüzeyleri analiz programına çağrılırken(import) parça boyutlarına göre uygun ağ yapısı oranı seçilerek 2D modeller Pam-stamp programında oluşturulmuştur.



**Şekil 2.20** Pam-stamp programında oluşturulan ağ yapısı

Analiz modeli oluşturulan numuneler 1.6 mm X 1.6 mm ağ yapısına bölünerek toplamda 884 adet 2D elemana ayrılmıştır. Dişi ve erkek kalıp ise 1.55 mm X 1.55 mm ağ yapısına bölünerek toplamda 2442 adet 2D elemanlara ayrılmıştır. Program büküm bölgelerinde adapte özelliğini kullanarak uygun eleman modelini belirlemiştir.

### 2.2.5 Malzeme modellerinin tanımlanması

Analiz deney numuneleri için malzeme tanımlaması yapılan çekme deneyi verilerine göre hesaplanarak programa girişi yapılmıştır.

Çekme deneyi sonucu elde edilen mühendislik gerinim-gerilme verilerinden gerçek gerinim-gerilme verileri aşağıdaki gerçek gerinme denklemi 2.1 ve gerçek gerilme denklemi 2.2 ‘ye göre elde edilmiştir.

$$\varepsilon_g = \int_{l0}^{l} \frac{dl}{l} = ln\frac{l}{l0} = \ln(1+\varepsilon) \tag{2.1}$$

$$\sigma_g = \sigma\,(\varepsilon + 1) \tag{2.2}$$

Denklem 2.1 ve 2.2’de $\sigma_g$; Gerçek gerilme, $\sigma$ ; Mühendislik gerilmesi, $\varepsilon_g$; Gerçek gerinme, $\varepsilon$; Mühendislik gerinmesi. K, n malzeme sabitleri K; Dayanım sabiti, n; Pekleşme üsteli olarak ifade edilmektedir.

Malzemeler plastik deformasyona uğramaya başladıklarında plastik deformasyonlarında artış meydana gelmektedir. Oluşan artış pekleşme üsteli ile ifade edilmektedir. Dayanım sabiti ise gerçek şekil değişimini bir yapan değer olarak ifade edilmektedir[18,21,28].

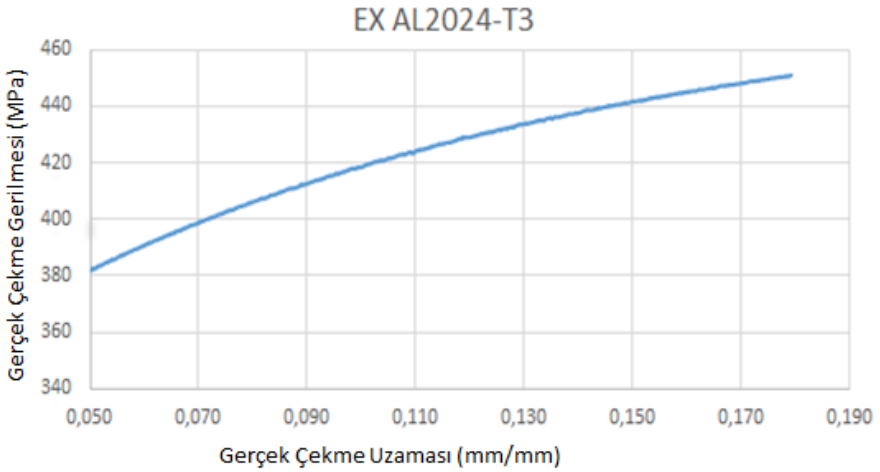
K ve n değerlerini hesaplayabilmek için aşağıdaki eşitlik 2.3'e göre Holloman bağıntısının logaritması alındığında bir doğru denklemi olan eşitlik 2.4 elde edilir.

$$\sigma = K * \varepsilon^n \tag{2.3}$$

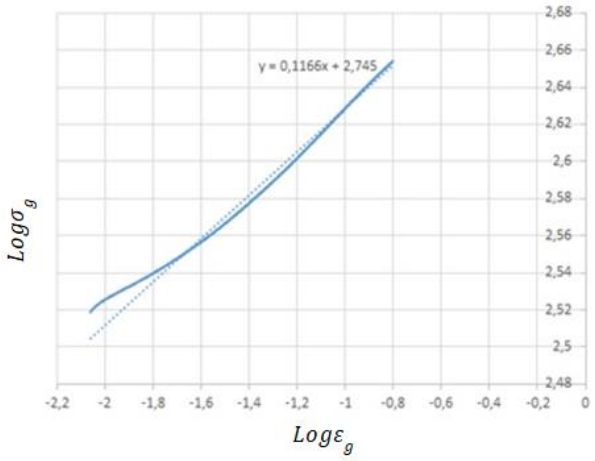
$$ln_{(\sigma)} = ln_{(K)} + n * ln_{(\varepsilon)} \tag{2.4}$$

AA2024-T3 ve AA7075-T6 alaşımları için hesaplanan gerçek gerinim-gerilme değerlerinin akma gerilmesi ile boyun vermenin başlangıcı arasındaki değerlerin logaritması alınarak elde edilen eğrinin eğimi pekleşme üstelini, uzamanın 1 olduğu noktanın eğri ile kestiği nokta ise dayanım sabitini vermektedir. Elde edilen eğrinin denklemi oluşturularak hem eğimi bulunmuş hem de K değeri hesaplanmıştır[18,21,28].

Pekleşme üsteli(n) sıfır değerine yaklaştıkça malzemenin deformasyon sertleşmesine uğrama dayanımını arttığını, K değeri de malzemenin dayanımı ile doğru orantılı olduğu literatürde yapılan araştırma ve deneylerde görülmüştür[18,21].

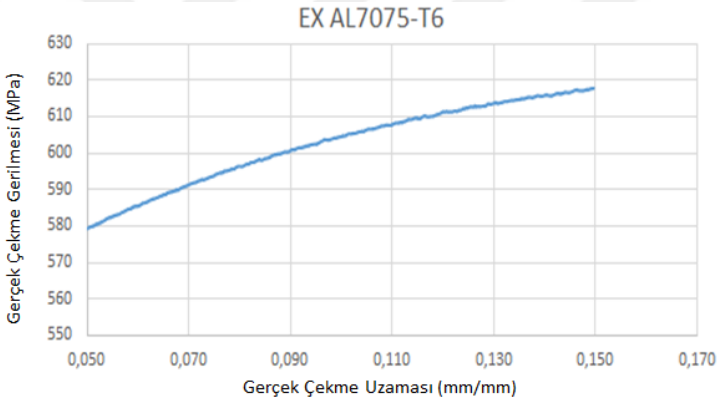



**Şekil 2.21** SP1-AA2024-T3'ün gerçek gerinim gerilme grafiği

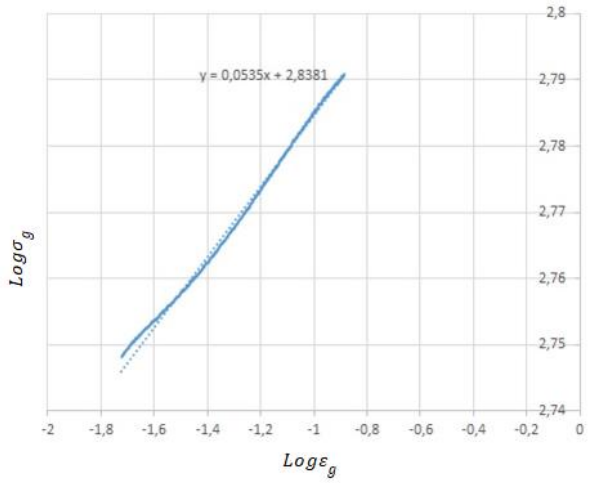



**Şekil 2.22** SP1-AA2024-T3'ün logaritmik skalada gerinim gerilme grafiği

Grafiğe göre doğrunun eğimi=0,1166 olduğu görülmektedir bu değer pekleşme üsteline eşittir. Grafiğe göre log(K) = 2,745 ise K=555,9




**Şekil 2.23** SP1-AA7075-T6'nın gerçek gerinim gerilme grafiği




**Şekil 2.24** SP1-AA7075-T6 'nın logaritmik skalada gerinim gerilme grafiği

Grafiğe göre doğrunun eğimi=0,0535 olduğu görülmektedir. Bu değer pekleşme üsteline eşittir. Grafiğe göre log(K) = 2,8381 ise K=688,8.

K ve n değerleri 4'er adet çekme deneylerinin her biri için hesaplanarak analiz programına ortalama değerleri girilmiştir. AA7075-T6 malzemesinin ortalama değerleri K=693,5 MPa n=0,0578, AA2024-T3 malzemesinin ortalama değerleri K=528,7 MPa n=0,1031 olarak hesaplanmıştır.

Analiz için kullanılacak deney numunesinin malzeme tanımlanması aşağıdaki gibi gerçekleştirilmiştir.

Hesaplamalar sonucu elde edilen;

1-Malzememenin öz kütlesi

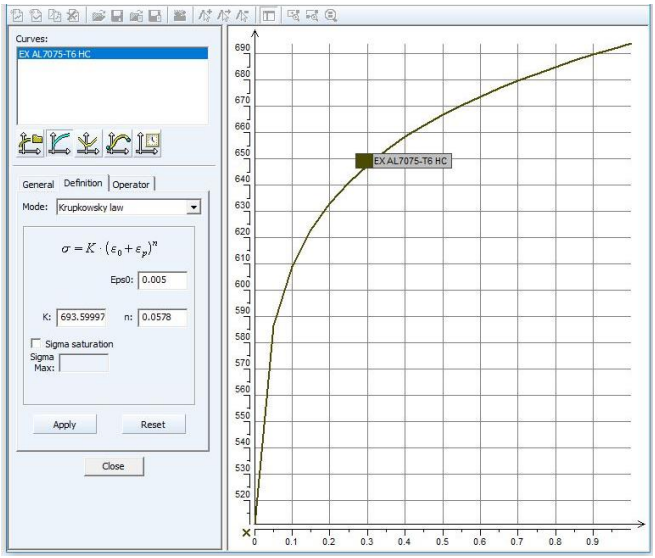
2- Malzemenin elastik modülü

3- Poisson oranı

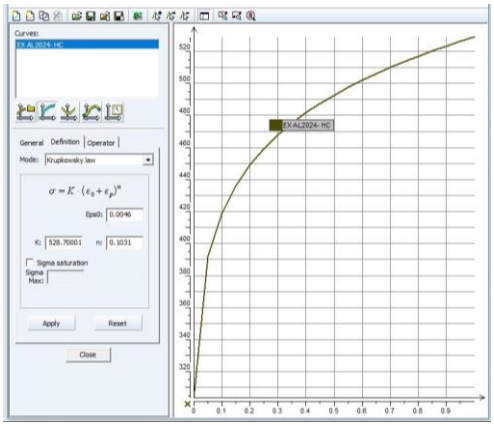
4- Pekleşme üsteli

5- K dayanım sabiti

Değerleri Pam-stamp analiz programının malzeme tanımlama bölümüne girişi yapılmıştır.




**Şekil 2.25** AA7075-T6 malzemesinin K ve n değerlerinin programa girilmesi



**Şekil 2.26** AA2024-T3 malzemesinin K ve n değerlerinin programa girilmesi

Kalıbın dişi ve erkek modelleri herhangi bir deformasyona maruz kalmayacağından dolayı Pam-stamp programında katı model olarak tanıtılır ve kalıp malzemesini program otomatik olarak oluşturur.

### 2.2.6 Analiz sınır şartları ve temas yüzeyleri

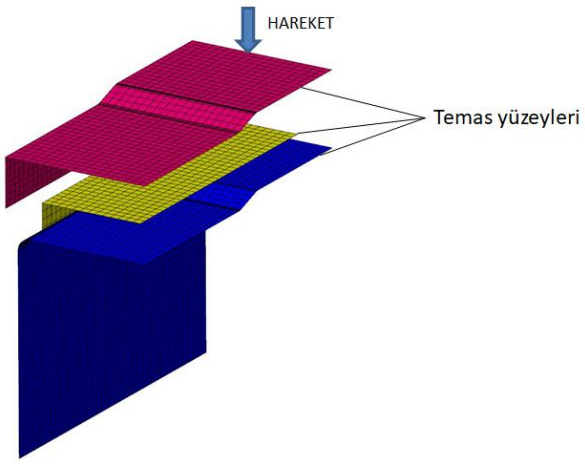
Analizlerde 3 farklı L/D oranı, 2 farklı kalınlık ve oda koşullarındaki sıcaklık kullanılarak programda analizler çözdürülmüştür. Her bir L/D oranı, malzeme ve kalınlık için toplam 12 adet analiz çözdürme işlemi yapılmıştır. Analizde programının yetenekleri çerçevesinde sadece soğuk şekillendirme yapılmıştır.

**Tablo 2.6** Sayısal analiz değişkenleri

<table>
<tr><th colspan="4">Değişkenler</th></tr>
<tr><th>Malzeme</th><th>L/D Oranı</th><th>Kalınlık (mm)</th><th>Sıcaklık (°C)</th></tr>
<tr><td rowspan="3">AA7075-T6<br>AA2024-T3</td><td>3</td><td rowspan="2">1,6</td><td rowspan="3">25</td></tr>
<tr><td>5</td></tr>
<tr><td>6</td><td>2,4</td></tr>
</table>

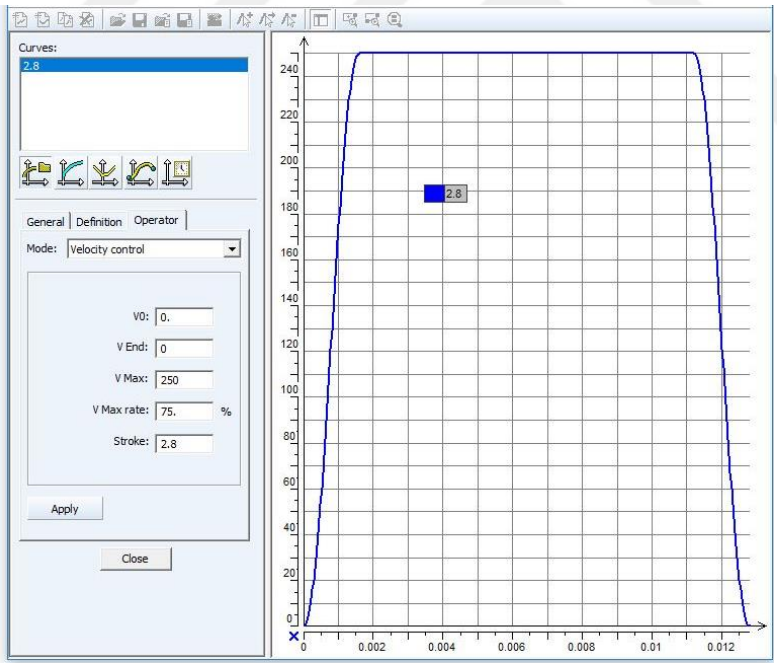
Analiz programlarının gerçeği yansıtması için temas yüzeylerini doğru belirlenmesi analiz verimliliği için büyük önem arz etmektedir. Temas yüzeyleri Pam-stamp programının seçenek olarak sunduğu *Surface_To_Surface* temas olarak tanımlanmıştır.

Temas yüzeyleri numune parça üst kalıp ve numune parça alt kalıp olarak tanımlanmıştır.




**Şekil 2.27** Temas yüzeyleri

Temas tanımlamaları yapıldıktan sonra alt kalıp tüm eksenlerde sabitlenmiştir. Üst kalıba uygun kapanma mesafesi(stroke) belirlenerek x ve y yönlerinde sabitlenip z yönünde hareket tanımlaması yapılmıştır.




**Şekil 2.28** Dişi kalıba hareket tanımlanması

# 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

## 3.1 Deney Sonuçları

Ekstrüzyon ile imal edilmiş alüminyum alaşım AA7075-T6 ve AA2024-T3'ün deney sonrası ölçüm değerleri aşağıdaki tablolardaki gibidir.

**Tablo 3.1** AA2024-T3 malzemesinin deney sonucu oluşan geri yaylanma değerleri

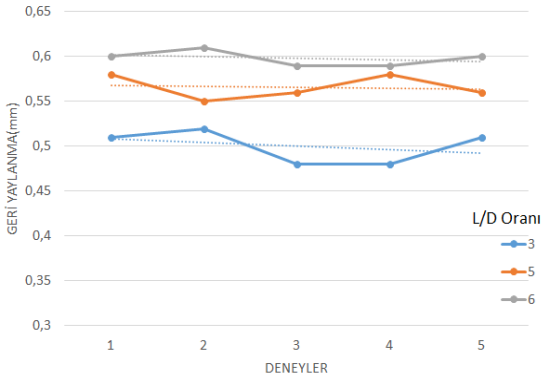
| ETİKET NUMARASI | MALZEME | L/D ORANI | KALINLIK (mm) | SICAKLIK (°C) | ORTALAMA GERİ YAYLANMA |
|---|---|---|---|---|---|
| **D1** | AL 2024-T3 | 3 | 1,6 | 25 | 0,256 |
| **D2** | AL 2024-T3 | 3 | 2,4 | 25 | 0,24 |
| **D3** | AL 2024-T3 | 5 | 1,6 | 25 | 0,358 |
| **D4** | AL 2024-T3 | 5 | 1,6 | 94 | 0,266 |
| **D5** | AL 2024-T3 | 5 | 2,4 | 25 | 0,30 |
| **D6** | AL 2024-T3 | 5 | 2,4 | 94 | 0,222 |
| **D7** | AL 2024-T3 | 6 | 1,6 | 25 | 0,382 |
| **D8** | AL 2024-T3 | 6 | 2,4 | 25 | 0,32 |

**Tablo 3.2** AA7075-T6 malzemesinin deney sonucu oluşan geri yaylanma değerleri

| ETİKET NUMARASI | MALZEME | L/D ORANI | KALINLIK (mm) | SICAKLIK (°C) | ORTALAMA GERİ YAYLANMA |
|---|---|---|---|---|---|
| **S1** | **AL 7075-T6** | 3 | 1,6 | 25 | 0,5 |
| **S2** | **AL 7075-T6** | 3 | 2,4 | 25 | 0,415 |
| **S3** | **AL 7075-T6** | 5 | 1,6 | 25 | 0,566 |
| **S4** | **AL 7075-T6** | 5 | 1,6 | **177** | 0,372 |
| **S5** | **AL 7075-T6** | 5 | 2,4 | 25 | 0,5225 |
| **S6** | **AL 7075-T6** | 5 | 2,4 | **177** | 0,43125 |
| **S7** | **AL 7075-T6** | 6 | 1,6 | 25 | 0,598 |
| **S8** | **AL 7075-T6** | 6 | 2,4 | 25 | 0,5375 |

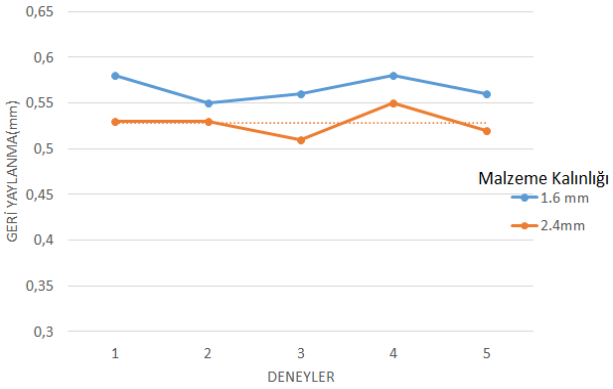
5'er adet yapılan basım sonuçları kaydedilerek geri yaylanma değerlerinin ortalama değeri hesaplanmıştır.

Tablodan elde edilen değerler ile oluşturulan aşağıdaki grafiklerde AA7075-T6 ve AA2024-T3 için L/D oranının, sıcaklığın ve malzeme kalınlığının geri yaylanmaya etkisi görülmektedir.



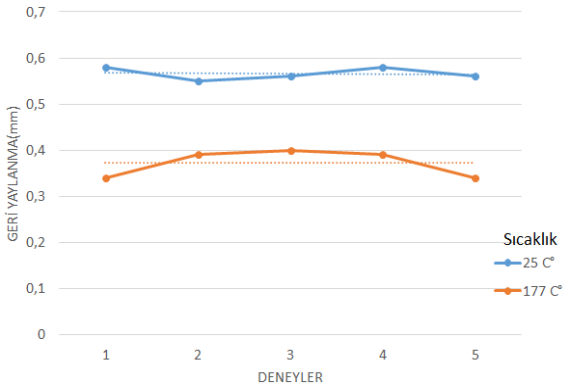

**Şekil 3.1** 25°C'de Kalınlık 1.6 mm için L/D'nin geri yaylanmaya etkisi-AA7075-T6

Grafik incelendiğinde L/D oranı büyüdükçe geri yaylanma değerinde artış görülmüştür.



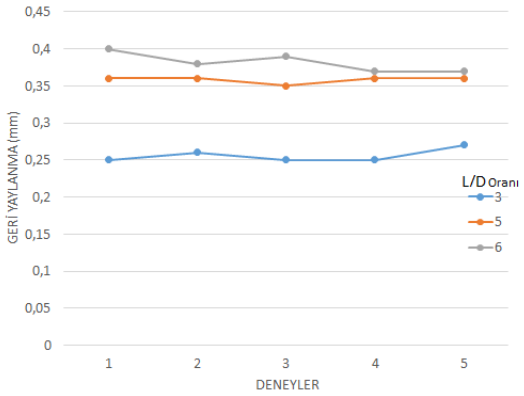

**Şekil 3.2** 25°C'de L/D=5 için kalınlığın geri yaylanmaya etkisi-AA7075-T6

Grafik incelendiğinde kalınlığın artması ile geri yaylanma değerinde azalmalar görülmüştür.



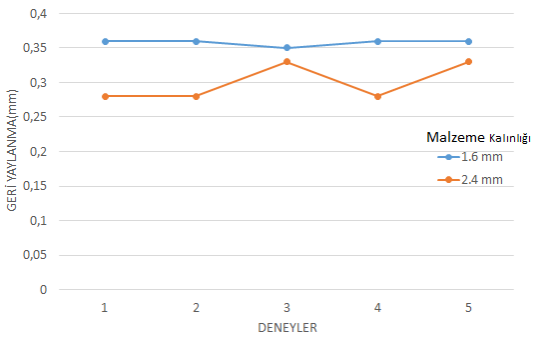

**Şekil 3.3** L/D=5 ve kalınlık 1.6 mm için sıcaklığın geri yaylanmaya etkisi-AA7075-T6

Grafik incelendiğinde sıcak şekil verme işlemi yapıldığında geri yaylanma değerlerinin azaldığı görülmüştür.



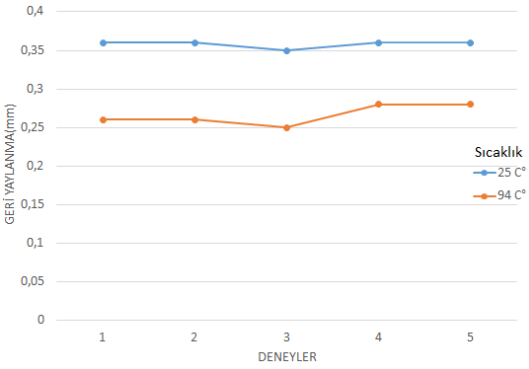

**Şekil 3.4** 25°C'de kalınlık=1.6 mm için L/D'nin geri yaylanmaya etkisi-AA2024-T3

Grafik incelendiğinde L/D oranı büyüdükçe geri yaylanma değerlerinde artış görülmüştür.




**Şekil 3.5** 25°C'de L/D=5 için kalınlığın geri yaylanmaya etkisi-AA2024-T3

Grafik incelendiğinde kalınlığın artması ile geri yaylanma değerlerinde azalma görülmüştür.

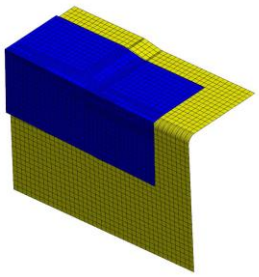



**Şekil 3.6** L/D=5 ve kalınlık=1.6 mm için sıcaklığın geri yaylanmaya etkisi-AA2024-T3

Grafik incelendiğinde sıcak şekil verme işlemi yapıldığında geri yaylanma değerlerinin azaldığı görülmüştür.

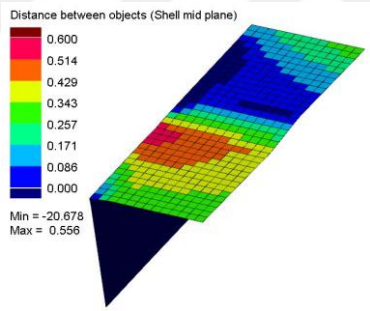
## 3.2 Sayısal Yöntem Sonuçları

Analizler çözdürülerek Pam-stamp programının geri yaylanma hesaplama modülü çalıştırılarak değerler elde edilmiştir.

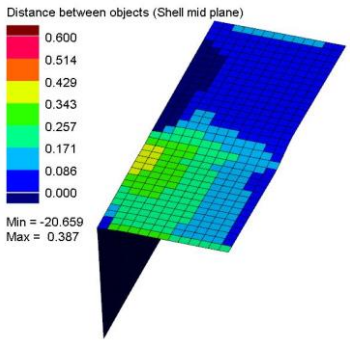


**Şekil 3.7** Analiz programı Pam-stamp ile şekillendirilmiş kalınlık 1.6 mm L/D=5 AA7075-T6 numunesi

Analiz programının soğuk şekillendirme yeteneği olduğundan dolayı sadece soğuk şekillendirmeler incelenmiştir.




**Şekil 3.8** Analiz programı Pam-stamp ile geri yaylanma değeri hesaplanmış olan kalınlık 1.6 mm ve L/D=5 AA7075-T6 numunesi




**Şekil 3.9** Analiz programı Pam-stamp ile geri yaylanma değeri hesaplanmış olan kalınlık 1.6 mm ve L/D=5 AA2024-T3 numunesi

Aşağıdaki tablolarda analiz sonucu hesaplanan geri yaylanma değerleri gösterilmiştir.

**Tablo 3.3** Analiz programı Pam-stamp ile geri yaylanma değeri hesaplanmış olan AA7075-T6 numunelerinin değerleri

| MALZEME | L/D ORANI | KALINLIK (mm) | SICAKLIK (°C) | GERİ YAYLANMA (mm) |
|---|---|---|---|---|
| AL 7075-T6 | 3 | 1,6 | 25 | 0,46 |
| | 3 | 2,4 | 25 | 0,39 |
| | 5 | 1,6 | 25 | 0,55 |
| | 5 | 2,4 | 25 | 0,50 |
| | 6 | 1,6 | 25 | 0,57 |
| | 6 | 2,4 | 25 | 0,51 |

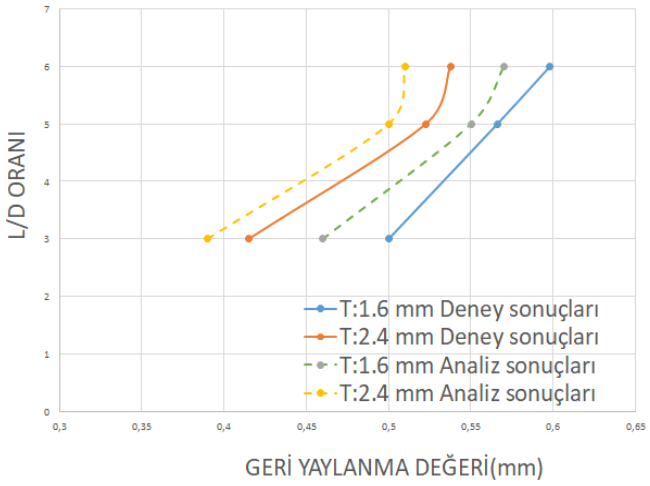
**Tablo 3.4** Analiz programı Pam-stamp ile geri yaylanma değeri hesaplanmış olan AA2024-T3 numunelerin değerleri

| MALZEME | L/D ORANI | KALINLIK (mm) | SICAKLIK (°C) | GERİ YAYLANMA (mm) |
|---|---|---|---|---|
| AL 2024-T3 | 3 | 1,6 | 25 | 0,24 |
| | 3 | 2,4 | 25 | 0,22 |
| | 5 | 1,6 | 25 | 0,33 |
| | 5 | 2,4 | 25 | 0,28 |
| | 6 | 1,6 | 25 | 0,36 |
| | 6 | 2,4 | 25 | 0,31 |

Yapılan Deneylerin sonuçları ve analizler sonuçlarının karşılaştırılması aşağıdaki tablodaki gibidir.

**Tablo 3.5** AA7075-T6 için analiz ve deney karşılaştırma tablosu

| MALZEME | L/D ORANI | KALINLIK (mm) | DENEY SONUÇLARI (mm) | ANALİZ SONUÇLARI (mm) |
|---|---|---|---|---|
| AL 7075-T6 | 3 | 1,6 | 0,50 | 0,46 |
| | 3 | 2,4 | 0,415 | 0,39 |
| | 5 | 1,6 | 0,566 | 0,55 |
| | 5 | 2,4 | 0,5225 | 0,50 |
| | 6 | 1,6 | 0,598 | 0,57 |
| | 6 | 2,4 | 0,5375 | 0,51 |

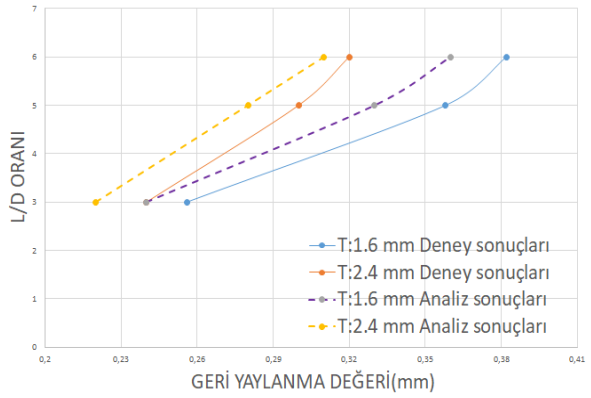



**Şekil 3.10** AA7075-T6 için analiz ve deney sonuçları grafiği

AA7075-T6 için veriler incelendiğinde deney sonuçları ile analiz sonuçları %96 oranında benzerlik göstermiştir.

**Tablo 3.6** AA2024-T3 için analiz ve deney karşılaştırma tablosu

| MALZEME | L/D ORANI | KALINLIK (mm) | DENEY SONUÇLARI (mm) | ANALİZ SONUÇLARI (mm) |
|---|---|---|---|---|
| AL 2024-T3 | 3 | 1,6 | 0,256 | 0,24 |
| | 3 | 2,4 | 0,24 | 0,22 |
| | 5 | 1,6 | 0,358 | 0,33 |
| | 5 | 2,4 | 0,30 | 0,28 |
| | 6 | 1,6 | 0,382 | 0,36 |
| | 6 | 2,4 | 0,32 | 0,31 |




**Şekil 3.11** AA2024-T3 için analiz ve deney sonuçları grafiği

AA2024-T3 için veriler incelendiğinde deney sonuçları ile analiz sonuçları %98 oranında benzerlik göstermiştir.

# 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmamda, ekstrüzyon ile imal edilmiş alüminyum alaşımlardan 2024-T3'e ve 7075-T6'ya kademe formu verilirken oluşan geri yaylanma değerleri deneysel ve nümerik olarak belirlenmiştir. Elde edilen değerler tablo haline getirilerek ileride yapılacak olan kalıp tasarımları için referans oluşturması beklenmektedir. Sistemin numerik modeli ve malzeme modeli oluşturularak farklı durumlar için kullanılabilecek veriler elde edilmiştir.

## 4.1 Sonuçlar

- Ekstrüzyon ile imal edilmiş olan malzemelerin geri yaylanma değerlerinin haddeleme yöntemi ile elde edilen malzemelere göre farklılık gösterdiği görülmüştür.
- Form verme yönteminin analitik olarak modellenmesi yapılarak uygun analiz yapısı belirlenmiştir.
- Geri yaylanma değerleri üretilen ürünlerin doğru şekil ve konumda olması için büyük bir önem arz etmektedir. Bu tez çalışması ile elde edilen değerler referans alınarak yapılacak olan kalıp tasarımları doğru parça üretimini sağlayarak kalıbı tekrar işleme ve hurda parça maliyetlerinde büyük iyileştirmeler sağlayacaktır.
- AA2024-T3 malzemesinin AA7075-T6 göre daha kolay şekillenebileceği görülmüştür ve geri yaylanma değeri göreceli olarak daha düşük çıkmıştır.
- L/D oranı arttıkça geri yaylanma değerinin her iki malzemede de arttığı görülmüştür.
- İnce malzemede kalın malzemeye göre daha fazla geri yaylanma olduğu görülmüştür. Kalınlık arttıkça geri yaylanma değeri her iki malzeme içinde azalmıştır.
- Sıcaklığın malzemelerin form alma kabiliyetlerini arttırdığı görülmüştür. Sıcaklık arttıkça AA2024-T3 ve AA7075-T6 için geri yaylanma değerlerinin azaldığı görülmüştür.
- TUSAŞ bünyesinde üretilen ekstrüzyon yöntemi ile imal edilmiş parçalara kademe formu verirken bu tez kapsamında elde edilmiş referans değerler ile kalıp tasarımı yapılmış ve parçalar tolerans aralığında kalarak uygunluk almıştır.

## 4.2 Öneriler

- Bu çalışma kapsamında kalınlık 1.6 mm ve 2.4 mm L/D oranı 3, 5 ve 6 olan parçalar incelenmiştir. Farklı kalınlık ve L/D oranları için deneyler yapılarak analitik model ve veriler genişletilebilir.
- Kademelendirme formu düzlemsel yüzeyler ele alınarak incelenmiştir. Kademelendirmenin formlu yüzeyler için de araştırılması yapılarak formlu yüzeylerin geri yaylanmaya etkisi incelenebilir.
- Kademelendirme işlemi sadece L kesitli ekstrüzyon malzemeler için incelenmiştir. Farklı kesitli ekstrüzyon yöntemi ile imal edilmiş malzemelerde geri yaylanma değerleri incelenebilir.

## KAYNAKLAR

[1] Korkmaz Ö.E. (2010),Uçaklarda kullanılan alüminyum malzemelerdeki korozyonun incelenmesi, önlenmesi ve tahribatsız muayene ile tespiti. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 20-21.

[2] TÜBİTAK Bilim Genç, 11.01.2019 https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/ucaklar-havada-nasil-hareket-eder, 10 Ekim 2020

[3] Gan W. Wagoner R.H.,(2004) Die design method for sheet springback, international Journel of mechanical Sciences, 46:1097-1113.

[4] Tiryakioğlu M.F, (2013) AA 2024 ve AL 5754 Sac Metal Malzemelerde Bükme Esnasında Oluşan Geri Esneme Miktarının Deneysel Verilerle Matematiksel Olarak modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

[5] K. Dilip Kumar, K.K Appukuttan, V.L Neelakantha, Padmayya S. Naik. (2014), Experimental determination of spring back and thinning effect of aluminum sheet metal during L- bending operation.

[6] Akbaş K. (2017) Havacılık sanayiinde kullanılan ekstrüzyon ürünlerinin kademelendirme yöntemiyle şekillendirilmesi(joggle forming) prosesinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

[7] Rooy, E.L., 1995, Properties and Selection Non Ferrous Alloy and Special-Purpose Materials, ıntroduction to Aluminum and Aluminum Alloys, Vol. 2, A.S.M Handbook, American Society For Metals, p 1-27, Ohio.

[8] A. Nanda Kishore, N. Siva Prasad, (2012) An experimantal study of Flat-Joggle-Flat bonded joints composite laminates. Departman of Mechanical Engineering Indian Institute of Technology Madras, Chennai 600 036, India

[9] Yılmaz M. (1996), Alüminyum Alaşımların Aşınma Davranışları. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

[10] Güler K.A (2003), Uçak Yapımında Kullanılan Malzemeler ve Özelliklerinin İncelenmesi Bitirme Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Metalurji Fakültesi

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

[11] Liang M., Chen L., Zhao G., Guo Y., 2020 Effects of solution treatment on the microstructure and mechanical properties of naturally aged EN AW 2024 Al alloy sheet, Journal of Alloys and Compounds

[12] M. Yurdakul, O. Özbay ve Y. Tansel İç (2002) Havacılık alanında kullanılan alüminyum alaşımlarının seçimi. Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık fakültesi, Gazi Üniversitesi Maltepe Ankara cilt 17, no 2,1-23

[13] M. Satyanarayana Gupta, D. Ramana Reddy, Design and analysıs of aırcraft sheet metal for sping back effect, International Conference on Advancements in Aeromechanical Materials for manufacturing, 2016, Hyderaba, India

[14] İ. Karaağaç (2016) The Experimental Investigation of Springback in V-Bending Using the Flexforming Process, Research Article - mechanical engıneering, King Fahd University of Petroleum & Minerals

[15] Çal B. (2018), AA7075-T6 Alüminyum Alaşımın Uzay Çalışmaları İçin Sert Anodlama Yöntemi İle Kaplanması, Mekanik-Çevresel Testleri Ve Karakterizasyonu Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul Türkiye

[16] Youbao S., Xinqi Y., Lei C., Xiaopeng H., Zhikan S.(2013) Defect features and mechanical properties of friction stir lap welded dissimilar AA2024–AA7075 aluminum alloy sheets, Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin

[17] 2003, Department of defense Handbook, Metallic materials and elements for aerospace vehicle structures, MIL-HDBK-5J 31 January 2003

[18] Aydoğan S. C (2015), Tİ Alaşımlarının Diyaframla Hidrolik Şekillendirilmesinde Geri Esneme Miktarlarının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Türkiye

[19] Güler M. S, Sadri Şen (2015), Sonlu Elemanlar yöntemi Hakkında Genel Bilgiler, Gemi Ulaştırma İşletme Mühendisliği, Deniz Bilimleri Fakültesi, Ordu Üniversitesi

Bilim Teknik Dergisi Cilt5 sayı , 2015, 56-66.

[20] H. Gürün, O. Çavuşoğlu, U. Çaydaş, C. Özek, M. Çelik(2018), AA2024 Alaşımının V-Bükme İşlemi Sonrasında Geri Esneme Davranışlarının İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü, , Ordu Üniversitesi Bilim Teknik Dergisi 30(1), 1-8, 2018

[21] Z. Zhang, Q. Sun, C. Li, W. Zhao (2005), Theoretical Calculation of the Strain-Hardening Exponent and the Strength Coefficient of Metallic Materials, Journal of Materials Engineering and Performance, Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 15(1) February 2006

[22] T. Maeno1, Y. Yamashita, Ken-ichiro M.(2016), Hot Stamping of Titanium Alloy Sheets into U Shape with Concave Bottom and Joggle using Resistance Heating, Key Engineering Materials Trans Tech Publications, Vol. 716, pp 915-922, june 2016

[23] Scope metal, https://catalogue.scope-metal.com/catalogue/group/197, 20 Aralık 2020

[24] Milli Eğitim bakanlığı, (2012) Uçak Bakım Gövde Yapısı, Ankara, Türkiye

[25] Şahin Hüseyin https://sahinhuseyin.weebly.com/7-hafta.html, 11 Aralık 2020

[26] Türk Havacılık ve Uzay Sanayi Proses Standartları, TPS-306, 01.02.2020

[27] E8/E8M-13a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, American Association State Highway and Transportation Officials Standard

[28] Arkun E.(2006), Paslanmaz Çelik Saclarda Şekillendirme Karakteristikleri, Yüksek Lisans Tezi Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programı, İstanbul

[29] Premier Metal, https://www.premier-metals.com/and10133-army-navy-drawing-extrusions-aerospace/, 01 Ocak 2021

[30] Arge ve Tasarım, https://argevetasarim.com/cekme-deneyi/, 05 Mart 2021

## ÖZGEÇMİŞ

**Kişisel Bilgiler**

**Adı Soyadı** : Sedat IŞIK

**Uyruğu** : T.C.

| Öğrenim Durumu | Üniversite/Lise | Mezuniyet tarihi |
|---|---|---|
| Yüksek lisans | Marmara Üniversitesi | 2022 |
| Lisans | Karabük Üniversitesi/Mak. Otomotiv Müh.(%30 İng) | 2016 |
| Lise | Gazi Kars Anadolu Lisesi | 2010 |

**Yabancı Dil**

İngilizce