



**INCONEL 625 (AMS 5599) ALAŞIMININ DİYAFLAMLA HİDROLİK  
ŞEKİLLENDİRİLMESİNDE GERİ ESNEME MİKTARLARININ SAYISAL  
VE DENEYSEL İNCELENMESİ**

**Kutay BEYAZGÜL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2019**

Kutay BEYAZGÜL tarafından hazırlanan “İNCONEL 625 (AMS 5599) ALAŞIMININ DİYAFLAMLA HİDROLİK ŞEKİLLENDİRİLMESİNDE GERİ ESNEME MİKTARLARININ SAYISAL VE DENEYSEL İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Nihat GEMALMAYAN

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

**Başkan:** Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ

Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

**Üye:** Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 18/06/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....  
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
  - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
  - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Kutay BEYAZGÜL

18/06/2019



INCONEL 625 (AMS 5599) ALAŞIMININ DİYAFRAMLA HİDROLİK  
ŞEKİLLENDİRİLMESİNDE GERİ ESNEME MİKTARLARININ SAYISAL VE  
DENEYSEL İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Kutay BEYAZGÜL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2019

ÖZET

Uzay ve havacılık sanayisinin ihtiyaçları doğrultusunda geliştirilen Inconel 625 alaşımı geri esnemesi diğer çelik alaşımlarına göre açısız olarak daha fazla olan bir nikel bazlı bir süper alaşımdır. Form kalıbı tasarım aşamasında, iş parçasının büküm yarıçapı ve kalınlığa bağlı olarak değişen geri esneme miktarının istenen büküm açısına eklenip tasarlanması neticesinde diyaframla hidrolik şekillendirme operasyonunda tek seferde mühendislik gereksinimlerine uygun parça çıkması mümkün hale gelmektedir. Tasarım aşamasında girdi olacak açı değerinin tespiti ise geri esneme davranışı bilinmeyen parçalarda daha zor olmakta, imalat ve tasarım süreçlerini uzatmaktadır. Bu çalışmada Inconel 625 alaşımının diyaframla şekillendirme sırasında geri esneme değerlerinin tespiti amaçlanmıştır. Literatürde mevcut olmayan büküm yarıçapı/iş parçası kalınlığı-geri esneme tablosu elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda eğme momentini ve iş parçası büküldüğünde tarafsız eksenlerden geçen form öncesi ve sonrası büküm yarıçap farklarını dikkate alan analitik bir denklem ve deneme kalıbında farklı kalınlıklarda deneyler yapılmıştır. Deneyler farklı büküm yarıçaplarına sahip bir deneme takımı vasıtasıyla yapılan bükümler sonucunda ilgili deney verilerinden kalınlık/büküm yarıçapı-geri esneme tabloları yapıp sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel ve matematiksel verilerden elde edilen sonuçlardan empirik formüller oluşturulmuştur. Bu empirik formüller sayesinde farklı büküm yarıçapı ve parça kalınlıklarındaki geri esneme davranışı tahmin edilmiştir. Ek olarak sonlu analiz yöntemi ile analiz yapıp tüm sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bilim Kodu : 91421

Anahtar Kelimeler : Sac metal, Form, Süper alaşım, Hidrolik şekillendirme, Inconel 625

Sayfa Adedi : 75

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Nihat GEMALMAYAN

INVESTIGATION OF ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL SPRING BACK  
BEHAVIOUR OF INCONEL 625 PER AMS 5599 UNDER FLEXFORM FORMING

(M. Sc. Thesis)

Kutay BEYAZGÜL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2019

ABSTRACT

Inconel 625 is a super alloy that is very hard to form which is developed for requirements of aerospace industries. That material has high strength and high corrosion resistance up to 800°C. Forming process, there is a much more spring back occurs rather than other materials. During designing of forming tools, to shape the form to required component such as 90° degree bends, require know-how of spring back behavior. Compensating that spring back by tool, make parts will be formed correctly according to engineering needs. This paper suggest a spring back table for Inconel 625 respect to forming radius and part radius. These tables are not found on any literature. In this paper, there are two approach to the method of finding spring back behavior. In this paper, we approach the problem by two different ways. One of them is experimental by tool and create an empirical formula from these experiment result. The other one is creating a mathematical model from bending moment and using the same inputs of the forming tool to find and compare these results

Science Code : 91421

Key Words : Sheet metal, Forming, Flexform, Super alloy, Inconel 625

Page Number : 75

Supervisor : Dr. Lecturer Nihat GEMALMAYAN

## TEŐEKKÖR

Benim bu mesleđi seřmemde 6rnek olan rahmetli dedeme, benim her zaman yanımda olan ve desteklerini hiřbir koŐulda esirgemeyen aileme ve 6zellikle anneme teŐekk6r ederim.





**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	x
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	9
3. DİYAFRAMLARLA ŞEKİLLENDİRME TEZGAHI.....	13
3.1. Tezgâhın Çalışma Prensipleri .....	16
3.2. Tezgâh ile İlgili Önemli Noktalar.....	18
3.3. Diyaframın Ömrünü Uzatmak İçin Yapılması Gerekenler.....	19
4. INCONEL 625 (AMS 5599) ALAŞIMI.....	23
4.1. Kimyasal ve Mekanik Özellikler .....	24
4.2. Deformasyon Tipleri.....	25
4.3. Çekme Testi .....	30
5. KALIP TASARIMI .....	35
5.1. Kalıp Tasarımında Dikkat Edilmesi Gerekli Diğer Noktalar .....	39
5.2. Numune Etiketlenmesi .....	41
5.3. Deney.....	43
6. GERİ ESNEME .....	45
7. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ .....	53
8. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	63

	<b>Sayfa</b>
KAYNAKLAR .....	67
EKLER.....	69
EK-1. Çekme Testi Sonuçları Tablosu.....	70
EK-2. Çekme Testi Sonuçları Gerçek Gerilim.....	71
EK-3. Çekme Testi Sonuçları Mühendislik Gerilimi.....	72
EK-4. Eğri Oturtma Sonuçları.....	73
EK-5. Deney Ölçüm Sonuçları.....	74
ÖZGEÇMİŞ .....	75

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Genel tolerans değerleri-metrik-.....	2
Çizelge 1.2. Alüminyum 2024-0'a ait geri esneme tablosu.....	6
Çizelge 3.1. Kauçuk örtü sertlikleri .....	21
Çizelge 4.1. Inconel 625 özellikleri .....	24
Çizelge 4.2. Denklem katsayıları .....	34
Çizelge 5.1. Deneme kalıplarındaki açı ve büküm yarıçapları .....	37
Çizelge 6.1. $n_{Gauss}=16$ için Gauss Legendre kökleri.....	50
Çizelge 7.1. Denklem katsayılarının uyarlanması .....	57

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1. Sikorsky S70 helikopteri.....	1
Şekil 1.2. Çeşitli form parçaları –süper alaşım-.....	3
Şekil 1.3. Örnek açılıma ait dxf dosyası .....	3
Şekil 1.4. Kalıp tasarımı.....	4
Şekil 3.1. Flexform tezgâhı.....	14
Şekil 3.2. Tezgah kesit görüntüsü .....	16
Şekil 3.3. Operasyon sırası.....	18
Şekil 4.1. Sac metalin birim elemanına ait serbest cisim diyagramı .....	25
Şekil 4.2. Sac metalin birim elemanında gerilim dağılımı.....	26
Şekil 4.3. Akma teoremleri .....	27
Şekil 4. 4. Eşit yönlü çekme.....	28
Şekil 4.5. Düzlemsel gerinim.....	29
Şekil 4.6. Tek yönlü gerinim.....	29
Şekil 4.7. Kesme .....	29
Şekil 4.8. Tek yönlü bası.....	30
Şekil 4.9. Çekme test örneği .....	30
Şekil 4.10. Gerilim-gerinim teoremleri.....	32
Şekil 4.11. Eğri oturtma yöntemi .....	33
Şekil 4.12. #10 Çekme testi .....	34
Şekil 5.1. Örnek kalıp tasarımları .....	35
Şekil 5.2. Parçayı sündürerek form vermek için yapılan kalıp tasarımı .....	36
Şekil 5.3. Test kalıbı .....	37
Şekil 5.4. Büküm numuneleri .....	38
Şekil 5.5. Form büküm hattı .....	39
Şekil 5.6. Flanş yüzeyi kaydırma yoluyla FBL düzeltilmesi.....	40

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.7. Büküm yarıçapının değiştirilmesi yoluyla FBL düzeltilmesi.....	40
Şekil 5.8. Kalıp renklendirme referansı .....	41
Şekil 5.9. Etiket.....	42
Şekil 5.10. Deneysel sonuçlar t/R-geri esneme .....	44
Şekil 6.1. Geri esneme .....	45
Şekil 6.2. Sac metal büküldükten sonra üzerinde kalan gerilimler.....	47
Şekil 6.3. Sac metal büküldükten sonra geri esneme ve yarıçap değişimi .....	51
Şekil 6.4. Analitik sonuçlar t/R-geri esneme .....	52
Şekil 7.1. Sonlu elemanlar analizi için takım yüzeyi.....	53
Şekil 7.2. Sonlu elemanlar analizi için takım yüzeyi ve büküm örnekleri .....	54
Şekil 7.3. Büküm yarıçapındaki minimum eleman boyutu.....	55
Şekil 7.4. Eleman boyutlandırılması.....	55
Şekil 7.5. Zaman-basınç grafiği .....	56
Şekil 7.6. Inconel 625'e ait gerinim-gerilim parametreleri.....	57
Şekil 7.7. Inconel 625'e ait gerilim-gerinim değerlerinin karşılaştırılması.....	58
Şekil 7.8. Diyafram örtülerine ait gerilim-gerinim değerleri.....	59
Şekil 7.9. Kauçuk örtünün pam-stamp ortamında modellenmesi.....	59
Şekil 7.10. Büküm örneklerinin kalıp üzerinde form edilmesi.....	60
Şekil 7.11. Pam-Stamp ortamında geri esneme (mm cinsinden).....	60
Şekil 7.12. Pam-Stamp ortamında geri esneme (büküm yarıçapındaki değişim).....	61
Şekil 7.13. Pam-Stamp ortamında yapılan analiz sonuçları SB-t/R .....	61
Şekil 8.1. Geri esneme –t/R grafiği.....	63
Şekil 8.2. Geri esneme –t/R grafiği t/R 1'e kadar.....	63
Şekil 8.3. Farklı malzemelere ait geri esneme tablosu.....	65

**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.1. Flexform tezgâhı.....	13
Resim 3.2. Flexform tezgâhı bilgi ekranı.....	19
Resim 3.3. Derin bir iş parçası form edilirken.....	15
Resim 3.4. Tezgâhta kullanılan kauçuk örtü örnekleri .....	20
Resim 4.1. Örnek Inconel uçak parçaları.....	23
Resim 5.1. Test kalıbı üzerinde numunelerle birlikte.....	38
Resim 5.2. Bükülmüş numuneler.....	42
Resim 5.3. Numuneler büküm sonrasında .....	43
Resim 5.4. Numuneler büküm sonrasında .....	43
Resim 5.5. Numuneler büküm sonrasında ölçümü .....	44
Resim 8.1. Büküm sonrası geri esneme davranışı .....	64

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>a</b>	Gerinim-Gerilim Denklemi Katsayısı
<b>A</b>	Alan mm <sup>2</sup>
<b><i>A<sub>MR</sub></i></b>	Mooney-Rivlin Denklem Katsayısı
<b><i>A<sub>RUBBER</sub></i></b>	Kauçuğa ait Mooney-Rivlin Denklem Katsayısı
<b><math>\alpha_1</math></b>	Gerinim Katsayısı
<b>b</b>	Gerinim-Gerilim Denklemi Katsayısı
<b><i>B<sub>MR</sub></i></b>	Mooney-Rivlin Denklem Katsayısı
<b><i>B<sub>RUBBER</sub></i></b>	Kauçuğa ait Mooney-Rivlin Denklem Katsayısı
<b><math>\beta_1</math></b>	Gerinim Katsayısı
<b>c</b>	Gerinim-Gerilim Denklemi Katsayısı
<b><i>C<sub>MR</sub></i></b>	Mooney-Rivlin Denklem Katsayısı
<b><i>d<sub>FBL</sub></i></b>	Flanş kaydırma mesafesi mm
<b><i>D<sub>MR</sub></i></b>	Mooney-Rivlin Denklem Katsayısı
<b>E</b>	Elastik Modül kN/mm <sup>2</sup>
<b><math>\epsilon</math></b>	Gerinim mm/mm
<b><math>\epsilon_E</math></b>	Akma Noktasındaki Gerinim Değeri
<b><math>\tau_{crit.}</math></b>	Kritik Kesme Noktası N/mm <sup>2</sup>
<b><math>\tau</math></b>	Kesme Gerilimi N/mm <sup>2</sup>
<b>K</b>	Gerinim-Gerilim Denklemi Katsayısı
<b><i>l</i></b>	Uzunluk mm
<b>M</b>	Moment N.mm
<b>n</b>	Gerinim-Gerilim Denklemi Katsayısı
<b>P</b>	Kuvvet Newton
<b>r</b>	Büküm sonrası iş parçasının Büküm Yarıçapı
<b><i>R<sub>BT</sub></i></b>	Değiştirilmiş Büküm yarıçapı mm
<b><i>R<sub>TOOL</sub></i></b>	Takıma ait Büküm Yarıçapı mm
<b><math>\Delta R</math></b>	Düzlemsel İzotropi katsayısı

**Simgeler****Açıklamalar** $\bar{R}$ 

Eksenel İzotropi katsayısı

 $\sigma$ Gerilim N/mm<sup>2</sup> $\sigma_0$ Akma Gerilimi N/mm<sup>2</sup> $\sigma_{TS}$ Maksimum Gerilimi N/mm<sup>2</sup> $t$ 

Kalınlık mm

 $\theta_{BA}$ 

Büküm Açısı Derece

 $\theta_{BRSA}$ 

Kaydırma Açısı Derece

 $\theta_{SB_{Analitik}}$ 

Analitik Geri Esneme Açısı Derecesi

 $\theta_{SB_{2024-0}}$ 

AI 2024-0'a ait Geri Esneme Açısı Derecesi

 $\theta_{SB_{Deneysel}}$ 

Deneysel Geri Esneme Açısı Derecesi

 $\theta_{SB_{FEM}}$ 

Sonlu Elemanlar Geri Esneme Açısı Derecesi

 $\nu$ 

Poisson Oranı mm/mm

 $w$ 

Genişlik mm

 $Y$ 

Gerinim-Gerilim Denklemi Katsayısı

 $z^*$ 

Tarafsız Eksen Kayması mm

**Kısaltmalar****Açıklamalar****ABB**

Asea Brown Broveri

**AISI**

Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü

**AMS**

Uzay ve Havacılık Malzeme Standardı

**ASTM**

Amerikan Test ve Malzeme Enstitüsü

**BR**

Büküm Yarıçapı

**BRSA**

Büküm Yarıçapı Kayma Açısı

**BT**

Düzeltilmiş Takım Yarıçapı

**DXF**

2 boyutlu Teknik Resim Formatı

**FBL**

Form Büküm Hattı Kayması

**HPFM**

Flexform tezgâhına ait Form Kalıbı

**ISO**

Uluslararası Standard Organizasyonu

**SB**

Geri esneme

**UNS**

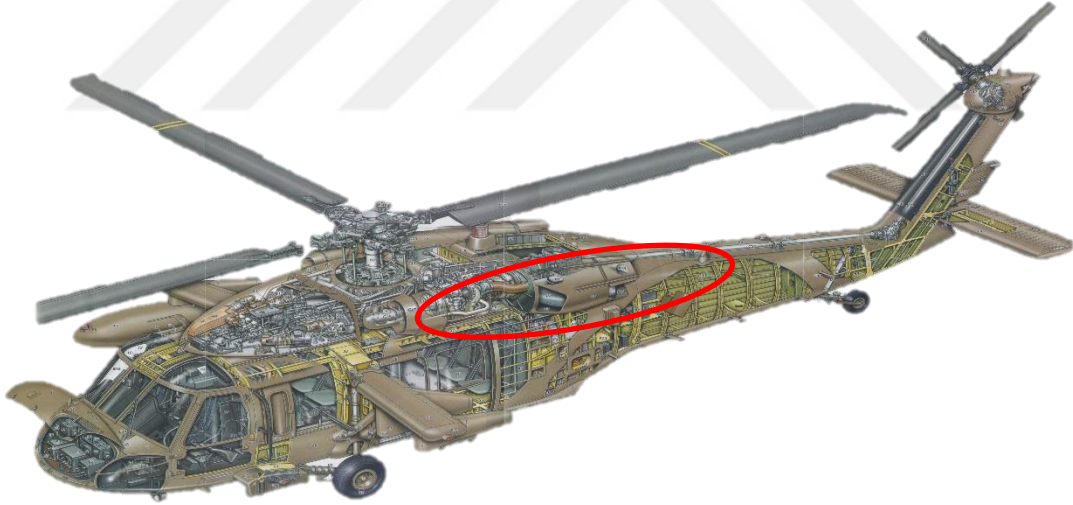
Alaşımlar için Birleşmiş Numaralandırma Sistemi



## 1. GİRİŞ

Uzay ve havacılık sektöründe özellikle motor ve çevresindeki bölgelerde -yüksek sıcaklığa ve aşındırıcılara maruz kalan ortamlarda- Inconel 625 mühendislik malzemesi olarak kullanılmaktadır.




Nikel bazlı olan bu alaşım içerdiği Nb ve Cr karbürler sayesinde yüksek mukavemet değerlerine, yüzeyindeki kendini yenileyebilen oksit tabakası sayesinde ise aşındırıcı ortamlarda yüksek korozyon direncine sahiptir. Üretilebilirliği ve kaynaklanabilirliği kolay olduğu için havacılık ve uzay sektöründe sıklıkla kullanılan bir malzemedir. Sac, çubuk, lama, plaka, boru olarak farklı şekillerde ham mamul olarak temin edilebilmektedir. Şekil 1.1'de gösterilen helikopterlerin ateş duvarı –egzoz ile iskeleti ayıran duvar-, roketlerin art yakıcı boruları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.

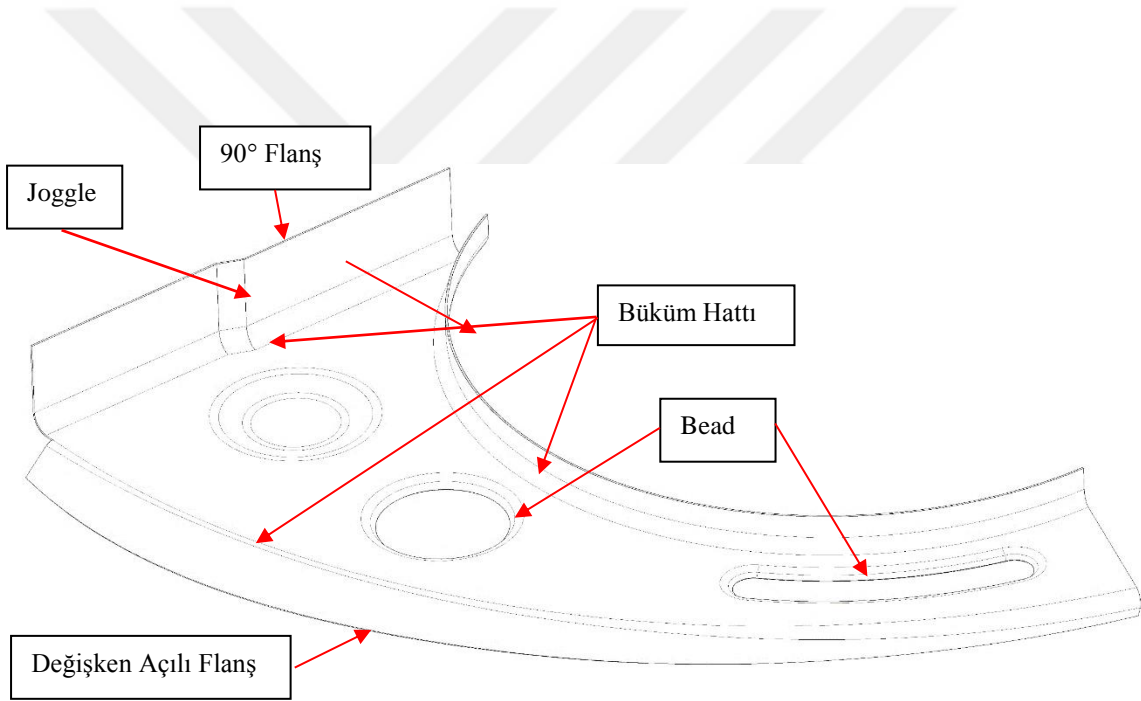


Şekil 1.1. Sikorsky S70 helikopteri

Spesifik dayancın -akma noktası/özkütle- kilit rol oynadığı havacılık uygulamalarında genellikle 0.2-1.60 mm arasındaki kalınlıklarda kullanılmaktadır. Sahip olduğu yüksek elastik modül sebebiyle tolerans bandı dar olduğu mühendislik gereksinimlerinde Şekil vermesi son derece zorlu bir malzemedir. Tolerans değerleri çizelge 1.1 de gösterilmiştir.

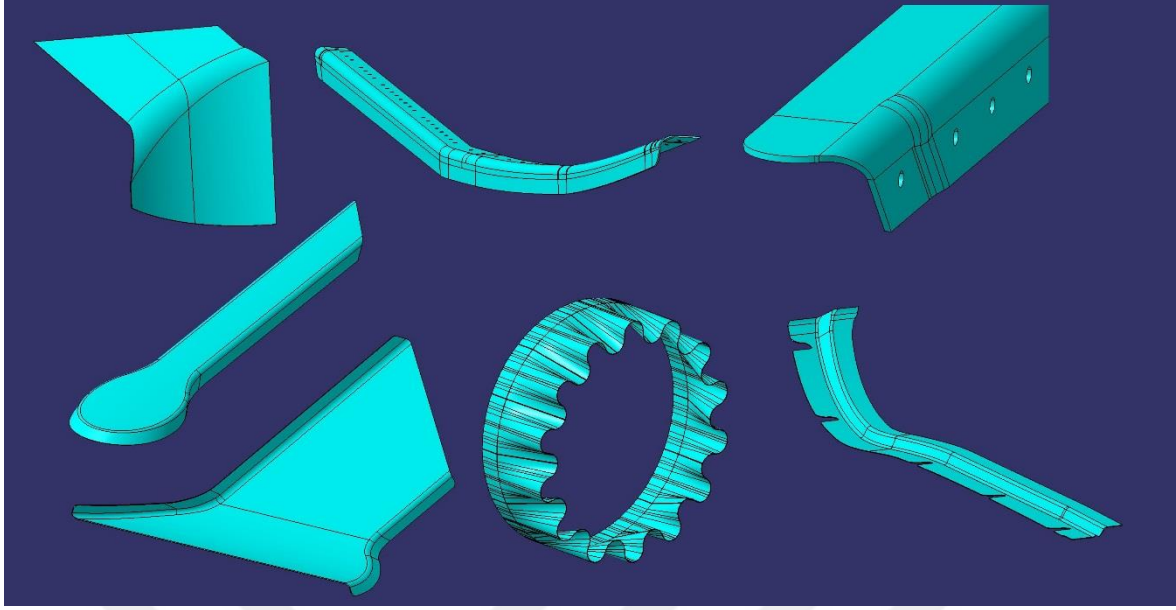
Çizelge 1.1. Uçak Parçalarına Ait Genel Tolerans Değerleri

Yüzey	 1.5	A	B	C
Parça Kenarı	 2	A	B	C
Delik Konum	 Ø2	A	B	C
Karşılıklı Flanş	$\pm 2.5^\circ$			
Karşılıksız Flanş	$\pm 5^\circ$			
Büküm Yarıçapı	$0.5 < r \leq 2 \Rightarrow$			$\pm 0.2$
	$2 < r \leq 9 \Rightarrow$			$\pm 0.5$
	$9 < r \leq 12 \Rightarrow$			$\pm 1.5$
	$12 < r \leq 60 \Rightarrow$			$\pm 3$

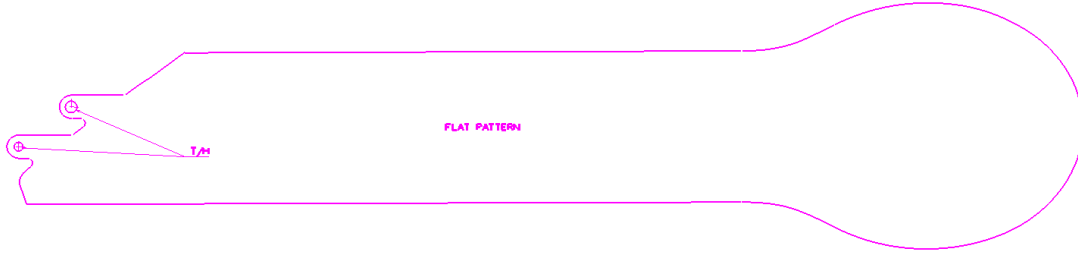


Şekil 1.2. Örnek Uçak Parçası

Sektördeki parçalar aerodinamik yüzey, Şekil 1.2 de gösterildiği gibi çeşitli bağlantı gereksinimleri, mukavemet, titreşim, gibi sebeplerle birbirinden farklı geometrilere ve kalınlıklara sahiplerdir. Şekil 1.3 te çeşitli uçak parçalarına ait parçalar görülebilir. Sahip oldukları bu geometriler sebebiyle konvansiyonel pres tezgahlarında üretilmesi mümkün olmamaktadır. İmalat yöntemi olarak diyaframla hidrolik şekillendirme veya hidrolik preslerde mümkün olmaktadır.



Şekil 1.3. Çeşitli form parçaları –süper alaşım-



Şekil 1.4. Örnek açılıma ait dxf dosyası

Diyaframla hidrolik şekillendirme, Flexform olarak da adlandırılır. İmalat süreci olarak süreçte erkek veya dişi bir kalıp üzerine Şekil 1.4 te görüldüğü gibi bir açılımla kesilen iş parçası koyulduktan sonra içi yağ dolu kauçuk bir diyaframın altında sürülerek hidrolik yağ basıncı ile şekillendirilir.

İş parçası üzerindeki form yükleri kalktıktan sonra meydana gelen istenmeyen şekil değişimine geri esneme denir, büküm hattındaki bazı bölgelerin elastik deformasyona maruz kalıp yük kalktıktan sonra eski haline geri dönme isteği olarak da nitelendirilebilir.. İstenmemesinin sebebi ise kalıp ile iş parçası arasında geometri farklılığı oluşmasıdır. Geri esneme kalıp ile kalıptan çıkan iş parçası arasında bir geometri farkı oluşturur. Bu fark bariz olarak flanşlarda açılmal olarak kendini göstermektedir.

Örnek verecek olursak  $90^\circ$ 'ye bükülmek istenen iş parçası, geometrisi ve malzeme cinsi sebebiyle bu açısız değerden uzaklaşabilir.

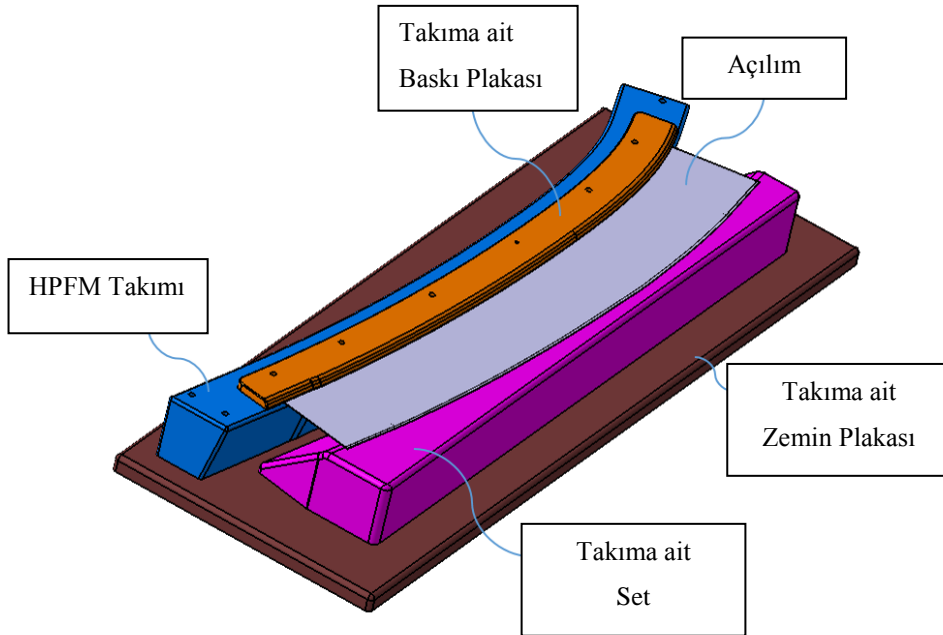
Bu açısız değeri etkileyen en büyük parametreler ise

- ❖ İş parçası kalınlığı / büküm yarıçapı oranı-  $t/R$
- ❖ Malzeme cinsi.

İş parçası ile kalıp arasındaki açısız farkın önceden tahmin edilerek, kalıp tasarım aşamasında bir girdi olarak kullanılması gerekmektedir.

Bu çalışmada Inconel 625 malzemesi için literatürde bulunan çalışmalar ve imalat süreçlerine ait bilgi birikiminden yola çıkarak geri esneme değerlerinin tespiti için 3 farklı yaklaşım incelenmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu yaklaşımlar sırasıyla;

- ❖ Analitik olarak geri esneme değerinin tespiti.
- ❖ Deneysel olarak geri esneme değerinin tespiti
- ❖ Sonlu Elemanlar Yöntemi ile geri esneme değerinin tespitidir.



Şekil 1.5. Kalıp tasarımı

Eğer kalıp geri esneme göz önüne alınmadan tasarlanırsa imal edilecek parçaların formları istenilen şekilde olmayacak ve ayrıca bir düzeltme gerektirecektir, bu kalıpları tekrar işlem görmesine ve sürecin deneme yanılma yöntemi ile ilerlemesine sebep olacaktır. Bu durum çalışma sürelerini arttırdığından, kalıp tasarımının tek seferde uygun geometride parça üretmesi beklenmektedir.

### Araştırmanın önemi

Kalıp tasarımı yaparken sırasıyla iş parçasına ait malzeme, formu, büküm yarıçapı ve kalınlığı dikkate alınır. Buna ek olarak geri esneme açısı da kalıp yapılmadan önce kalıba tayin edilmek durumundadır. Tayin edilemediği durumlarda kalıba herhangi bir açı vermeden ile aynı şekilde tasarlanarak çıkan iş parçasının esnemesine göre bir kalıp tekrar bir tasarım ve imalat sürecinden geçer. Geri dönüşlere dayalı takım tasarım ve imalat döngüsü proje takvimlerini aksattığından ve maliyeti arttırdığından kalıplara doğru açıların verilmesi büyük önem arz etmektedir.

Bu araştırma sonucu Inconel 625'in geri esneme davranışının tespiti ile için yapılacak çalışmalarda

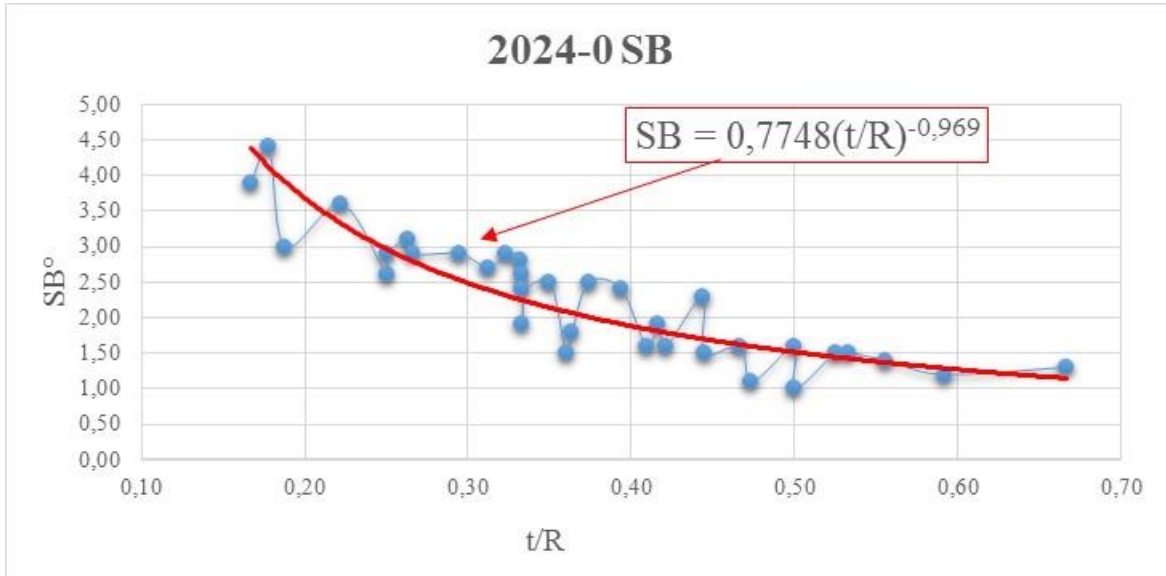
- ❖ Inconel 625 e ait gerilim-gerinim grafiğinin matematiksel olarak eldesi
- ❖ Inconel 625 e ait geri esneme açılarının tespiti
- ❖ Geri esneme davranışının tespiti için deneysel bir yöntem tespiti
- ❖ Deneme kalıbı sayesinde farklı malzemeler için geri esneme değerlerinin tespiti
- ❖ Farklı büküm açılarında geri esnemenin açı ile ilişkisi gibi kazanımlar

Elde edilebilecektir.

Çizelge 1.2. Alüminyum 2024-0'a ait geri esneme tablosu

2024-0								
İş Parçası Kalınlığı(t)	İş parçasına Ait Büküm Yarıçapı(R)							
	0.03"	0.06"	0.09"	0.12"	0.16"	0.19"	0.22"	0.25"
0.016"	1.5°	2.9°	4.4°					
0.020"		2.6°	3.6°	3.9°				
0.030"		1.6°	1.9°	2.6°	3°			
0.040"		1.3	1.5°	2.4°	2.9°			
0.050"			1.4°	1.9°	2.7°	3.1°		
0.056"				1.6°	2.5°	2.9°		
0.063"				1.5°	2.4°	2.8°		
0.071"				1.6°	2.3°	2.5°	2.9°	
0.080"					1°	1.6°	1.8°	
0.09"						1.1°	1.6°	1.5°

Literatürde alüminyum gibi havacılık sanayisinde sıklıkla kullanılan malzemelere ait t/R değerlerine bağlı SB değerleri Çizelge 1.2 de görüldüğü gibi tablo halinde bulunmaktadır., Bu değerler t/R ve SB bağlı bir grafik haline getirildiğinde ise;



Şekil 1.6 Alüminyum 2024-0 malzeme için geri esneme grafiği

Çizelge 1.2 deki değerler Şekil 1.5 teki bir grafiğe dönüştürüldüğünde lineer regresyon yaparak SB'yi t ve R'ye bağlayan empirik bir denklem elde etmiş oluruz.

$$\theta_{SB_{2024-0}} = 0,7748\left(\frac{t}{R}\right)^{-0,969} \quad (1.1)$$

Formül 1.1 de alüminyum 2024-0 malzeme için oluşturulan empirik denklemin Inconel 625 için de tespit edilmesi kalıp tasarım aşamasında ve imalat öncesinde, kalıp tasarımcı ve imalat mühendisleri açısından şekillendirme aşamasında yol gösterici nitelikte olacaktır. Ayrıca bu malzeme için elde edilecek bilgi birikimi sayesinde farklı malzemelerin geri esneme davranışı için de deneyler ve modellemeler yapılabilecektir.

### Varsayımlar

Sonlu elemanlar analizi yapılırken diyaframa ait malzeme doğal kauçuk (NR) olacak şekilde modellenmiştir. Diğer uçak parçaları analizlerinde de bu şekilde modelleme yapıldığından, geri esnemenin kauçuk örtünün sertliği ile değişmediği varsayımı yapılmıştır.





## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Geri esneme davranışı sac metal imalat sürecinden beri var olmasına rağmen 1940'lara kadar bu konu ile ilgili herhangi bir çalışma yapılmamıştı.

Geri esneme ile ilgili yapılan çalışmalarda ortak nokta, geri esnemenin şekillendirme işlemi sonrası istemeyen şekil değişimi olarak tanımlanmasıdır. Bu istemeyen değişim eğer önceden tahmin edilemezse iş parçasının istenilen niteliklere uymamasına sebep olacaktır. Bu da teknik gereksinimlere göre bir ölçünün eksik yada fazla olmasına sebep olacaktır.

Özellikle geometrisi konvansiyonel preslerde imal edilmeye müsait olmayan malzemesi süper alaşım veya çelik olan uçak parçaları için diyaframla şekillendirme yöntemi düşük üretim adedi ve yüksek parça çeşitliliği bakımından en uygun imalat çözümüdür. Diyaframla hidrolik şekillendirme literatürde bilinen bir yöntem olmasına rağmen bu parçaların form işleminde kalıp tasarımlarında karşılaşılan zorluklar ile ilgili yapılan çalışmalarda süper alaşımların geri esnemesi ile ilgili kalıp tasarımına girdi olabilecek açısıl bir geri esneme değerine rastlanmamıştır.

Bu geri esneme değerlerinin malzeme cinsine, kalınlığına ve iş parçasının büküm yarıçapına bağlı olduğu, matematiksel bağlantılar sac metal şekillendirme kitaplarında görülebilmektedir. Marciniak bükümün 2 boyutlu olarak matematiksel modellenmesinde öncü olmuştur, oluşturduğu matematiksel modelde ise eğme momentinden hareketle sac metal üzerinde meydana gelen gerilmeleri incelemiştir. Analitik hesaplarda bu matematiksel modeller referans alınmıştır. [1,2]

R.H. Wagoer, J.F. Wang ve M.Li'nin Springback makalesinde ise eğme momentini kullanarak, iş parçasına ait büküm yarıçapı ile form sonrası iş parçasının yarıçapı farkını eğme momentine bağlamışlardır. Bu davranışın tespiti için şekillendirilen malzemenin gerinim-gerilim denklemini de kapsayacak şekilde modellemişlerdir. Oluşturdukları modellemede büküme etki eden parametrelerin her birinin etkisini ayrı ayrı incelenmiş ve sonlu elemanlar analizleri ile desteklenmişlerdir. Fakat imalat bakımından brake pres ile diyaframla şekillendirme olarak bir ayrım yapmamışlardır. [3]

Gerri esneme tabloları ise daha yüksek üretim adetlerine sahip malzemeler için –Alüminyum 2024- mevcut iken geri esneme değeri açışal olarak 10° üzerine çıkan süper alaşımlar için mevcut değildir.

P.Kulkarni farklı alüminyum alaşımları için  $t/R$ 'ye bağılı olarak 90° bükümler için empirik formülleri içeren bir bilgisayar programı yazıp patentini almıştır. Aldıkları bu patent ile geri esneme davranışını farklı alüminyum malzemeler için tahmin etmişlerdir.[4]

L.Chen ise farklı kalınlıklarda ve büküm yarıçaplarındaki örnekleri farklı basınç ve tutma süreleri ile denemiş  $R/t$  oranı 2 ve üzeri olduğunda geri esnemenin azaldığını form basıncının ve süresinin bir noktadan sonra geri esneme üzerinde etkisiz kaldığını sonlu elemanlar analizleri ile göstermiştir. Ayrıca form edilmesi zor parçaları diyafram malzemesi olarak poliüretan ile şekillendirildiğinde daha iyi sonuçlar aldığını göstermiştir. Ek olarak kalınlık arttıkça geri esnemenin azaldığını, büküm yarıçapı arttıkça da geri esnemenin azaldığını göstermiştir.[5]

Deneysel yöntem olarak C. Aydoğan yaklaşımı referans alınmıştır. İmalat sürecinde uçak parça tasarımlarında karşılaşılan büküm yarıçaplarından oluşan bir kalıp tasarlanıp bu kalıp üzerinde farklı kalınlıktaki deney numunelerinin sadece büküm yarıçapına ve kalınlığa bağılı değişimi sebebiyle geri esneme açısının davranışı incelenmiştir. Deneme kalıbı farklı yarıçaplarda bükümlere izin verecek biçimde tasarlanmıştır. Deneme kalıbı yüksekliği, kalıp yerleşimi gibi parametreler bu çalışmalardan referans alınmıştır.

C. Aydoğan titanyum için farklı büküm yarıçapları ve büküm açılarında titanyumun davranışını incelemiştir.[6]

H.Lim yüksek mukavemetli çelikler üzerine geri esnemenin zaman üzerindeki etkisini incelemiş sonuçlarını alüminyum ile karşılaştırmış ve malzemenin elastik modülü ve akma danacı arttıkça zaman içerisinde daha fazla geri yaylandığını gözlemlemiştir.  $t/R$  oranı, form kuvveti gibi parametrelerin etkisinden bahsetmiştir. Malzemenin anizotropik oluşunun geri esnemeye büyük bir etkisi olmadığını hem deneysel hem de sonlu elemanlar analizi ile göstermiştir.[7]

T.de Souza,B.F. Rolfe Geri esnemeyi etkileyen parametreler üzerine çalışmış form basıncı, iş parçası ile kalıp arasındaki sürtünme katsayısı ve büküm yarıçapı, elastik modül ve flow-curve gibi parametreleri farklı malzemeler için deneyerek, sonlu elemanlar analizi yapmış, yaptığı çalışmalar sonucunda takıma ait yarıçap küçüldükçe daha az geri esneme olduğunu tespit etti, akma noktasının artmasının geri esneme açısını arttırdığını gösterdi.[8]

S.Konzack ,3 boyutlu da forma sahip bir sac metal parçayı Yoshida matematiksel modeli ile incelemiş ve bu parçayı şekillendirilen presin tutma süreleri üzerinde FEM ortamında çeşitli deneyler yapmıştır. Deneylerden elde ettiği sonuçlarda kullandığı elastik modülden elde ettiği sonuçlar ışığında şekillendirilirken elastik modülü sabit alınmaması gerektiğini göstermiştir. Çeşitli denemeler ile form sürecini iyileştirmiş düzlemsel yöndeki geri esneme ve dalgalanmayı almış fakat dikey kesitteki geri esneme davranışına çok büyük bir fark getirememiştir.[9]

N.Vajragupta,H.ul.Hassan,A.Hartmanier Mikromekanik sayısal bir modelleme ile U-parçalardaki bükümü Yoshida-Uemari modeli ile incelemiştir,Grain-sizelerin düzgün modellemesi ile fem analizlerinde daha doğru sonuçlar alınacağını göstermiştir.[10]

B.Li ve çalışma arkadaşları, magnezyum alaşımları üzerinde yaptığı çalışmalar neticesinde geri esnemenin şekillendirildikten 5 ay sonra bile değişebileceğini göstermiştir. 1 ay içerisinde farklı zaman aralıklarında yapılan ölçümler neticesinde geri esnemenin ilk 1 ay içerisinde non-linear olarak değiştiğini göstermiştir.[11]

F.Zhang, Merdaneden geçirilerek bükülen endüstriyel plakaların geri esneme sebebiyle merdane sırasını tespit etmeye çalışmış, merdanelerin sırasını değiştirmenin geri esnemeye bir etkisi olmadığını göstermiştir. Uygulanan kuvvetinde artışıyla geri esnemeyi değiştirmedeğini göstermiştir.[12]

A.Quadfasel yüksek magnezyum içeren çeliklere ait U-Profillerde geri esneme davranışını incelemiş, form kuvvetinin artmasıyla geri esnemenin azaldığından bahsetmiştir.[13]

Y.Hou ve diğer çalışma arkadaşları malzemelerin geri esneme davranışını farklı matematiksel yaklaşımlar deneyerek Hill 48,Barlat 89,Barlat 2000 yaklaşımlarının farkını Fem ortamında LS-dyna üzerinden denemiştir. Barlat 2000 (m=8) olduğu durumda Yoshida

modeli ile uyumlu olduğunu göstermiştir [14].

H.palaniswamy Fem analizi ile konik şekildeki bir parçanın diyafram altında şekillendirilirken şekillendirilmesi için kesilen parçanın kesim şekli üzerinde denemeler yapmış en ideal kesim şeklini belirleyip malzemenin kalıp üzerinde form davranışını da dikkate alarak %40 oranında geri esnemeyi azaltmış [15].

M.S.Gupta ise V-büküm Abkant-Presler için Fem modellemiş geri esnemenin büküm açısı arttığında arttığını göstermiştir [16].

H. A. Hatipoğlu ise alüminyum alaşımlarının geri esneme davranışını incelemiş ve form diyagramlarını ortaya koymuştur. Sonlu elemanlar yöntemi ile fiziksel deney sonuçları karşılaştırmış bu yaklaşım hem deneysel hem de ilerleyen çalışmalarda yapılabilecek sonlu elemanları analizi için bir rota niteliğinde olmuştur.

### 3. DİYAFRAMLA ŞEKİLLENDİRME TEZGAHI

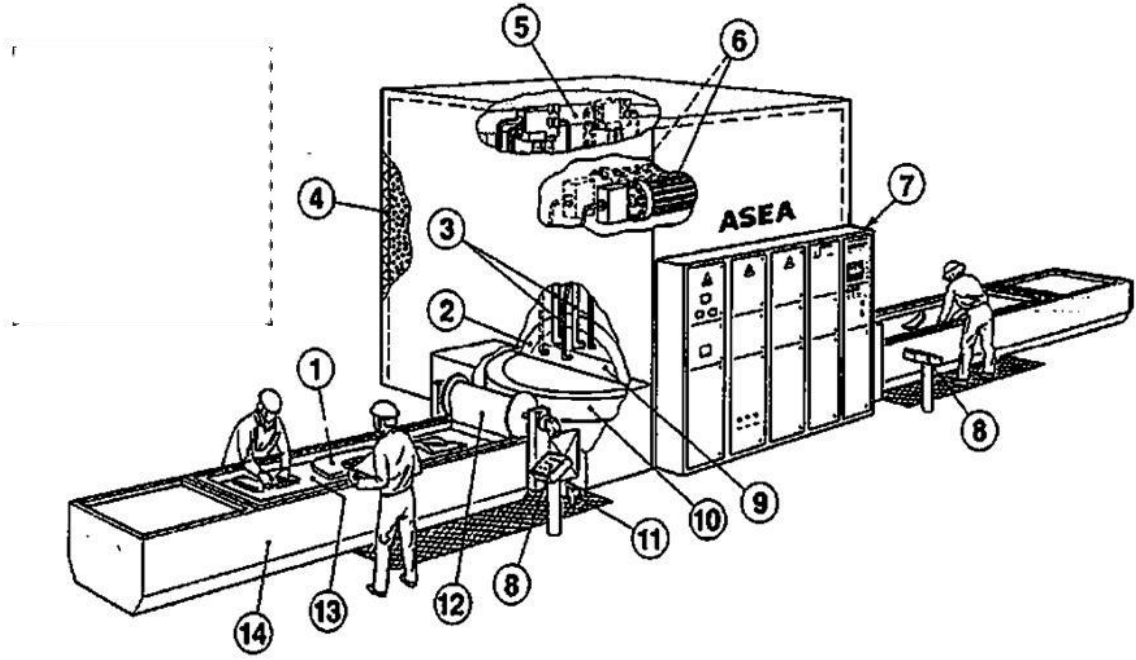
Flexform veya yüksek basınçla diyaframla şekillendirme küçük ve orta ölçekli seriler için modern sac metal şekillendirme yöntemidir.



Resim 3.1. Flexform tezgâhı

Diyaframın esnek olması ve sıvı basıncının eşit dağılımı sebebiyle iş parçası altındaki girintileri azaltarak, tekrarlanabilirliği artırır.

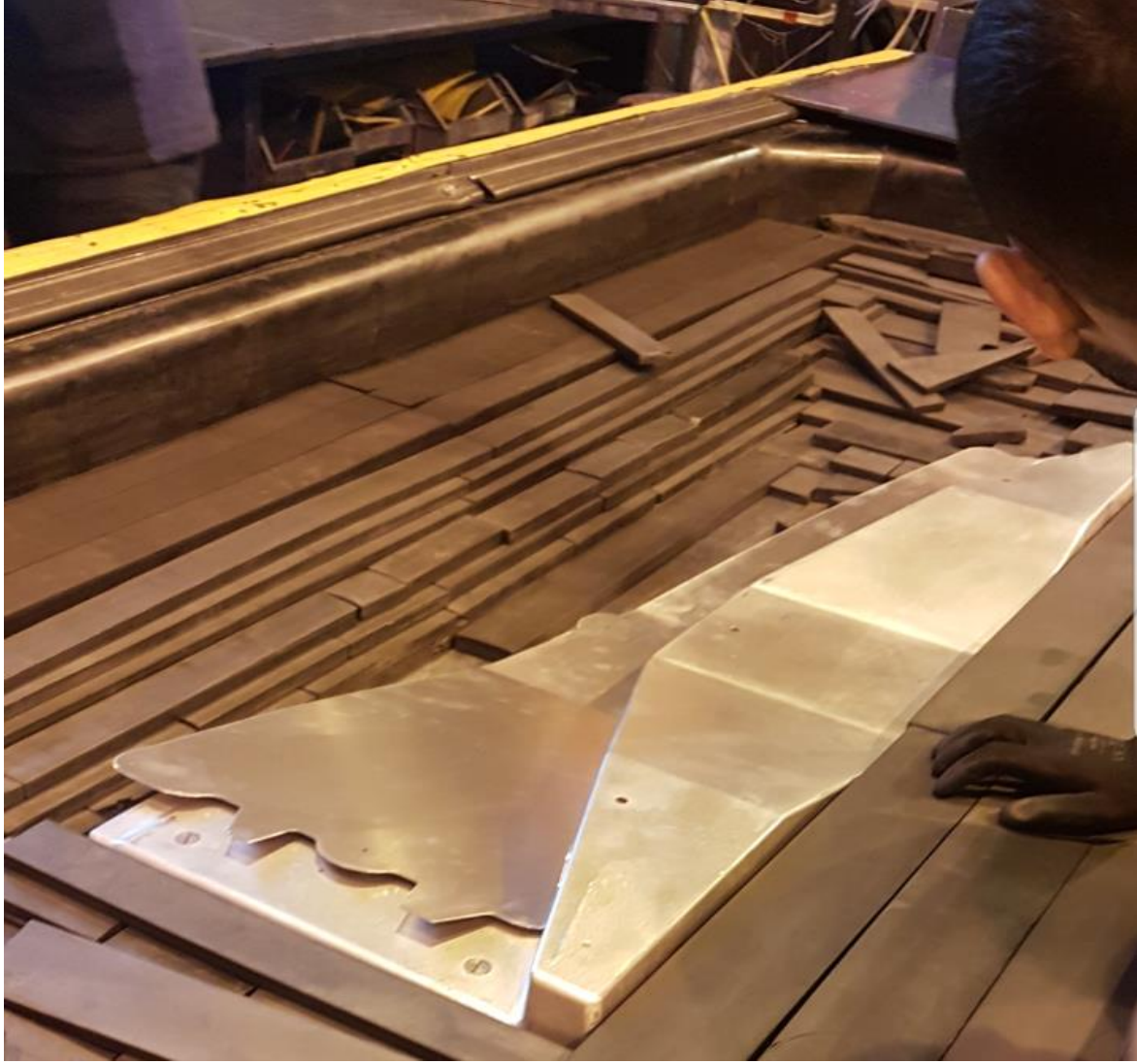
Sac metallerin şekillendirilmesindeki gereksinimler, geometrilerin daha karmaşık hale gelmesi, malzemelerin fiziksel özelliklerinin düzenli olarak gelişmesi sebebiyle giderek artmaktadır. Karmaşık geometrileri orta ölçekli olarak düşük kalıp ve işçilik maliyeti ile üretebilmek için imalat yöntemi olarak diyaframla hidrolik şekillendirme karşımıza çıkar.



Şekil 3.1. Flexform tezgâhı

Akışkan hücreler ile şekillendirme olarak da adlandırılan bu şekil verme işlemi, hem prototip hem de düşük parça adedindeki parçalar için düşük maliyet sunar. İş parçası dişi veya erkek kalıbın üzerine yerleştirildikten sonra içi Hint yağı dolu olan kauçuk bir diyaframın altına doğru kaydırılır. Diyaframın içerisindeki yağ basıncı kademeli olarak arttırarak maksimum 140 Mpa veya 72000 Tonluk bir kuvvete erişerek iş parçasına kalıba göre şekillendirir.

Kullanılan tezgah ABB-Asea Brown Boveri- Quintus Press QFC 1.2X3-1400 modelidir. 1.2metre x 3metre şekillendirme alanı bulunmaktadır. Diyafram içerisindeki Hint yağı, hint fasulyelerinden elde edilir, bu yağ sağlık sektöründe çeşitlendirilebilirliğinin kolay olması ve imalat sanayisinde hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda düğer bitki bazlı yağlara göre viskozitesini kaybetmemesi sebebiyle sıkça kullanılır.  $10^0\text{C}$ 'de 2.42kg/ms dinamik viskozitesi vardır. Fakat bu yağın kısa zamanda yabancı maddeler sebebiyle viskozite artışına eğilimi vardır. Ayrıca bu yağ doğal kauçuk ile tepkimeye girmediğinden tercih sebebidir.

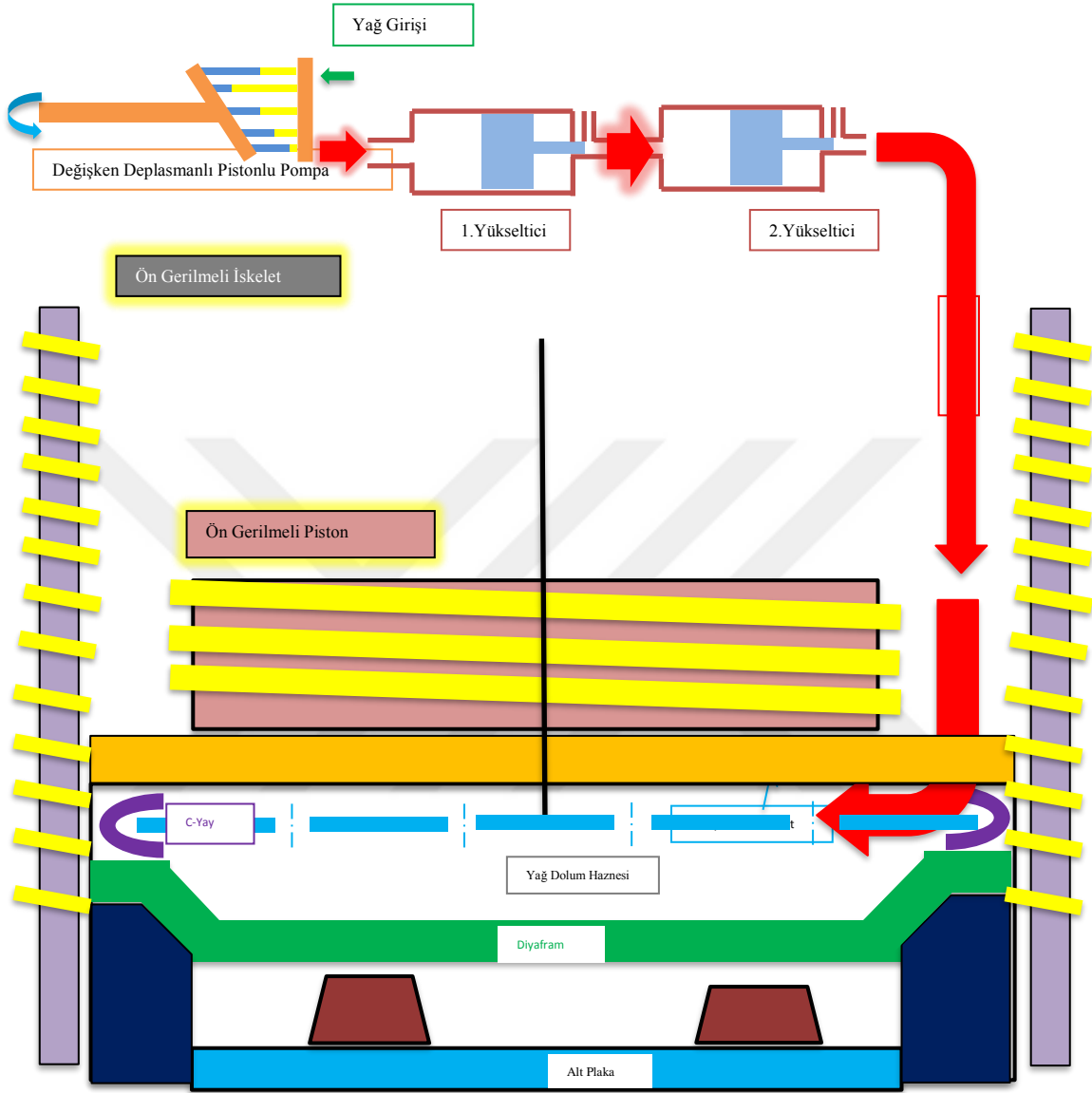


Resim 3.2. Derin bir iş parçası form edilirken.

İş parçası şekillendirilirken, diyafram esnek olduğundan dolayı kalıbın üstünü sıvayarak dişi ya da erkek kalıp üzerinde ikinci bir karşılık kalıba ihtiyaç duymadan parçaları şekillendirebilir. Resim 3.3 te görüldüğü gibi derin bir parça geldiğinde bu iş parçası hem şekillendirme hem de tezgâh içerisindeki diyaframa zarar vermeden yerleştirilmeli ve etrafına kauçuklar ile besleme yapıp diyaframın keskin kenarlar ile teması en aza indirilmelidir.



### 3.1. Tezgâhın Çalışma Prensibi



Şekil 3.2. Tezgah kesit görüntüsü

Hint yağı bir pompa yardımı ile yağ dolum haznesine gönderilir, yağ dolum haznesi dolduktan sonra 2 adet yükseltici vasıtasıyla yağ basıncı 80 bara kadar çıkarılır.

Yüksek basınçlı silindir, yüksek dayanımlı çelikten dövme yoluyla imal edilmiştir. Etrafında soğuk haddelenmiş dikdörtgen kesitli bir çelik halatla sarılı olarak merkez silindir üzerine bir ön stres uygulanır. Çelik halatın yarattığı stres sayesinde piston elastik olarak uzamış haldedir. Ana silindirde basınç geldiğinde ön gerilme sayesinde kendine bir güvenli bölge oluşturur. Sarılmış çelik halatın en büyük avantajı ani basınç değişimleri sebebiyle ani patlama veya tezgâha binen yüklerin yarattığı riskini minimuma indirmesidir. Bu özelliği



sayesinde diyaframın yırtılması, kalıbın kırılması gibi risklere karşı bir önlemdir. Dövme ile imal edilen silindirin yüksek mukavemetinden dolayı ve çilindir etrafına sarılı çelik halatlardan dolayı aynı anda aynı yerlerden kırılmanın önüne geçilir.

Halat katmanları eksenleri boyunca ince bir çelik sac yardımıyla sınırlandırılır böylece halatlar korunmuş olur. Böylece tezgâh silindirine önceden bir ön yük verilerek bası streslerine karşı bir ön koruma ve tezgâh boyutlarında ve yapısında daha kompakt bir yapı elde edilir.

Eksenel iskelet bası yükünü taşınabilir tezgâh arabalarına aktarır. 2 sütun tarafından tutulan 2 adet yarı silindir kancasından oluşur. Ana silindir gibi aksnel iskelet de çelik halatlar tarafından sarılıdır.

Baskı plakası, doğal kauçuktan olan bir diyaframa sabitlenmiştir. Tüm ünite yan raylar tarafından desteklenir. Diyafram sızdırmazlık elemanı olarak diyafram kenarlarında metal C şeklindeki yaylar kullanır. Köşe ve ray kaynaklı kaçakları önlemek için her köşesinde bloklar vardır. Bu bloklar sayesinde diyaframın duvar kenarlarından ve yan destek raylarından şişmesi engellenir.

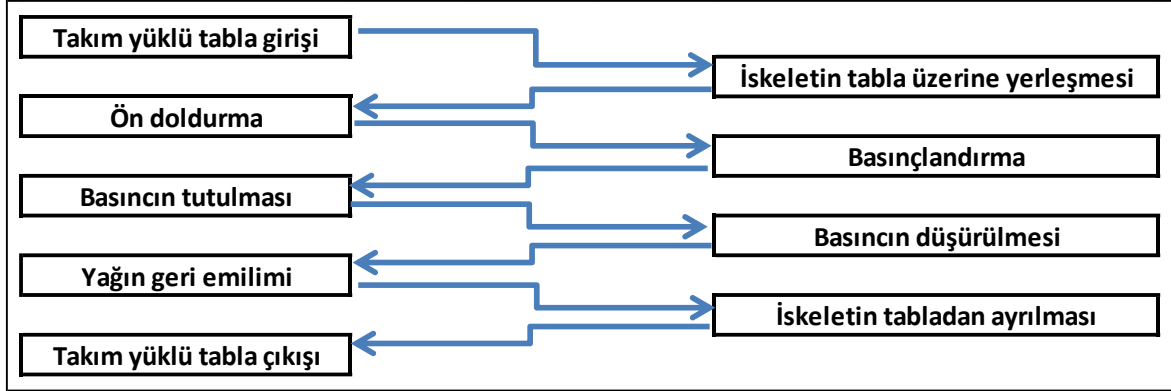
Tabla prese sürüldüğünde tabla ile tezgâha ait baskı plakası arasında halen boşluk vardır, diyaframın bu boşlukta dışarıya doğru şişmesini engellemek için sabitleme barları devreye girer.

Düşük basınçlı yağ dikey borular tarafından üst depoyu doldurur daha sonrasında dikey valfler yardımıyla baskı plakasına ve son olarak da diyaframın iç yüzeyine aktarılır. Yüksek basınçlı yağ direkt olarak akışkan hücreye ayrı bir dikey boru tarafından aktarılır.

Kalıpları veya takımların üzerine yerleştirildiği ve tezgâhın içine sürülen aksama tabla denir. Tezgâhın iki yanında bulunan tablalar, bir taraf tezgâhta şekillendirilirken diğer tarafta bir sonraki iş planlanmasını sağlar. Aksnel iskelet altında basınçlandırma süreci boyunca aksnel iskelete bağlı kalarak diyafram ve tezgâh ile birleşir. Bazı durumlarda diyaframın fazla uzamasını engellemek ve böylece diyaframın ömrünü uzatmak için tabla üzerine plakalar yerleştirilerek diyaframın form derinliği azaltılır. Uygulamadan uygulamaya değişiklik gösterir. Form derinliğine ihtiyaç duyulan durumlarda ofset plakaları kullanılmaz.

Tabla altında bulunan zincirli tahrik mekanizması sayesinde tablalar hareket ettirilir. Tabla üzerine yerleştirilen kalıplar genellikle tezgâh tablasının alanının %30-50 civarındadır.

Yüksek basınçlı hidrolik sistem,2 adet ön doldurma pompası ve yüksek basınçlı yükselticilerden oluşur. Pilot pompa ise valfler ve diğer hareket ettirilebilir mekanizmalar içinde güç bu pompa sayesinde tahrik verilir.



Şekil 3.3. Operasyon sırası

### 3.2. Tezgâh ile İlgili Önemli Noktalar

Diyaframa yapılan kalıp yerleşiminde kalıpların keskin kenarları ve diğer girinti ve çıkıntılar diyaframın aşırı uzamasını önleyecek şekilde yerleştirilmelidir.

Kalıplar arasında boşluk olmalı böylece tüm parçaları doğru bir şekilde sıvayabilir.

Ofset plakaları sadece derin bir form işlemi gerektiğinde kaldırılmalı diğer durumlarda tezgâh içerisinde her daim kalmalı. Kalıpların tabla üzerine yerleşimi tezgâhın yapısını veya form kapasitesini etkilememektedir.

Tezgâh içerisindeki basınç kalıpların yerleşiminden veya yüksekliğinden etkilenmemektedir, fakat uzun flanşlar verimsiz bir form işlemine sebep olabilmektedir.



Resim 3.3. Flexform tezgâhı bilgi ekranı

Form işleminde 1 çevrim yaklaşık olarak 3 dakika sürmektedir. Bu süreç boyunca yağ sıcaklığı, form basıncı ve yağ seviyesi gibi parametreler Resim 3.2 de gösterildiği gibi operatör tarafından sürekli takip altındadır. Yağ sıcaklığının 50<sup>0</sup>C üzerine çıkılmasına izin verilmez, bu sıcaklık artışı tezgâhta kritik bir arıza olduğuna işaret ettiği içindir..

### 3.3. Diyaframın Ömrünü Uzatmak İçin Yapılması Gerekenler

Diyaframın ömrü hem form kapasitesi hem de tezgâh ömrü ve maliyetler için göz önünde bulundurulması gereken en önemli faktörlerdendir. Diyaframın ömrünün kısalmasına sebep olan etmenler; aşırı uzama, diyafram kenarlarındaki uzamalardır. Diyaframın uzaması, kalıpların ve kauçuk doldurma şeritleri/plakalarının yerleşimi en etkili faktördür. Bu uzamanın önüne geçmek için uygulanacak ana prensip diyaframın gereksiz uzamasının önüne geçmektir.

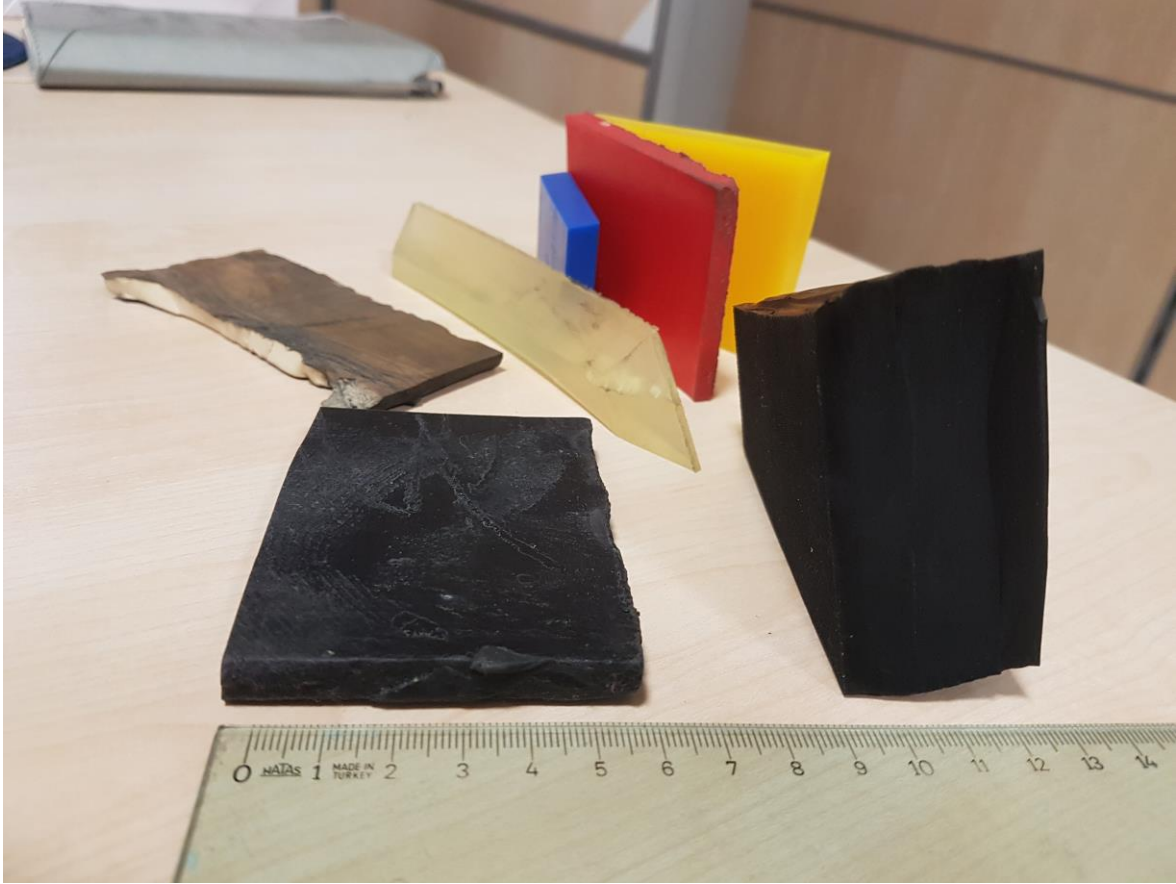
Kalıplar arası boşluk yüksek olan kalıbın en az yüksekliğinin 2 katı kadar arada boşluk olmalı, bloklar açılı duvarlara sahipse açılı duvar ile üst duvarın kesiştiği kenarların diğer kalıpla arasındaki mesafe yüksek olan kalıbın en az yüksekliğinin 2 katı olmalı.

Kalıp duvarı ile tabla duvarındaki boşluk mümkün olduğunda kauçuk şeritlerle doldurulmalı.

Yüksekliği fazla olan kalıplar daima diyaframa göre merkezi şekilde yerleştirilmelidir. Diyafram için en uygun durum ise tüm boşlukların kauçuk şeritlerle doldurulduğu durumdur. Ayrıca tabla kenarlarındaki uzamaların minimuma düşürülmesi için keskin geçişler mümkün olduğunca yumuşatılmalıdır.

Her takım ve form edilecek iş parçası için üst örtü gerekmektedir, Bu örtü hem takımı hem de iş parçasını yeteri kadar örtecek genişlikte olmalıdır.

Bu örtünün esas amacı tablanın üzerine örtülen aşınma örtüsünün ömrünün uzamasına yardımcı olur, diyaframa ise dolaylı yoldan uzamasını düşürdüğü için onun da ömrünü uzatmış olur.



Resim 3.4. Tezgâhta kullanılan kauçuk örtü örnekleri

Üst örtünün sertliği form edilecek durumlara göre özenle seçilmelidir. Genellikle bu örtünün kalınlığı 10-20 mm arasında olmalıdır. Kalın üst örtüler kalıpların kenarındaki keskin geçişleri yumuşatmak için kullanılmalıdır.

Çizelge 3.1. Kauçuk örtü sertlikleri

Renk	Beyaz	Doğal Kauçuk	Şeffaf	Mavi	Kırmızı	Siyah	Sarı
Kullanım Amacı	Karmaşık Parçalarda	Diyaframa ait Kauçuk 50 mm kalınlığında	Tabla üzerinde örtü olarak	90° üzeri bükümlerde	Genel amaçlı	Yırtılma Riski yüksek parçalarda	Kırımları Engellemek için
Sertlik (Shore A)	≈40	≈60	≈65	≈82	≈90	≈90	≈100

Çevrim zamanın düşürmek adına örnek olarak;100 MPa (14500 psi) da yağın sıkıştırılabilirliği %7 civarındadır diğer bir yandan kauçuk ise %4tür. Tablaya 200 kg veya 0.175 m<sup>3</sup> bir kauçuk yerleştirildiğinde 0.175 m<sup>3</sup> lük bir alanın yağ ile doldurulmayacağı anlamına gelmektedir. Bu da yaklaşık olarak 5 bir sıkıştırılabilirliğin pompa tarafından aktarılmayacağı anlamına gelir bu da genel olarak çevrim başına 2 sn olarak düşünülebilir.

Çukur (kavite) olan form takımlarında iş parçası ile kavitenin arasında kalan havayı tahliye etmek için kalıpların kavitesinin olduğu yerlere delik delinir. Kalıbın alt yüzeyi ise rastgele taranarak bu kaviteden gelen havanın kalıbın alt yüzeyinden dışarı çıkışı sağlanır.



#### 4. INCONEL 625 (AMS 5599) ALAŞIMI

İkinci dünya savaşı sonrasında jet motorlarının keşfi neticesinde türbin bıçaklarının paslanmaz çelikten imal edilmesi ve bu bıçakların yüksek sıcaklık ve basınç altında aşınması neticesinde bu şartlara dayanabilen bir malzeme arayışına gidilmiştir. Farklı reçetelerin denenmesi sonucu 1950'lerin sonunda hem türbin bıçakları için hem de buhar kazanları için mühendislik malzemesi olarak Inconel 625 , 24 Ocak 1962'de patent numarası #3.160.500 olarak H.L Eiselstein ve J.Gadbut malzemenin patenti ile geliştirilmiştir.



Resim 4.1. Örnek Inconel uçak parçaları

Hem askeri hem sivil uygulamalarda özellikle nükleer reaktörlerde, Alloy 600 buhar kazanları için vazgeçilmez bir malzemeydi. Bu malzemenin kızgın-saf su ortamında stres-korozyonuna karşı dayancıyla birlikte bu malzeme üzerindeki araştırma-geliştirmeler devam etti. Havacılık ve uzay sanayisinde Inconel 625 kritik mühendislik uygulamalarında sac, plaka, boru şeklinde yeri etmeye başladı.

Uzay ve havacılık sektöründe motor içi ve etrafındaki parçalarda yüksek sıcaklıklarda korozyon dayancı ve mukavemetini kaybetmediği, kaynak edilebilirliği kolay olduğu için kullanılan bir süper alaşımdır. Ticari olarak adı üreticiden üreticiye farklı olsa da AMS 5599'a göre Werkstoff # 2.4856, UNS06625, ISO NW662. olarak da adlandırılır.

#### 4.1. Kimyasal ve Mekanik Özellikler

Servis sıcaklığı yüksek olup bu sıcaklıklarda yaklaşık 980°C'e kadar- dayanç ve korozyon direnci isteyen uygulamalarda sıkça kullanılan bir alaşımdır. Atomik seviyede Ni-Cr matrisi içeriğindeki molibden ve niyobyum karbürler sayesinde ek bir ısıl işlem olmadan bu dayanıcı kazanmaktadır.

Isıl İşlem olarak gerilim giderme ve çözdürme tavlmasına tutulur, gerilim giderme kaynak sonrası, çözüldürme tavı ise karbürlerin matris içinde eşit dağılımı sağlamak için yapılır. Gerilim giderme imalat sonrası yapılabılırken bu malzeme için çözüldürme tavı üretici tarafından yapılmaktadır.

Deniz suyu içeren uygulamalarda pitting olmaması (yüzeydeki korozyon tabakasının bozulması sonucu korozyonun ilerlemesi), korozyonlu ortamda yorulma direncinin yüksek olması sebebiyle kimyasal işleme tesislerinde, havacılıkta ateş duvarı, rotor bıçakları, deniz uygulamalarında ve nükleer reaktörler mühendislik malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Çizelge 4.1. Inconel 625 özellikleri

Element	Min %	Maks %	Mekanik Özellikler
C	--	0.1	$\rho=8.44 \text{ gr/cm}^3$
Mn	--	0.5	$T_{\text{melt}}= 1290-1350^{\circ}\text{C}$
Si	--	0.5	$T^{\text{cv}}= -196^{\circ}\text{C}/ \text{HRc}=20$
P	--	0.015	Stres Alma Sıcaklığı 871°C
S	--	0.015	Çözüldürme Tavı 1093-1204°C
Cr	20	23	Sıcak Şekillendirme Limiti 1200°C
Mo	8	10	Sertleşebilirliği soğuk şekillendirme ile artar(FCC)
Nb	3,15	4,15	$M^{23}\text{C}^6$ CR-Zengin Karbür yapısı
Fe	--	5	Yüksek Korozyon Dayancı
Co	--	1	Stres Çatlağına Dayanıklı (Mo)
Ti	--	0.4	Bar, Rod, Plate, Sheet, Tube olarak bulunabilir.
Al	--	0.4	Charphy testine göre -196°C bile 49 Joule'luk tokluk.
Ni	--	Baz	Isotropik malzeme davranışı



## 4.2. Deformasyon Tipleri

Malzemenin matematiksel modellenmesi için hacmin korunumundan yola çıkarak;

$$d\varepsilon_1 = \frac{dl}{l} \quad d\varepsilon_2 = \frac{dw}{w} \quad d\varepsilon_3 = \frac{dt}{t} \quad (4.1)$$

$$d(lwt) = d(l_0w_0t_0) = 0 \quad (4.2)$$

$$dl \times wt + dw \times lt + dt \times wl = 0 \quad (4.3)$$

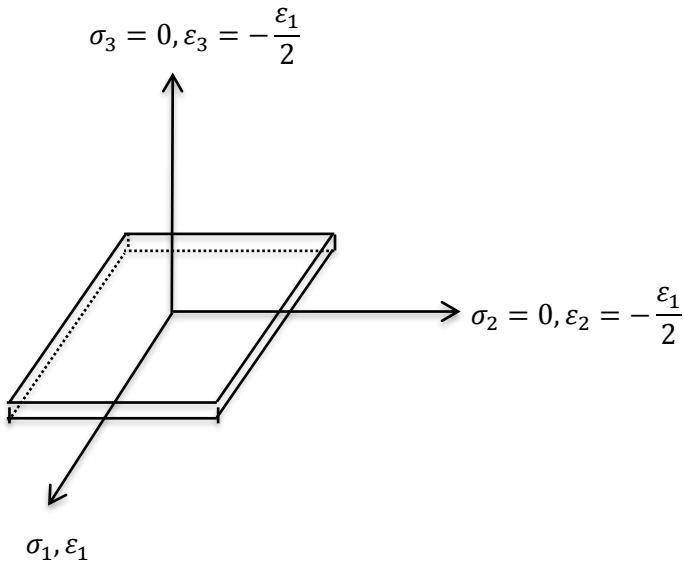
$$\frac{dl}{l} + \frac{dw}{w} + \frac{dt}{t} = 0 \quad (4.4)$$

$$d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 = 0 \quad (4.5)$$

İzotropik malzemeler için;

$$d\varepsilon_1 = \frac{dl}{l}, d\varepsilon_2 = -\frac{1}{2}d\varepsilon_1, d\varepsilon_3 = -\frac{1}{2}d\varepsilon_1 \quad (4.6)$$

$$\sigma_1 = \frac{P}{A}, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = 0 \quad (4.2.7)$$



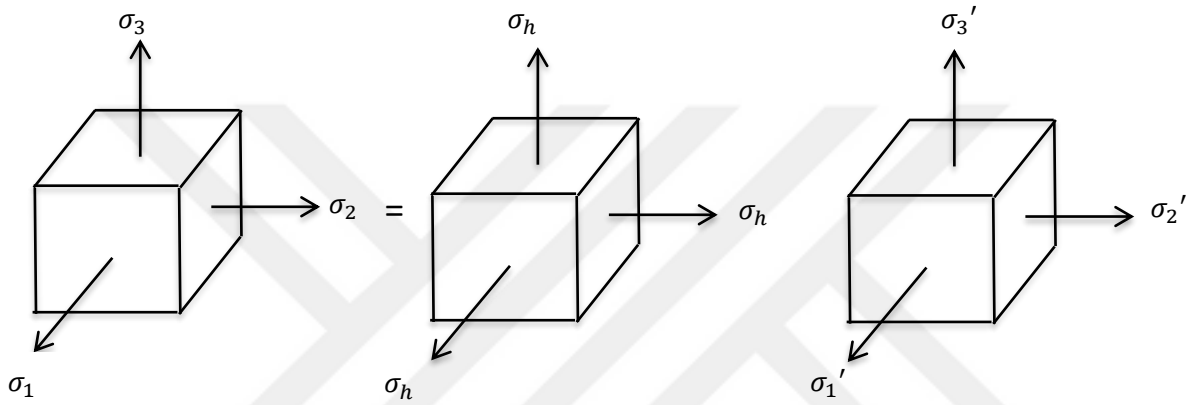
Şekil 4.1. Sac metalin birim elemanına ait serbest cisim diyagramı

$$\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 = \beta_1 \varepsilon_1 \quad \varepsilon_3 = (1 + \beta_1) \varepsilon_1 \quad (4.2.8)$$

$$\sigma_1 \quad \sigma_2 = \alpha_1 \sigma_1 \quad \sigma_3 = 0 \quad (4.2.9)$$

Tek yönlü çekme için;  $\alpha^1=0$   $\beta^1=-1/2$

$$\sigma_h = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (4.2.10)$$

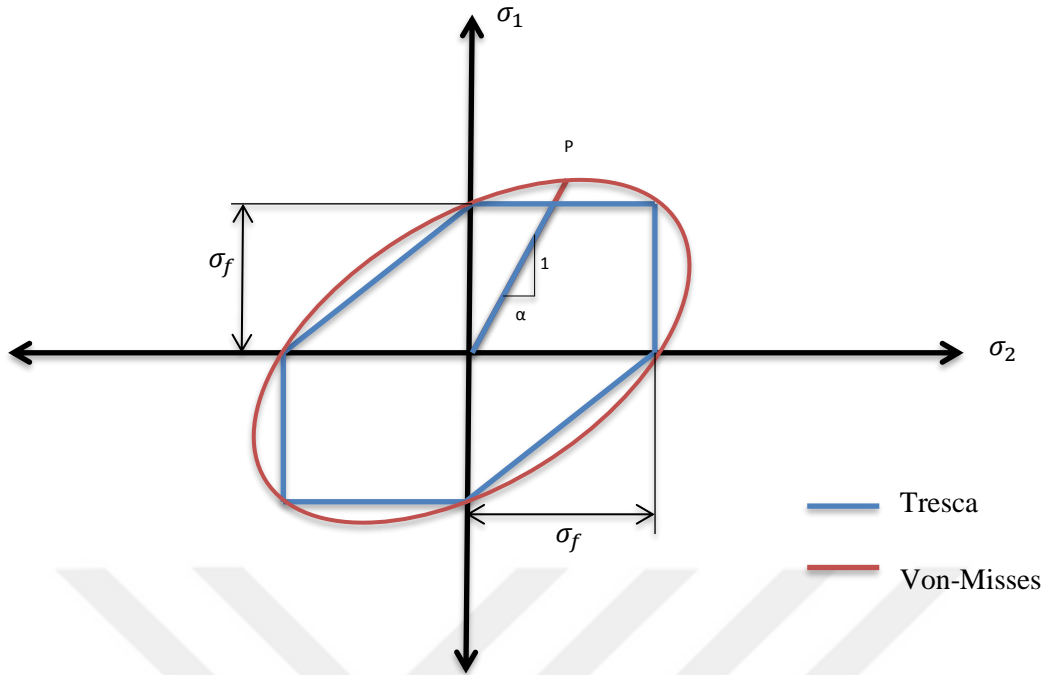


Şekil 4.2. Sac metalin birim elemanında gerilim dağılımı

Türetilmiş stresler;

$$\sigma_1' = \left(\frac{2-\alpha_1}{3}\right) \sigma_1 \quad \sigma_2' = \left(\frac{2\alpha_1-1}{3}\right) \sigma_1 \quad \sigma_3' = -\left(\frac{1+\alpha_1}{3}\right) \sigma_1 \quad (4.2.11)$$

Çekme testinde  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$



Şekil 4.3. Akma teoremleri

Tresca hipotezine göre akma kesmenin maksimum olduğu bölgede oluşur.

$$\tau_{crit.} = \sigma_0/2 \quad (4.2.12)$$

Tresca'ya göre herhangi bir süreçte akma;

$$\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{\sigma_0}{2} \quad (4.2.13)$$

$$\sqrt{\frac{\tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2}{3}} = \sqrt{\frac{2(\sigma_0/2)^2}{3}} \quad (4.2.14)$$

$$\sqrt{(\tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2)} = \sigma_0 \quad (4.2.15)$$

$$\sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_0 \quad (4.2.16)$$

$$\sigma_1' = (2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3)/3 \quad (4.2.17)$$

$$\sqrt{\frac{3}{2}(\sigma_1'^2 + \sigma_2'^2 + \sigma_3'^2)} = \sigma_0 \quad (4.2.18)$$

$$\sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} = (1 - \alpha_1 + \alpha_1^2)\sigma_1 = \sigma_0 \quad (4.2.19)$$

Levy-Mises akma kanunu

Bu kanuna göre gerinim artışları birbiri ile aynı orantıdadır.

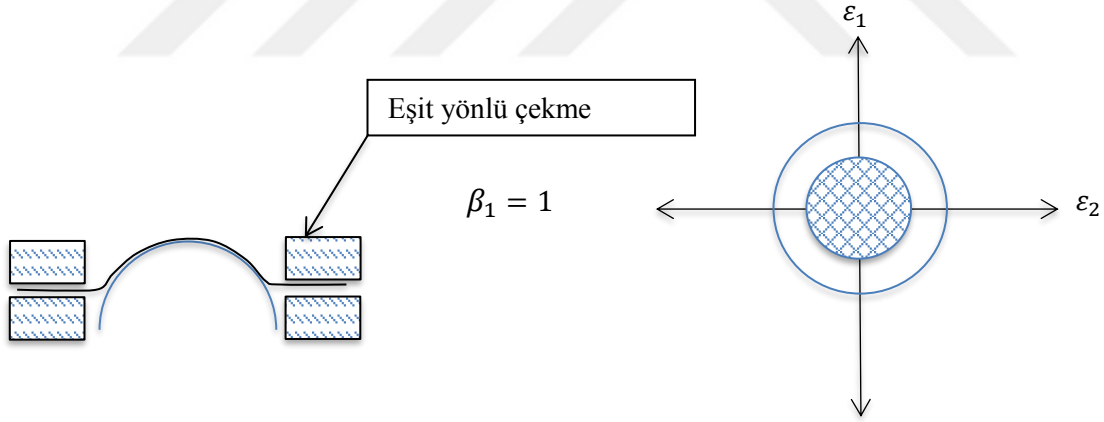
$$\frac{d\varepsilon_1}{\sigma_1'} = \frac{d\varepsilon_2}{\sigma_2'} = \frac{d\varepsilon_3}{\sigma_3'} \quad (4.2.20)$$

$$\frac{d\varepsilon_1}{2-\alpha_1} = \frac{d\varepsilon_2}{2\alpha_1-1} = \frac{d\varepsilon_3}{-(1+\alpha_1)} \quad (4.2.21)$$

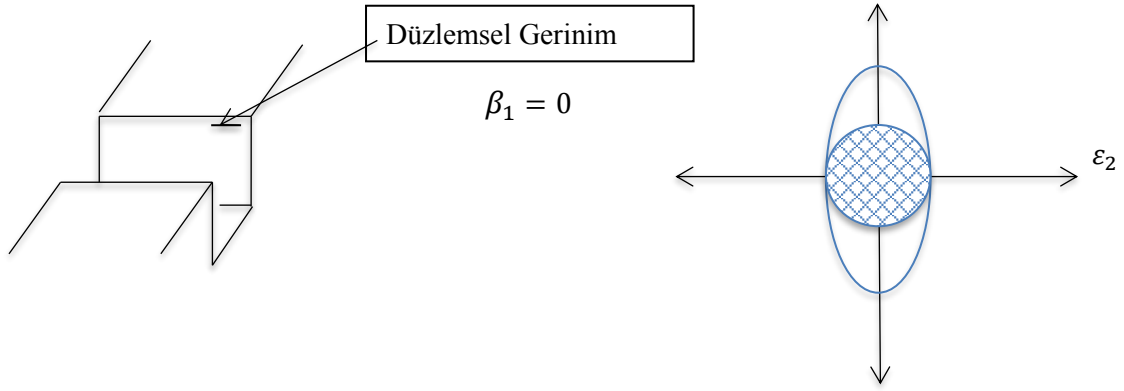
$$\frac{\varepsilon_1}{2-\alpha_1} = \frac{\varepsilon_2}{2\alpha_1-1} = \frac{\beta_1\varepsilon_1}{2\alpha_1-1} = \frac{\varepsilon_3}{-(1+\alpha_1)} = \frac{-(1+\beta_1)\varepsilon^n}{-(1+\alpha_1)} \quad (4.2.22)$$

Stress ve strain arasındaki bağlantı;

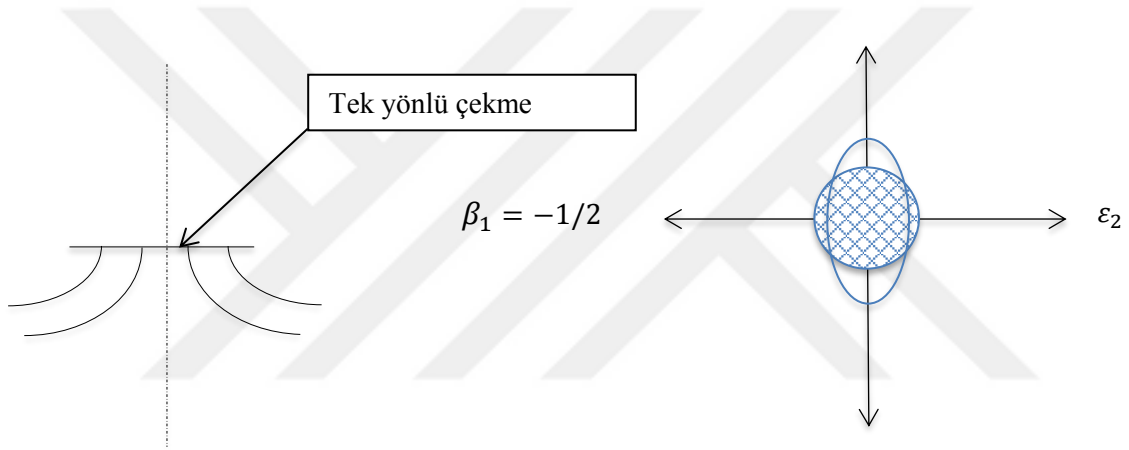
$$\alpha_1 = \frac{2\beta_1+1}{2+\beta_1} \quad \beta_1 = \frac{2\alpha_1-1}{2-\alpha_1} \quad (4.2.23)$$



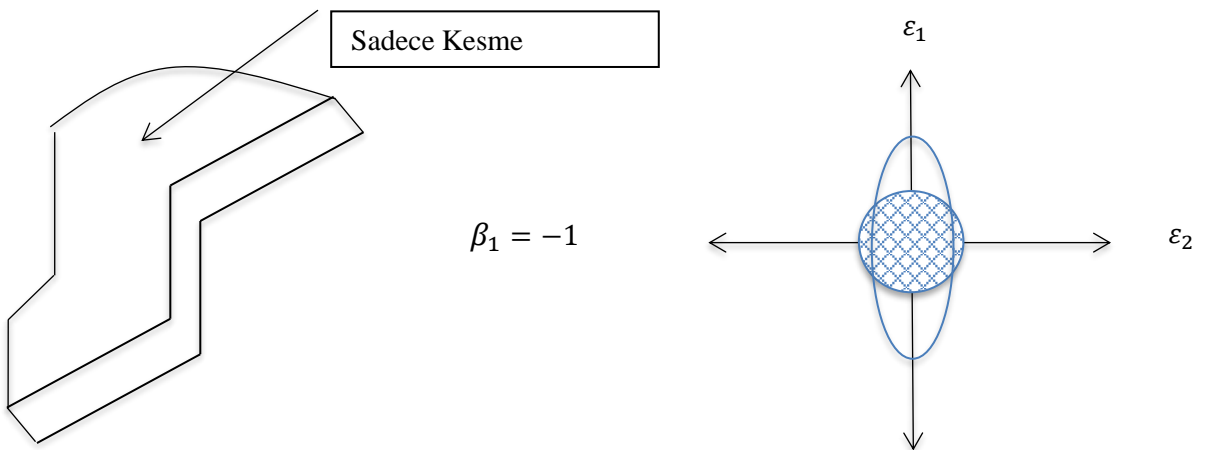
Şekil 4. 4. Eşit yönlü çekme



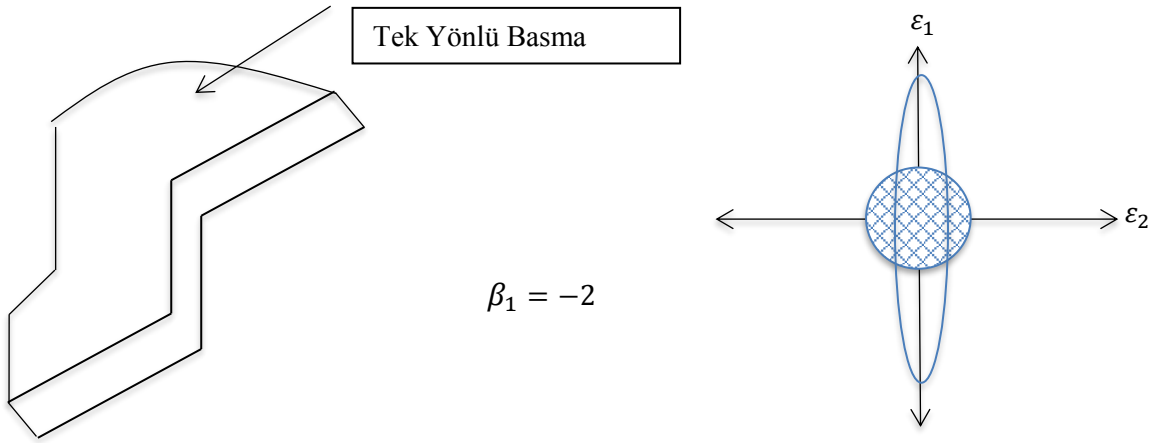
Şekil 4.5. Düzlemsel gerinim



Şekil 4.6. Tek yönlü gerinim



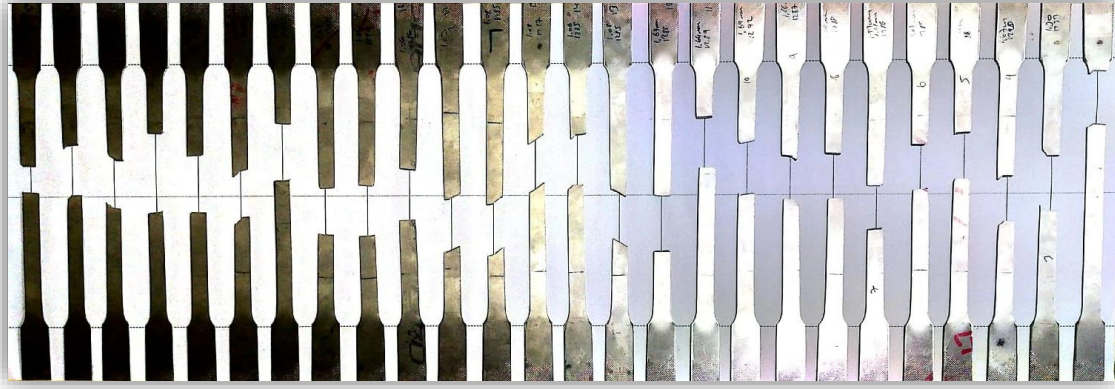
Şekil 4.7. Kesme



Şekil 4.8. Tek yönlü bası

### 4.3. Çekme Testi

Inconel alaşımının plastik bölgedeki davranışının tespiti için 3 farklı kalınlıkta(1.04mm, 1.24mm, 1.63mm),3 farklı yönde(L, LT, 45<sup>0</sup>), üçer adet ASTM E8'e göre Alstom test numunesi kestirilmiş ve 27 adet çekme testi ile ASTM E8'e göre gerilim-gerinim grafiği tespit edilmiştir.



Resim 4.2. Çekme testi sonrası numuneler

$$\sigma_{eng} = \frac{P}{A_0} \quad (4.24)$$

$$\sigma_{eng} = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\% \quad (4.25)$$

$$\sigma_0 = \frac{P_y}{A_0} \quad (4.26)$$

$$\sigma_{TS} = \frac{P_{max}}{A_0} \quad (4.27)$$

$$E = \frac{(\sigma_f)_0}{e_y} \quad (4.28)$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.29)$$

$$A_0 l_0 = A l \quad (4.30)$$

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \frac{l}{l_0} \quad (4.31)$$

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l} \quad (4.32)$$

$$\varepsilon = \int d\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (4.33)$$

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{P}{A_0} \frac{A_0}{A} = \sigma_{eng} \frac{l}{l_0} = \sigma_{eng} \left( 1 + \frac{e_{eng}}{100} \right) \quad (4.34)$$

$$\varepsilon = \ln \left( 1 + \frac{e_{eng}}{100} \right) \quad (4.35)$$

$$\varepsilon_u = \ln \left( 1 + \frac{E_u}{100} \right) \quad (4.36)$$

$$wtl = w_0 t_0 l_0 \quad (4.37)$$

$$\frac{t}{t_0} = \frac{w_0 l_0}{w l} \quad (4.38)$$

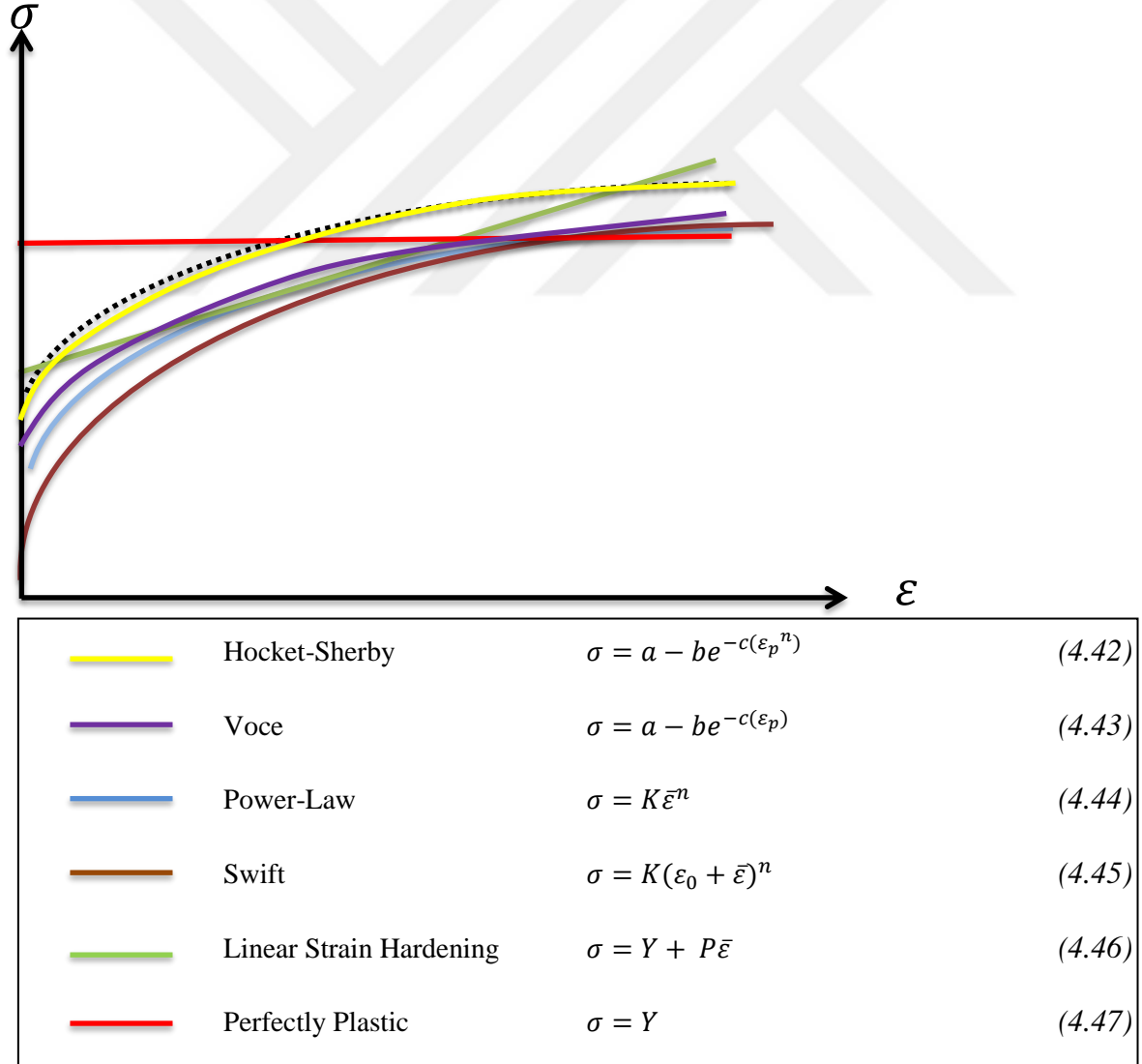
$$R_{IZOTROPI} = \frac{\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{w_0 l_0}{wl}} \quad (4.39)$$

İzotropi için  $e_{eng} = 15\%$  de ölçüm alınır.

$$\Delta R = \frac{R_0 + R_{90} - 2R_{45}}{2} \quad (4.40)$$

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (4.41)$$

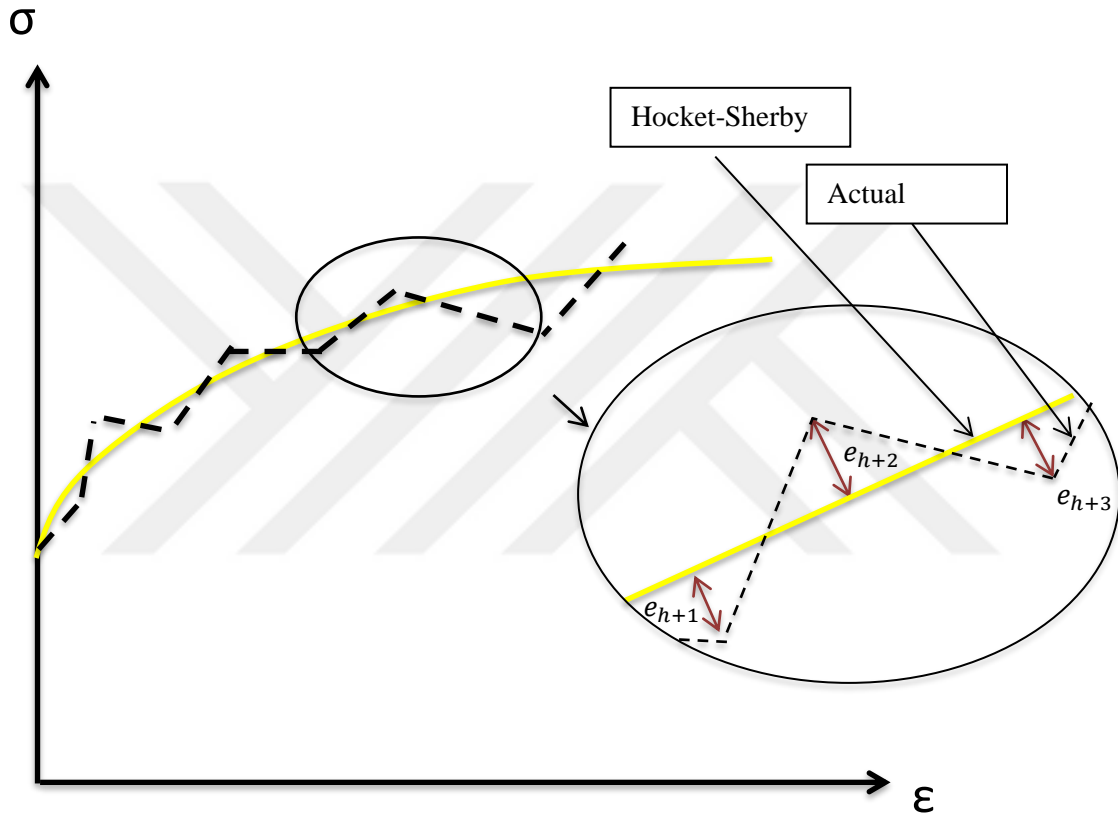
Çekme testlerinden elde edilen değerler sonucunda düzlemsel olarak izotropisi %1 altında olduğu için malzeme izotropik olarak kabul edilmiştir, hesaplamaları Ek1’de verilmiştir.



Şekil 4.9. Gerilim-gerinim teoremleri



Inconel 625'in davranışını en az hata ile gerçek gerilim-gerinim grafiklerine yansıtılabilmek için Şekil 4.10 da gösterildiği gibi çeşitli gerinim kanunları 27 test için denenmiş ve grafiğe en uygun şekilde oturan kanun malzemenin plastik bölgedeki davranışını gösteren kanun olarak Hocket-Sherby kanunu seçilmiştir.Şekil 4.11'de görüldüğü üzere grafiğe oturtabilmek için lineer regresyon yolu ile eğri oturtma yapılarak hataların toplamının en düşük olduğu eğri olarak karşımıza Hocket-Sherby çıkmıştır.



Şekil 4.90. Eğri oturtma yöntemi

$$\bar{\sigma}(\varepsilon_p) = a - be^{-c(\varepsilon_p^n)} \quad (4.48)$$

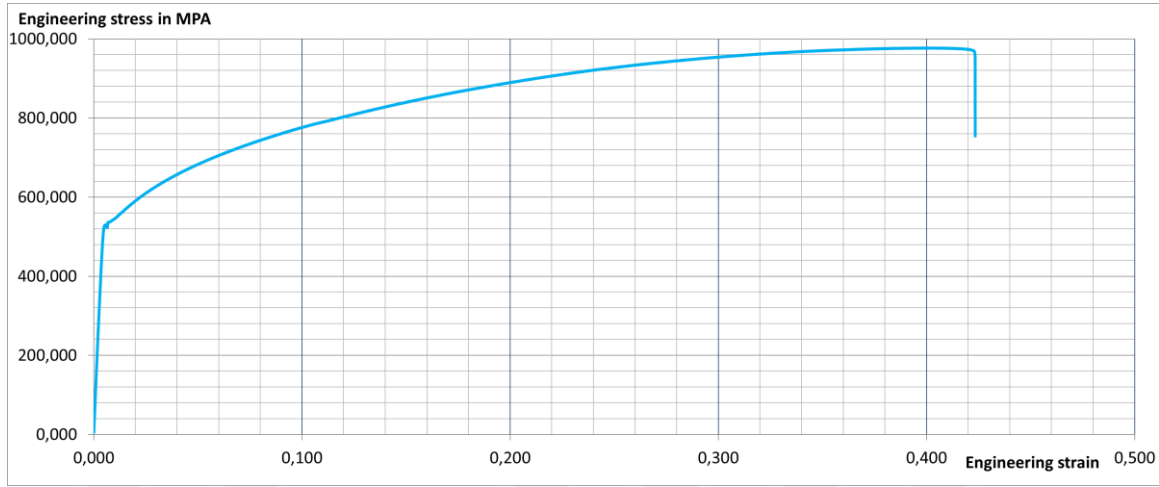
Genel denklemimizi alıp x-y koordinat sistemine çevirdiğimizde;

$$y = a - be^{-c(x^n)} \quad (4.49)$$

Datamızın  $\{(x_1, y_1), \dots, (x_H, y_H)\}$  olan noktalardan oluştuğunu ve fonksiyonumuzu  $y = a - be^{-c(x^n)}$  olarak alındığında;

$$E(a, b, c, n) = \sum_{h=1}^H (e_h)^2 \quad (4.50)$$

$$E(a, b, c, n) = \sum_{h=1}^H (y_h - (a - be^{-c(x_h^n)}))^2 \quad (4.51)$$



Şekil 4.10. #10 Çekme testi

Amacımız  $E(a,b,c,n)$ 'yi 0 a yaklaştırmak böylece en ideal katsayıları bularak eğrimizi fonksiyonumuza oturtmak, bunun için  $\sigma_{akma} = 515 \text{ MPa}$  kabul edilerek akma noktasına gelen gerinim çekme testlerinin ortalaması alınarak  $\varepsilon_e = 0.004875$  alınmış ve çekme testinden gelen  $\varepsilon_T$  değerleri de bilindiğinden  $\varepsilon_T = \varepsilon_e + \varepsilon_p$  denklemi kullanılarak,  $\varepsilon_p$  değerleri fonksiyona x eksenini olarak a,b,c,n değerleri ise  $E(a, b, c, n)$  minimize edecek şekilde merkezi olarak iterasyon yapılarak bulunmuştur.

Çizelge 4.2. Denklem katsayıları

	$n$	$K$	$a$	$b$	$C$
<i>Power-Law</i>	0.24	3.208	-	-	-
<i>Hocket-Sherby</i>	0.817	-	2940	2400	0.9947
<i>Voce</i>	-	-	1985	1435	2.3098

Böylece malzememizin plastik bölgedeki davranışını veren en uygun denklem;

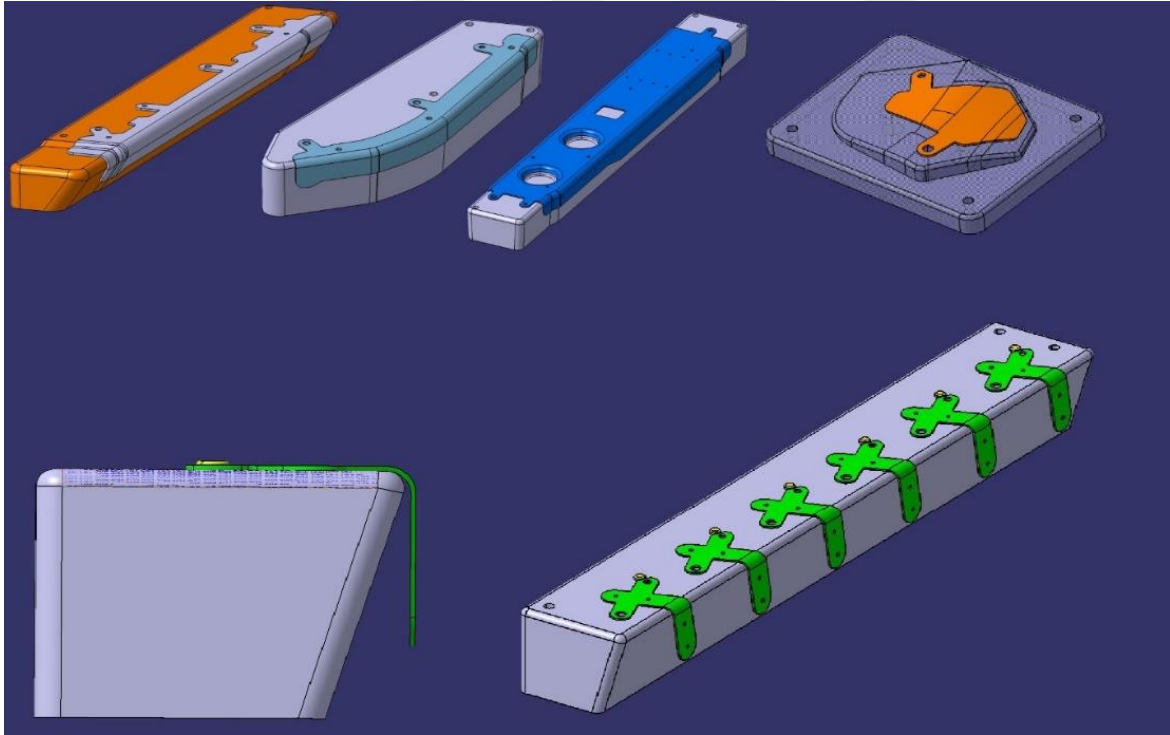
$$\sigma(\varepsilon_p) = 2940 - 2400 * e^{-0.9947 * (\varepsilon_p^{0.817})} \quad (4.52)$$

Olarak tespit edilmiştir, bu denklem sonlu elemanlar analizinde malzeme davranışını modellemek için kullanılmıştır.

## 5. KALIP TASARIMI

Kalıp tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli nokta parçanın sahip olduğu geometridir. Her parça farklı tasarım konsepti gerektirir. İlk olarak uçak parçasını malzemesi dikkate alınır. Kalıbın ömrünü uzatabilmek için uçak parçasına ait malzemeye yakın kimyasal ve fiziksel olarak benzer malzemeler kalıp malzemesi olarak seçilmektedir. Uçak parçası süper alaşım veya çelikse kalıp 4140/1040, alüminyum ise 7075-T6/6061-T6 veya 5083-H111 olarak üretilebilir. Alüminyum birim maliyet bakımından pahalı olsa dahi işleme süresi bakımından çelikten daha kısa süre de işlendiği için genel anlamda daha ucuz bir kalıp üretilmesine sebep olur.

Çelik malzemelerin HRC cinsinden sertliği alüminyumlara göre daha fazla olduğundan çelik üreten kalıplar daha fazla yıpranır. Her kalıbın çelikten yapılmamasının sebebi ise alüminyum kalıplar hem hafif hem de işlenmesi kolaydır.

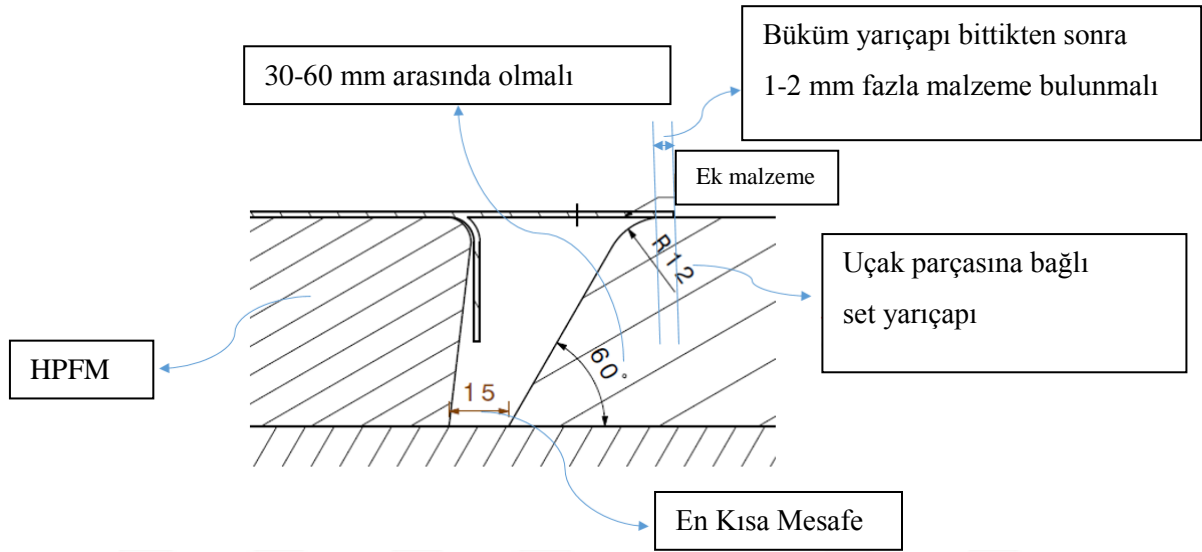


Şekil 5.1. Örnek kalıp tasarımları

Kalıp malzemesi seçildikten sonra uçak parçasına ait büküm yerleri incelenir. Joggle durumu, büküm yarıçaplarının değerleri, flanş açıları, parçanın yüksekliği ve genişliği gibi parametreler incelendikten sonra tasarım konsepti belirlenip kalıp tasarımına geçilir.

Değişken bir büküm yarıçapına sahip bir parça ise geri esneme değeri farklı olacağından dolayı, kademeli olarak geri esneme değeri verilir.

Bunlar incelenirken parça kalınlığı ve büküm yarıçapı belli ise parçanın geri esneme davranışını tahmin edebilmek için bu orana karşılık gelen telafi açısı değeri incelenerek kalıba bu açı verilir.



Şekil 5.2. Parçayı sündürerek şekillendirmek için yapılan kalıp tasarımı

Örnek olarak eğer form büküm hattı Şekil 5.5 te gösterildiği gibi yay şeklinde ise bu kırışabileceği ve bu kırışmanın önüne geçebilmek için Şekil 5.2 de gösterildiği gibi bir yaklaşım izlenerek diyaframın iş parçasını kalıba önce bir set yardımıyla tutarak sıvaması şeklinde bir yaklaşım izlenebilir.

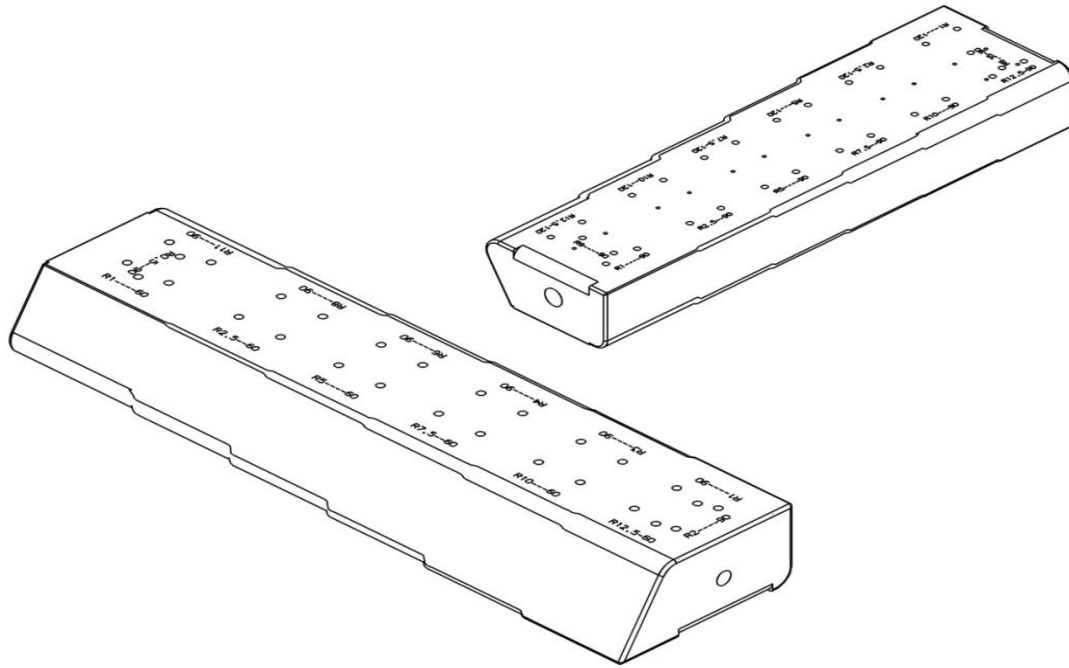
Test kalıbımızda geri esneme değerinin tespiti için herhangi bir geri esneme değeri verilmemiştir. Inconel 625'in sertliği 20 HRc olduğundan ve soğuk şekillendirme ile sertleştiğinden, kalıbın uzun ömürlü, rijit olması için dolayı malzeme 42CrMo4(AISI 4140) seçilmiş ve sertlik olarak 38-40 HRc olacak şekilde 0.1 mm'lik yüzey toleransı verilerek master bir kalıp tasarlanmıştır.

Kalıbın yerden yüksekliği ise test numunelerinin rahatça ve eşit şekilde birbirinden etkilenmeyecek şekilde bükülmesine imkan verecek şekilde tasarlanmıştır. Sıklıkla uçak

parçası tasarımında rastlanan büküm yarıçapları incelenmiş ve tasarıma yansıtılmıştır. Tasarıma yansıtılan büküm yarıçapları ve büküm açıları çizelge 5.1 de görülebilir.

Çizelge 5.1. Deneme kalıbındaki açı ve büküm yarıçapları

Büküm Açısı	Büküm Yarıçapı (mm)																
	0.5	1	1,5	2	2.5	3	4	5	6	6.35	7	7.5	8	9	10	11	12.7
--	60°	--	60°	--	60°	--	60°	--	60°	--	60°	--	60°	--	60°	--	60°
90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°
--	120°	--	120°	--	120°	--	120°	--	120°	--	120°	--	120°	--	120°	--	120°



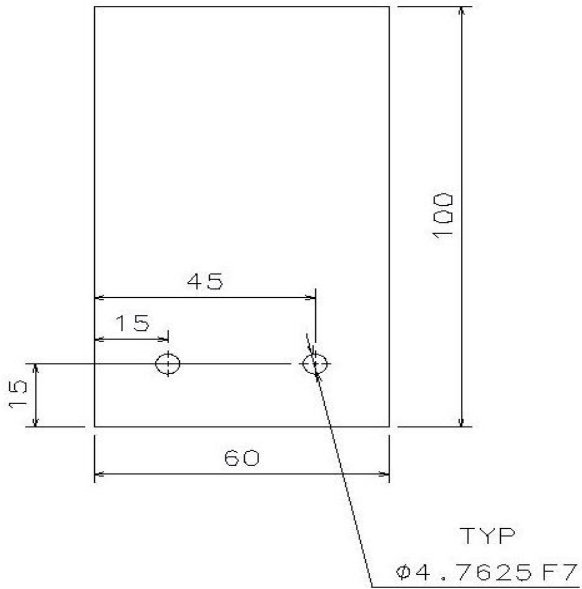
Şekil 5.3. Test kalıbı

Test kalıbı bir master olarak düşünülmüş ve tez kapsamında olmasa da 90° bükümlere ek olarak 60° ve 120° için de kalıp tasarımına eklenmiştir. 3 farklı büküm açısı için farklı büküm yarıçaplarına sahip bir deneme kalıbı tasarlanmıştır.



Resim 5.1. Test kalıbı üzerinde numunelerle birlikte

Kalıp üzerine yerleştirilecek iş parçası boyutları 100x60 mm genişliğindedir. Üzerinde 2 adet  $\text{Ø}4.7625\text{F}7$  deliğinden 0.1 mm toleransla hizalanarak yerleştirilmektedir.



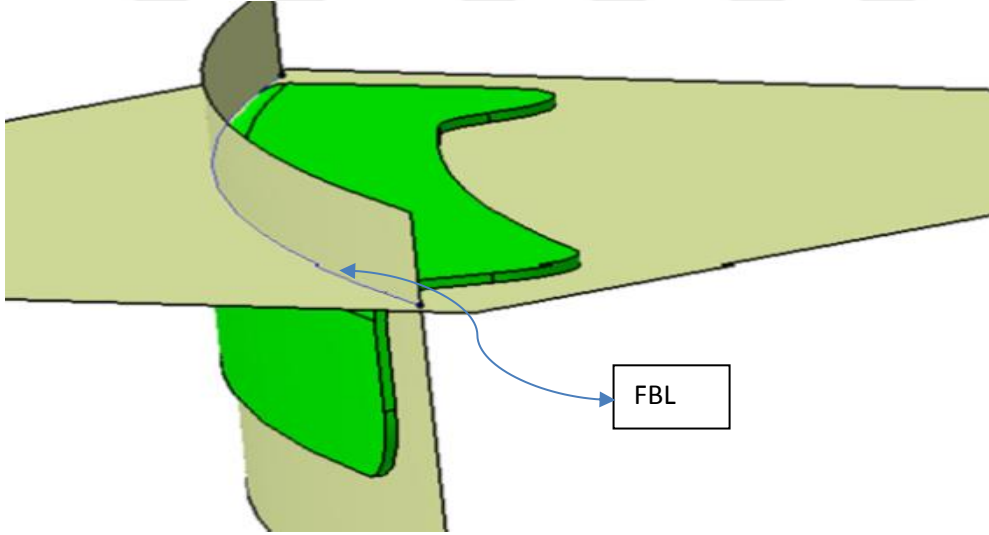
Şekil 5.4. Büküm numuneleri

Test sonuçlarından elde edilen veriler ışığında plastik bölge şekillendirilebilirlik için kullanılacağından S-N grafiklerinin akma bölgesinden sonraki davranışı kırılma

denklemlerine uyarlanmaya çalışılmış ve bu sayede plastik bölgedeki hardening kanunu çıkarılabilmektedir.

### 5.1. Kalıp Tasarımında Dikkat Edilmesi Gereklİ Diğer Noktalar

Eğer geri esneme değeri  $1^\circ$  üzerinde ise bu kalıba geri esneme değerinİn yansıtılmasını zorunlu kılmaktadır. Telafi açısının tasarıma yansıtılmadığı durumlarda ayrıca bir düzeltme operasyonu gerektirmektedir. İşçilik sürelerini azaltmak ve uygun parça imalatı için geri esneme değeri kalıp tasarımına  $1^\circ$  üzerinde ise yansıtılmalıdır. Geri esneme değeri verildiğinde ise form büküm hattı dışarıya doğru Şekil 5.6 da gösterildiği gibi kaymaktadır. Bu kaymaların önüne geçebilmek için 2 yaklaşım bulunmaktadır.



Şekil 5.5. Form büküm hattı

Bunlardan ilki Şekil 5.6 da gösterilen flanş yüzeyinin kalıba doğru ötelenmesiyle form büküm hattının istenilen yere gelmesi, diğer yöntem ise Şekil 5.7 de gösterilen büküm yarıçapında az bir oynama yapılarak kaydırılmasıdır.

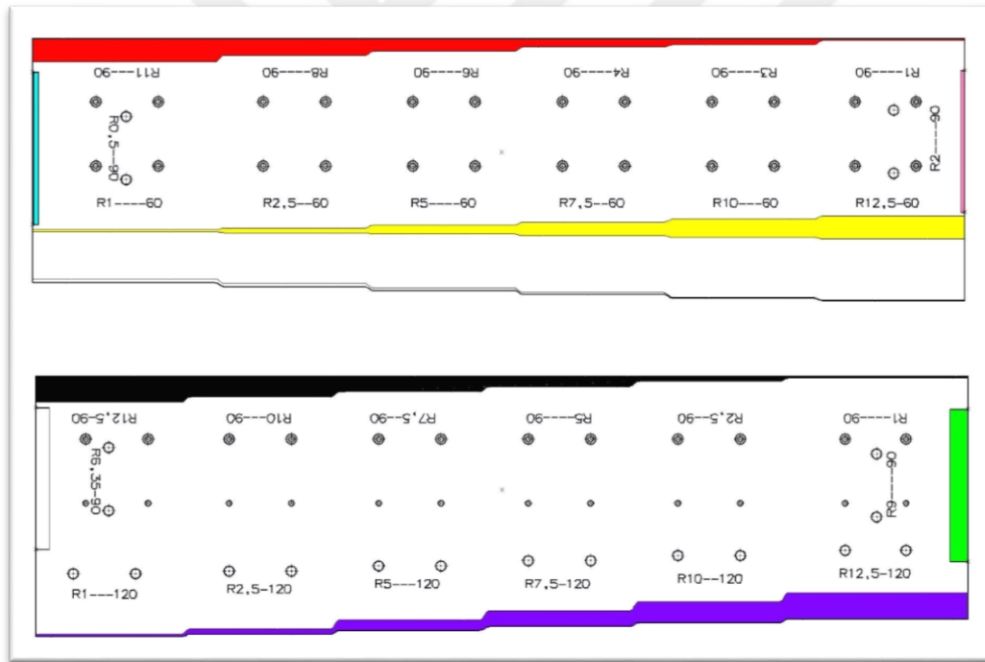




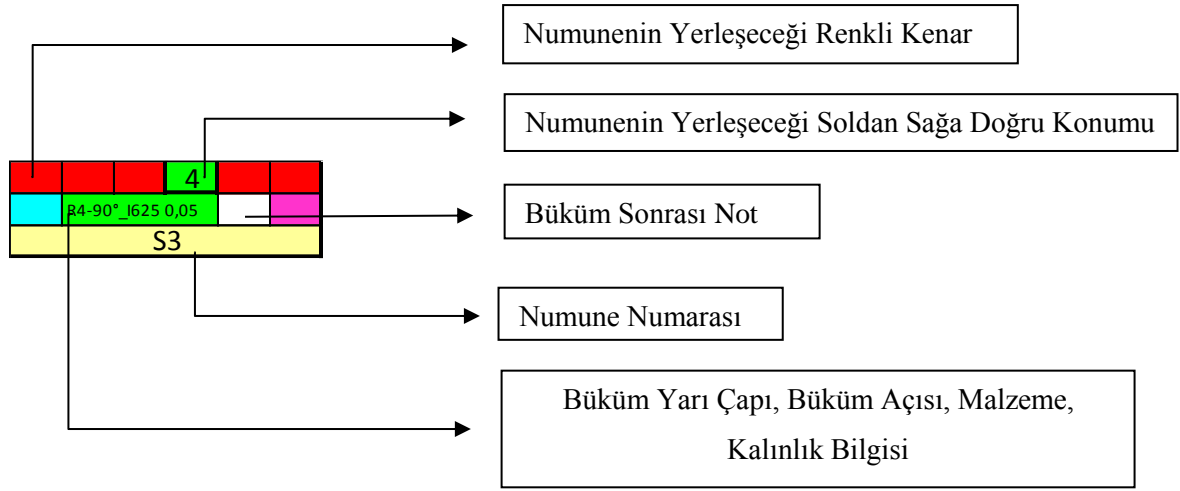
*Test kalıbında bu kayma kriteri göz önüne alınmamıştır, bu kriter geri esneme değeri bilinen malzemelere ait kalıp tasarımı yaparken kullanılmaktadır.*

## 5.2. Numune Etiketlenmesi

Büküm sırasında her numunenin doğru yere koyulduğundan emin olmak ve ölçümlerde numuneleri doğru bir şekilde ayırt edebilmek için bir etiket numaralandırması geliştirilmiştir. Kalıp da etiketlere uyacak biçimde ve büküm etkilemeyecek şekilde ilgili kenarlarından boyanmıştır. Böylece kalıp üzerinde büküm yarıçapına ait bilgi olsa dahi renk ve konumdan rahatça numunenin onumu belirlenecek ve doğru yere yerleştirilerek bükülecektir. Her etiket bu boyalardan ve kalıp üzerindeki yazılardan referans alınarak bükülmüştür.



Şekil 5.8. Kalıp renklendirme referansı



Şekil 5.9. Etiket



Resim 5.2. Bükülmüş numuneler

### 5.3. Deney

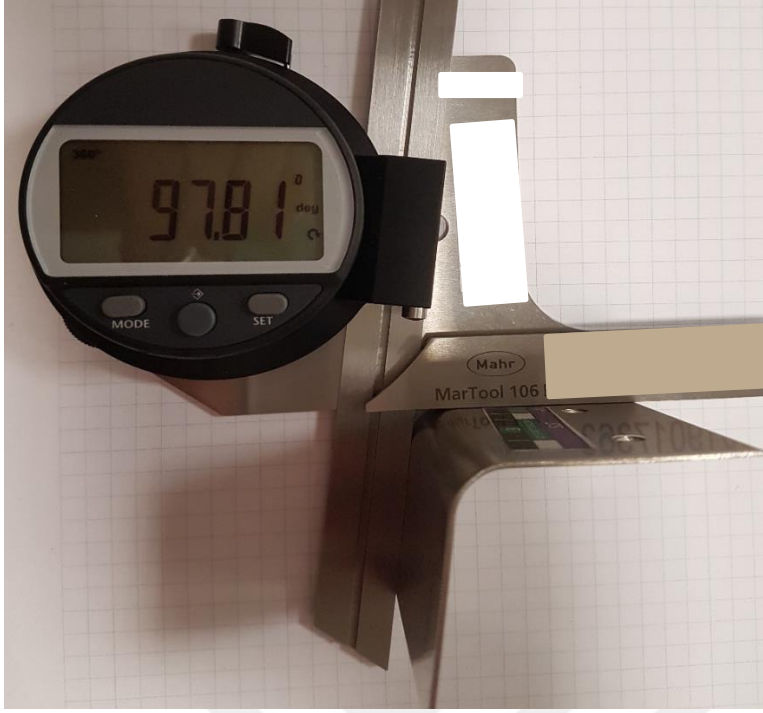


Resim 5.3. Numuneler büküm sonrasında

Büküm için hazırlanan örnekler tezgâhta 700 bar da 3 s tutma ile bükümler yapılmış. Kalıp üzerine korucu örtülmemiştir. Tezgâha ait 50 mm kalınlığındaki doğal kauçuk ile bükülmüştür. Bunun amacı farklı örtülerin etkisini en aza indirmektir.

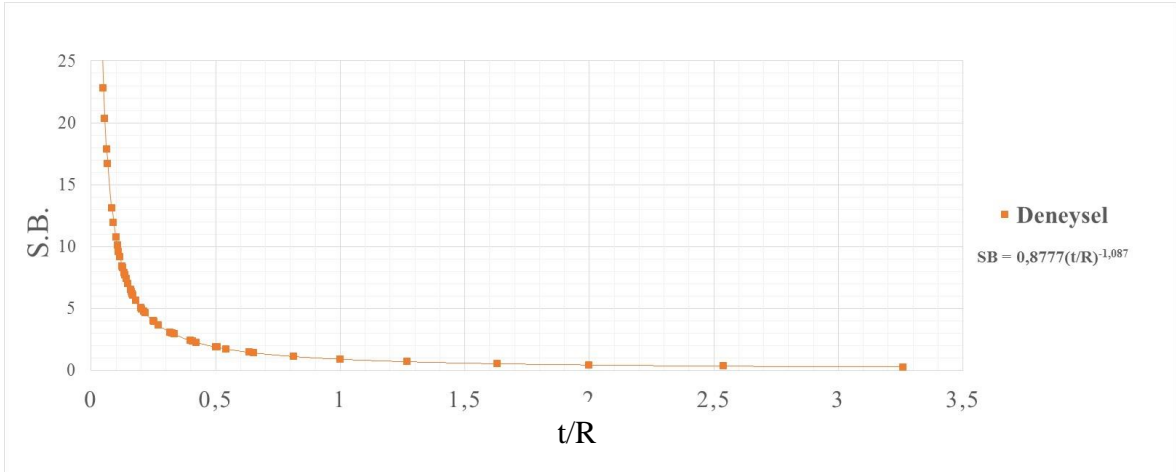


Resim 5.4. Numuneler büküm sonrasında



Resim 5.5. Numuneler büküm sonrasında ölçümü

Elde edilen sonuçlar elektronik açı ölçer ile büküm açıları ölçülmüş kumpas ile de her numunenin kalınları ölçülüp geri esneme- $t/R$  oranı olacak şekilde grafiğe dökülmüştür.



Şekil 5.10. Deneysel sonuçlar  $t/R$ -geri esneme

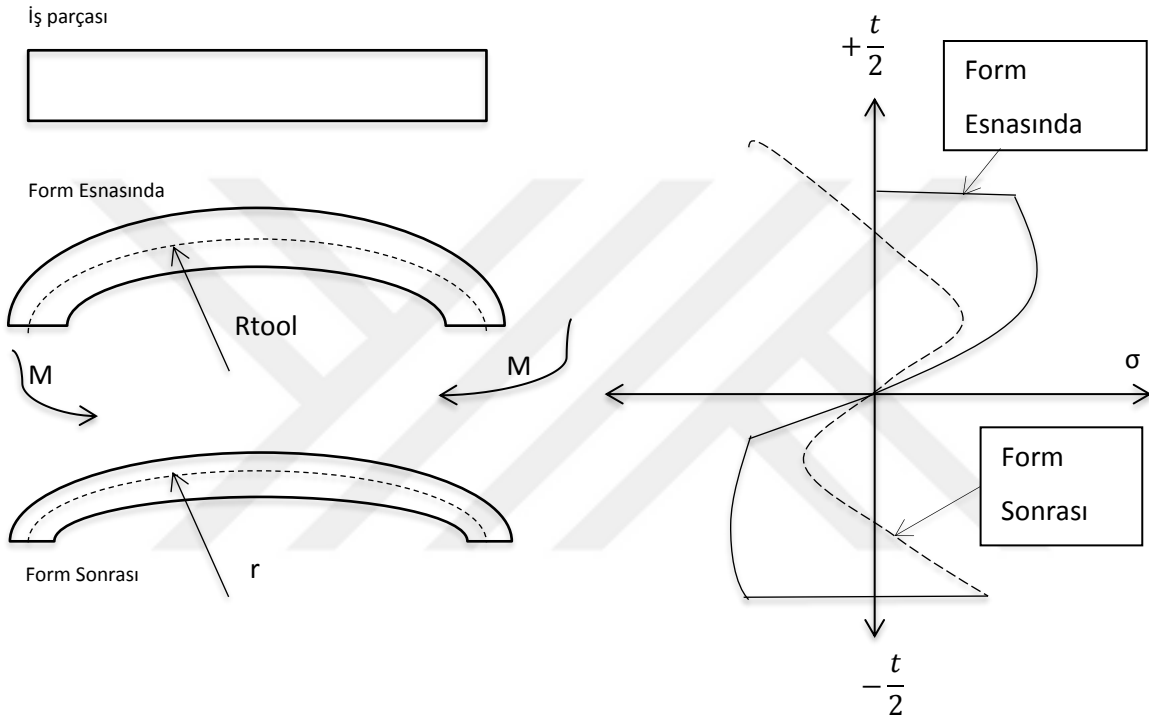
Geri esneme ve  $t/R$  arasında empirik bir formül oluşturulduğunda ise;

$$\theta_{SB_{Deneysel}} = 0,8777\left(\frac{t}{R}\right)^{-1,087} \quad (5.1)$$

Elde edilir.

## 6. GERİ ESNEME

Geri esneme malzeme şekillendirilirken elastik bölgedeki şekil değiştirmelerin stres ortadan kalktıktan sonra önceki haline geri dönmesi şeklinde açıklanabilir. Sac metalin büküm esnasında maruz kaldığı yük kalktıktan sonra eski haline bir miktar veya büküm yarıçapı yüksek ise tamamen geri dönmesidir.



Şekil 6.1. Geri esneme

Geri esnemeyi matematiksel olarak modelleyebilmek için yapılan kabuller;

- 1) Büküm düzleminde kayma olmayacak.
- 2) İş parçası kalınlığında değişim olmayacak.
- 3) 2 boyutlu geometri, kalınlık yönünde gerilim yok
- 4) Elastik modül sabit.
- 5) Nötral eksen parçanın tam ortasında yer alacak, kayması dikkate alınmayacaktır.
- 6) Analitik hesaplamalarda mühendislik gerinimi ile gerçek gerilim aynı kabul edilecek.
- 7) İzotropik malzeme davranışı

Bu kabuller analitik olarak geri esnemeyi incelemek için yapılmaktadır.

Bükme Momenti;

$$M = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x(\varepsilon_x) z w(z) dz = 2 \int_0^{t/2} \sigma_x(\varepsilon_x) z w(z) dz \quad (6.1)$$

$\varepsilon_x$  nötral eksen den uzaklaştıkça lineer olarak artacaktır. Parçanın şekillendirilmek istenen büküm yarıçapı R olsun, form işleminden sonra çıkan büküm yarı çapı da r olur. Genellikle  $r > R_{TOOL}$ 'dir

Parça form(moment esnasında)  $z/R$  kadarlık bir uzama  $\varepsilon_x$  eşit olduğunun kabulü yapılabilir.

$$\varepsilon_x \approx e_x = \frac{z}{R_{TOOL}} \quad (6.2)$$

X yönünde oluşan gerilim uzama ile lineer bir ilişkiye sahiptir.

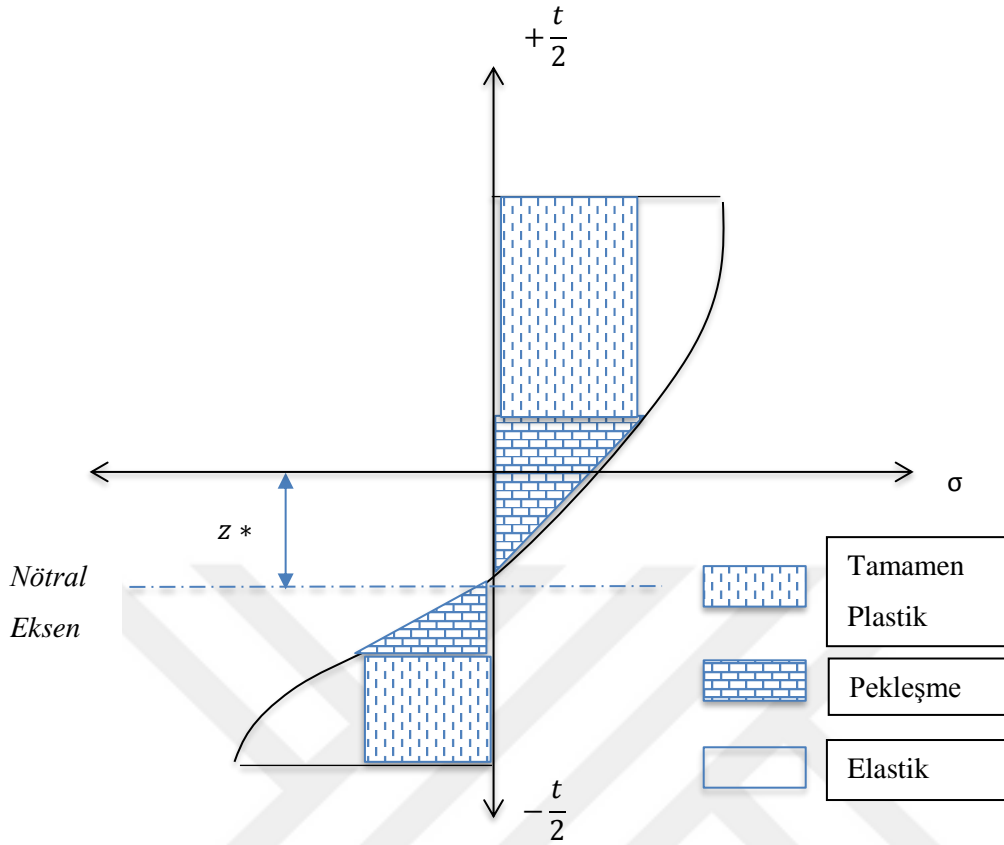
$$\sigma_x = E' \varepsilon_x \quad (6.3)$$

$$E' = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (6.4)$$

$$\frac{1}{R_{TOOL}} - \frac{1}{r} = \frac{M}{E'I} \quad (6.5)$$

$$I = \frac{wt^3}{12} \quad (6.6)$$

$$\frac{1}{R_{TOOL}} - \frac{1}{r} = \left[ 1 - R_{TOOL} \frac{12M/w}{E't^3} \right]^{-1} \quad (6.7)$$



Şekil 6.2. Sac metal büküldükten sonra üzerinde kalan gerilimler

Tamamen Plastik Bölge;

Bu duruma göre pekleşme yok kabul edilmekte malzeme elastik bir uzamaya maruz kaldıktan sonra uzamasının gerilim değişimi olmadan plastik bölgeye girdiğinde malzemenin akma stresinde lineer olarak uzadığını savunur.

$$\frac{M}{w} = 2 \int_0^{t/2} \sigma_0 z dz = \frac{\sigma_0 t^2}{4} \quad (6.8)$$

$$\frac{1}{R_{TOOL}} - \frac{1}{r} = \left[ \frac{3\sigma_0}{E't} \right] \quad (6.9)$$

Bu denklem bize ayrıca geri esnemenin  $\sigma_0/E$  ile doğru, kalınlıkla ters orantılı olduğunu gösterir. Örnek olarak çeliklerin elastik modülü alüminyumlara nazaran 3 kat daha fazladır, buradan hareketle çeliklerin 3 kata kadar daha fazla geri yaylanabileceği görülebilir. Ek olarak geri esnemenin malzemenin büküm yarıçapından bağımsız olarak geri yaylandığı görülebilir.

Bu sonuçlar genellikle yeterli bir geri esneme tahmini yapabilmek için mümkün olmaktadır.

### Elastik, Tamamen Plastik Bölge

Bu durumda göre malzeme elastik bir uzamaya maruz kalmadan gelen stres altında plastik bölgeye geçtiğini savunmaktadır. Nötral eksenin büküm esnasında tam ortada kalmadığı ve  $z^*$  kadar kaydığını ele almaktadır.

$$z^* = \frac{R_{TOOL}\sigma_0}{E} \quad (6.10)$$

$$\frac{1}{R_{TOOL}} - \frac{1}{r} = \frac{M}{E'I} = \frac{12M/w}{E't^3} \quad (6.11)$$

$$\frac{M}{w} = 2 \int_0^{z^*} \frac{E'z}{R_{TOOL}} z dz + \int_{z^*}^{t/2} \sigma_0 z dz \quad (6.12)$$

$$\frac{M}{w} = \frac{\sigma_0 t^2}{4} - \frac{\sigma_0^3 R_{TOOL}^2}{3E'^2} \quad (6.13)$$

Büküm yarıçapına bağlı bu modelde mukavemeti yüksek malzemelerde büküm yarıçapının daha fazla etki edeceği görülebilir.

### Elastik-Plastik Bölge

Bu durumda malzemenin gerinim-sertleşmesi dikkate alınır, akma stresinin üzerinde olan bölgelerdeki hardening sebebi ile oluşan moment değişimini dikkate alır. Bu moment de nötral eksen sonrasında oluşmaktadır.

$$\varepsilon_p = \varepsilon - \varepsilon_e \approx \frac{z-z^*}{R_{TOOL}} \quad (6.14)$$

$$\frac{\Delta M}{w} = 2 \int_{z^*}^{t/2} \sigma(\bar{\varepsilon}) z dz \quad (6.15)$$

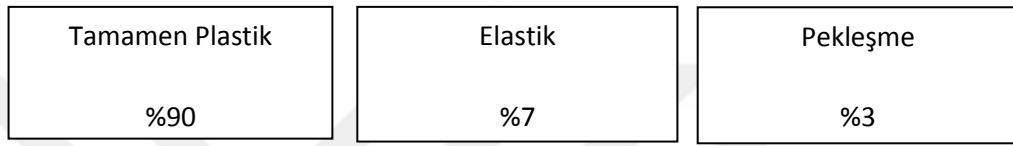
$$\bar{\sigma} = a - b e^{-c(\varepsilon_p^n)} \quad (6.16)$$



3 farklı yaklaşımı matematiksel olarak modellediğimizde;

Tüm momentleri topladığımızda;

$$\frac{M}{w} = \frac{\sigma_0 t^2}{4} - \frac{\sigma_0^3 R_{TOOL}^2}{3E^2} + \frac{\Delta M}{w} \quad (6.17)$$



Genel olarak geri esneme ile ilgili açılı değerine en büyük etkiyi tamamen plastik olduğunu kabul ettiğimiz durum yapmaktadır. Fakat bu tez kapsamında diğer etkenler de göz önüne alınmıştır.

$$\bar{\sigma}(\varepsilon_p) = 2940 - 2400 * e^{-0.9947 * (\varepsilon_p^{0.817})} - \sigma_0' \quad (6.18)$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon - \varepsilon_e \approx \frac{z - z^*}{R_{TOOL}} \quad (6.19)$$

$$\varepsilon_e = 0.004875 \quad (6.20)$$

$$w = 1 \text{ mm} \quad (6.21)$$

$$\frac{\Delta M}{w} = 2 \int_{z^*}^{t/2} [2940 - 2400 * e^{-0.9947 * (\varepsilon_p^{0.817})}] z dz \quad (6.22)$$

Gauss Legendre çözüm yöntemi ile  $\Delta M/w$  için  $i=16$  olarak çözdüğümüz zaman;

$$f(z) = [2940 - 2400 * e^{-0.9947 * (\varepsilon_p^{0.817})} - \sigma_0] z \quad (6.23)$$

$$\int_a^b f(z) dz \cong \left( \frac{b_2 - a_2}{2} \right) \sum_{i=1}^n w_i f(z_i) + R_n \quad (6.24)$$

$$z_i = \left( \frac{b_2 - a_2}{2} \right) x_i + \left( \frac{b_2 + a_2}{2} \right) \quad (6.25)$$

İntegral için

$$a_2=t/2$$

$b_2=z^*$  alınırsa;

Gauss-Legendre kökleri alındığında;

Çizelge 6.1.  $n_{Gauss}=16$  için Gauss Legendre kökleri

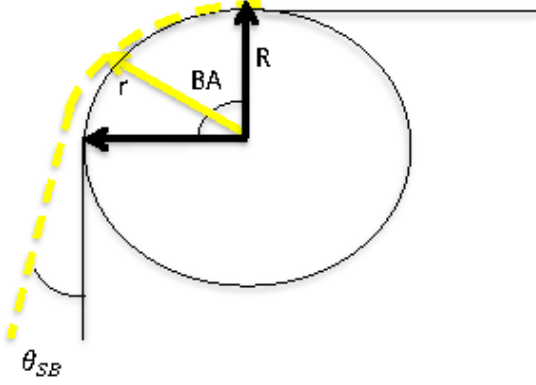
i	$x_i$	$z_i$	$w_i$
1	0,989401	0,795838	0,027152
2	-0,9894	0,018821	0,027152
3	0,944575	0,778236	0,062254
4	-0,94458	0,036423	0,062254
5	0,656312	0,665044	0,095116
6	-0,65631	0,149616	0,095116
7	0,755404	0,703955	0,124629
8	-0,7554	0,110705	0,124629
9	0,617876	0,649951	0,149596
10	-0,61788	0,164708	0,149596
11	0,458017	0,587179	0,169157
12	-0,45802	0,22748	0,169157
13	0,281604	0,517907	0,182603
14	-0,2816	0,296752	0,182603
15	0,095013	0,444638	0,189451
16	-0,09501	0,370021	0,189451

$$\frac{1}{R_{TOOL}} - \frac{1}{r} = \frac{\sum M}{E'I} \quad (6.26)$$

Deneysel sonuçlar ile karşılaştırabilmek için test kalıbına ait büküm yarı çapları ve test numunelerine ait kalınlıklar için çözüm yapılabilir. Bu çözümler sonucunda  $r$  'nin tespiti ile geri esneme açısına geçiş yapılabilir.

Büküm esnasında tarafsız ekseninde uzunluğun değişmediğini kabul edersek ve tarafsız eksenindeki kaymayı da  $z^*$  olarak kabul edersek;

Kalınlık için dikkat edilmesi gereken nokta ise kalıba ait büküm yarıçapının analitik sonuçlarda kullanılması için kalınlığının yarısının eklenmesi ile nötral eksene gelen yarıçapa göre hesap yapılmıştır.



Şekil 6.3. Sac metal büküldükten sonra geri esneme ve yarıçap değişimi

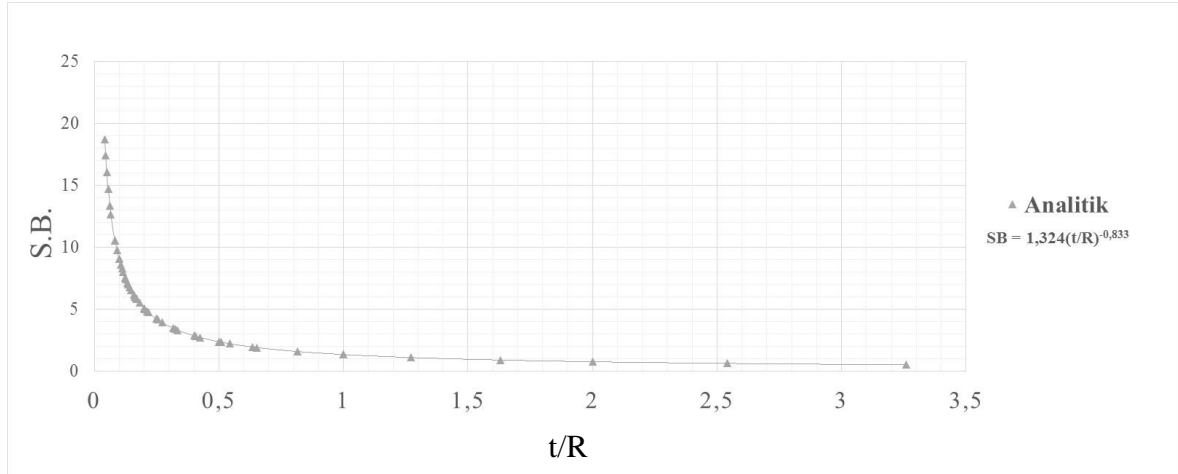
Büküm esnasında tarafsız eksenin uzunluğunun değişmediğini kabul edersek ve tarafsız eksendeki kaymayı da  $z^*$  olarak kabul edersek;

$$2\pi * \frac{\theta_{SB}}{360} * (R_{TOOL} - z^*) = 2\pi * (r - z^*) * \frac{\theta_{BA} + \theta_{SB}}{360} \quad (6.27)$$

Bağlantısı ile SB hesaplanır.

$$\theta_{SB} = \theta_{BA} - \theta_{BA} * \frac{(R_{TOOL} - z^*)}{(r - z^*)} \quad (6.28)$$

Deneysel olarak kullanılan 3 kalınlık ve 11 farklı büküm yarıçapı ve 3 farklı büküm açısı sonucunda elde edilen SB açıları  $t/r$  oranına göre sıralanarak bir tablo yapılırsa;



Şekil 6.4. Analitik sonuçlar t/R-geri esneme

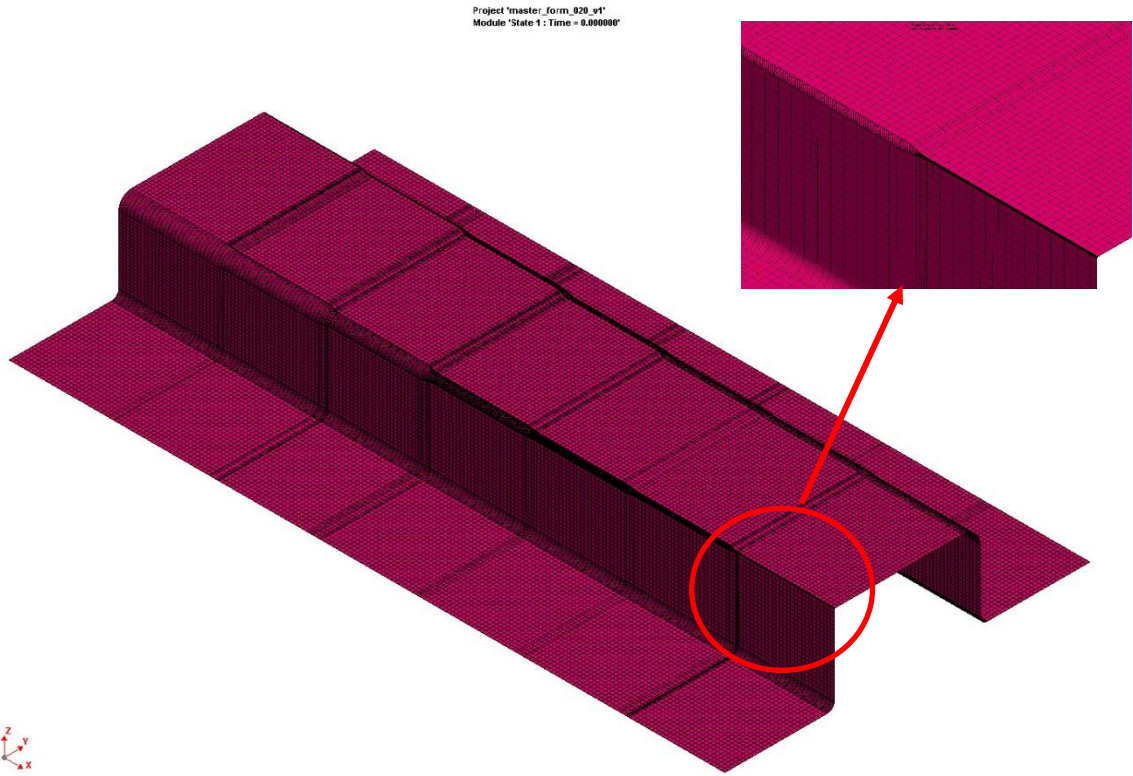
Geri esneme ve t/R arasında empirik bir formül oluşturulduğunda ise;

$$\theta_{SB_{Analitik}} = 1,3244 \left( \frac{t}{R_{TOOL}} \right)^{-0,833} \quad (6.29)$$

## 7. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Sonlu elemanlar analizi form kalıpları sektöründe kullanılan PAM-STAMP 2017 ortamında yapılmıştır. Analizi hızlandırması için aynı kalınlıktaki parçalar tek bir kalıpta 1 analizde 14 adet farklı büküm yarıçapı olacak şekilde modellenmiştir.

Analize başlarken ilk olarak takım yüzeyi katı esnemeyen bir rijit olarak tanımlanmıştır.

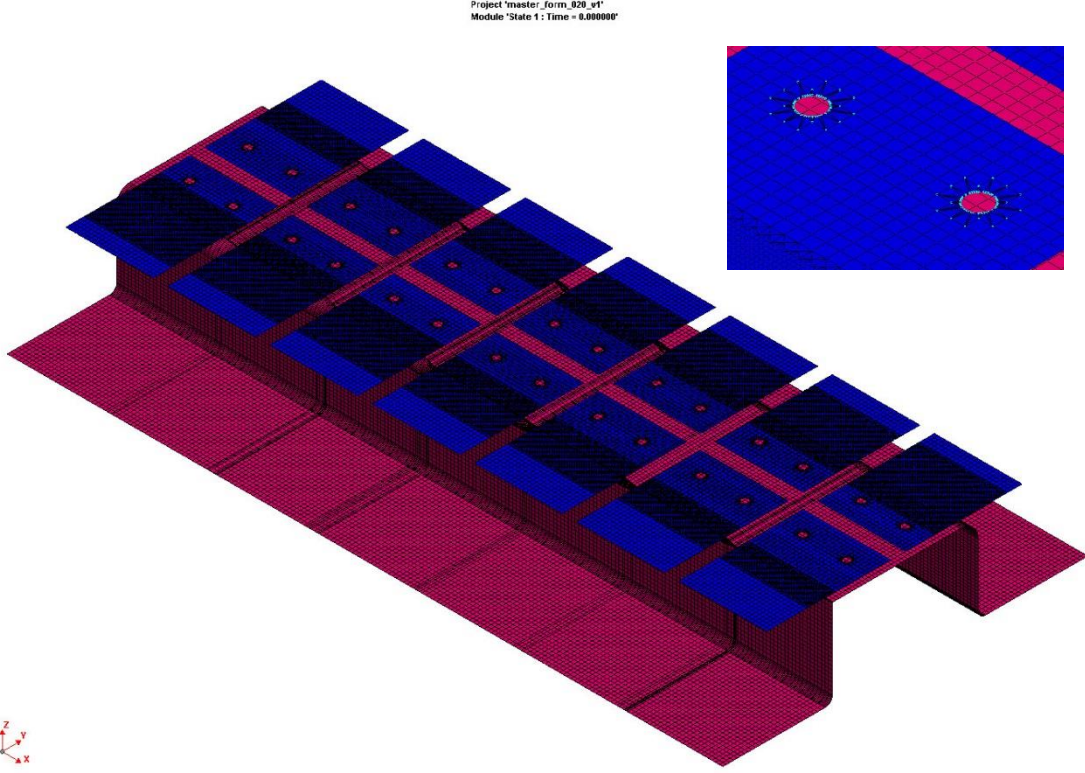


Şekil 7.1. Sonlu elemanlar analizi için takım yüzeyi

Takım 16 farklı büküm yarıçapından oluşmaktadır. (0.5 mm,1 mm,1.5 mm,2 mm,2.5 mm, 3 mm,4 mm,5 mm,6 mm,6.35 mm,7 mm,8 mm,9 mm,10 mm,11 mm,12.5 mm).

Üzerine gelen örnekler ise;

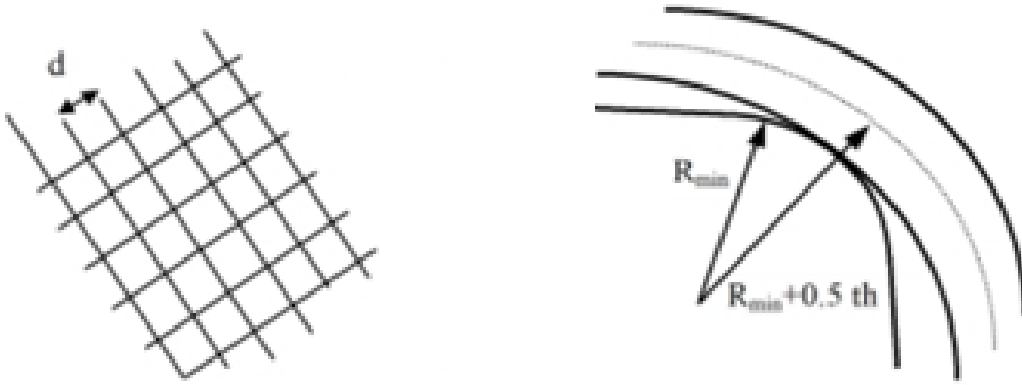
Pin deliklerinden sabitlenmiştir.



Şekil 7.2. Sonlu elemanlar analizi için takım yüzeyi ve büküm örnekleri

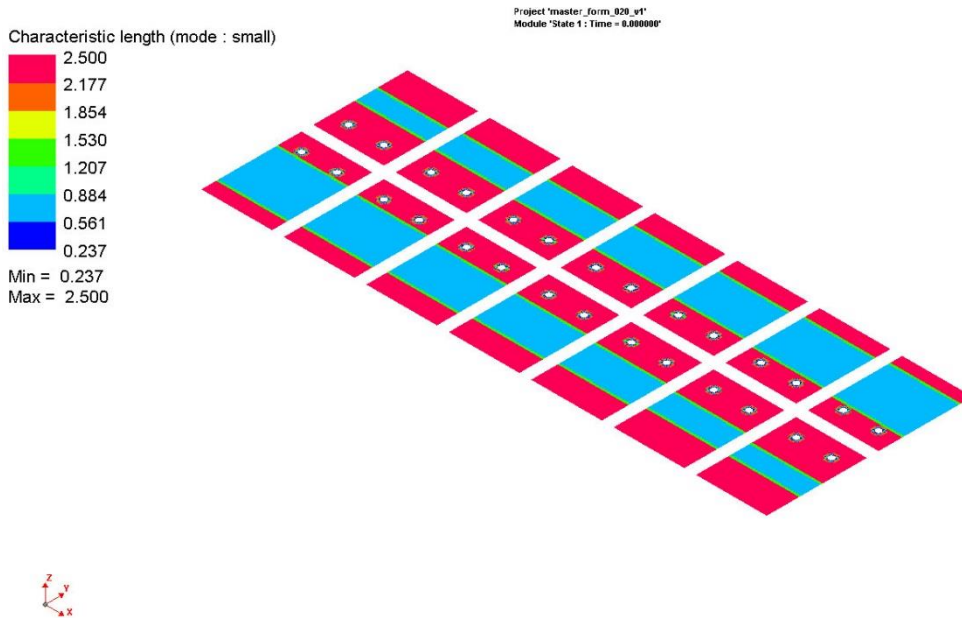
Büküm yarıçaplarına gelen bükümlerin doğru bir şekilde analizi yansıtması açısından mesh size en ufak büküm yarıçapına dahi uyabilecek şekilde bölünmüştür.

Mesh size (eleman boyutu) seçilirken genellikle ilk analizde 24 mm bir mesh size ve 4 refinement (eleman katmanlama) hızlı ve makul olarak kırışmaları, yırtılmaları göstermektedir. Bu değerler genel olarak sac şekillendirme süreçlerinde kullanılmaktadır. Bu süreci doğrulamak içinse 12 mm mesh ve 5 refinement ve bitiş eleman boyutu olarak 0.75 mm kullanılmaktadır.



Şekil 7.3. Büküm yarıçapındaki minimum eleman boyutu

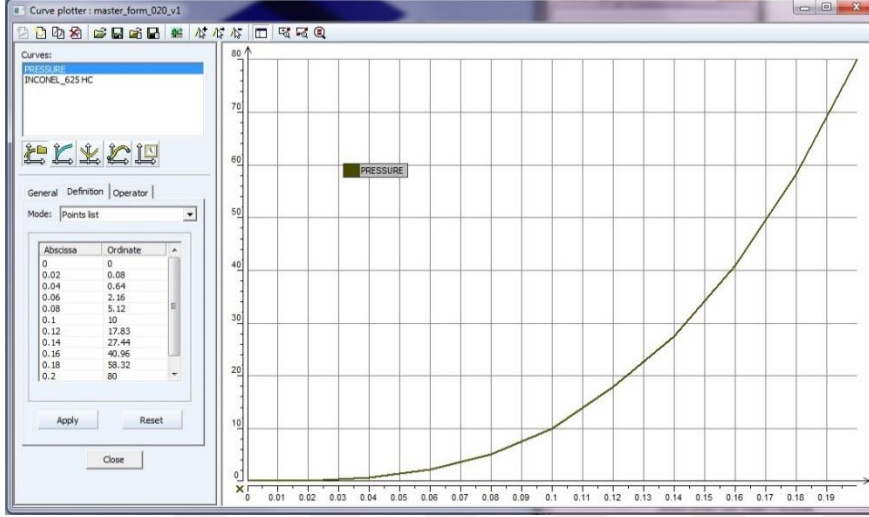
Fakat bu parametreler PAM-STAMP programı tarafından gerininin arttığı yerlere program kontrolünde atandığından, bu süreci daha kullanıcı kontrollü bir hale getirmek ve büküm yarıçapına gelen bölgeleri 5 eşit parçada geçebilmek için mesh size 0.25 mm'e kadar düşürülmüştür.



Şekil 7.4. Eleman boyutlandırılması

Görüldüğü takım üzerinde büküm üzerine gelen örneklerin mesh ölçüsü 2.5 mm ile 0.5 mm arasında değişmektedir. Bükümün olduğu yerde büküm yarıçapı üzerinden en az 4 birim

mesh ile geçmesi gerektiğinden 0.5 mm'e kadar düşürülmüştür. Bükümü etkilemeyen diğer bölgelerde ise mesh size 2.5 mm tutulmuştur.



Şekil 7.5. Zaman-basınç grafiği

Analiz işlemi 0.2 saniyelik bir zaman diliminde olmakta ve 40 adımdan oluşmaktadır.

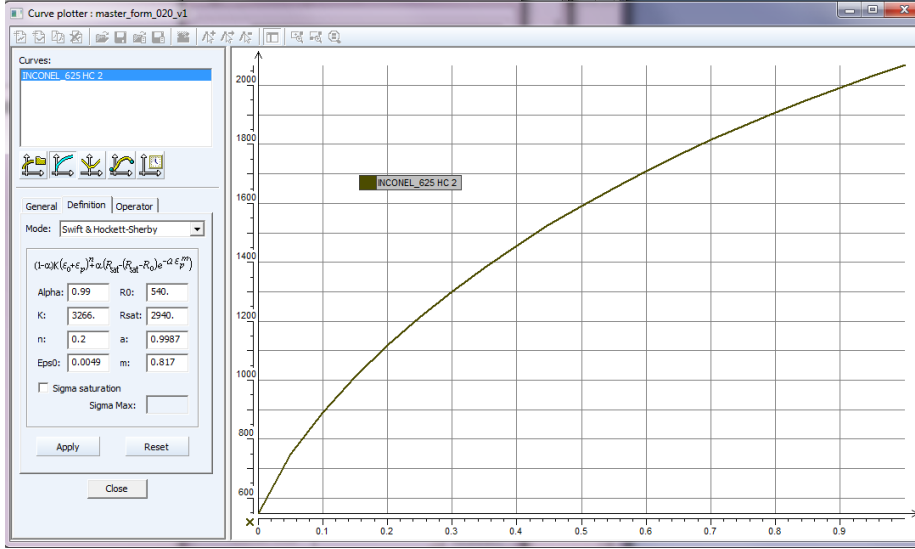
Bu süreyi arttırılarak yapılan denemelerde geri esneme bir etkisi olmadığı ve uzun süren analiz sonucunda analizlerin mantıklı sonuçlar vermediği görüldüğünden zaman olarak toplamda 0,2 saniyede gerçekleşmektedir. Diğer uçak parçalarının analizlerinde de bu süre kullanılmaktadır.

0,2 saniyelik süreçte iş parçası üzerinde şekil verme kuvvetinden dolayı oluşan ivmelenmenin önüne geçmek için *Mass Scale* ayarı arttırılarak bu ivmenin etkisi minimuma düşürülmüştür. Analiz programında bu değer otomatik olarak belirlenir. En az Eleman boyutunun 2 katı kadar olması tavsiye edilir.

Mass scale denen analizde kullanılan bu işlev parçanın ağırlığının etkisini minimuma indirir bu işlev özellikle ince parçalarda daha mantıklı analiz sonuçları almamızı sağlar.

Bu form işleminde basınç 0.2 saniyede 80 bar'a kadar çıkmaktadır.





Şekil 7.6. Inconel 625'e ait gerinim-gerilim parametreleri

İş parçası PAM-STAMP programında ön tanımlı Swift & Hocket-Sherby denklemi tanımlı olduğu için Swift denklemine çevirmek için;

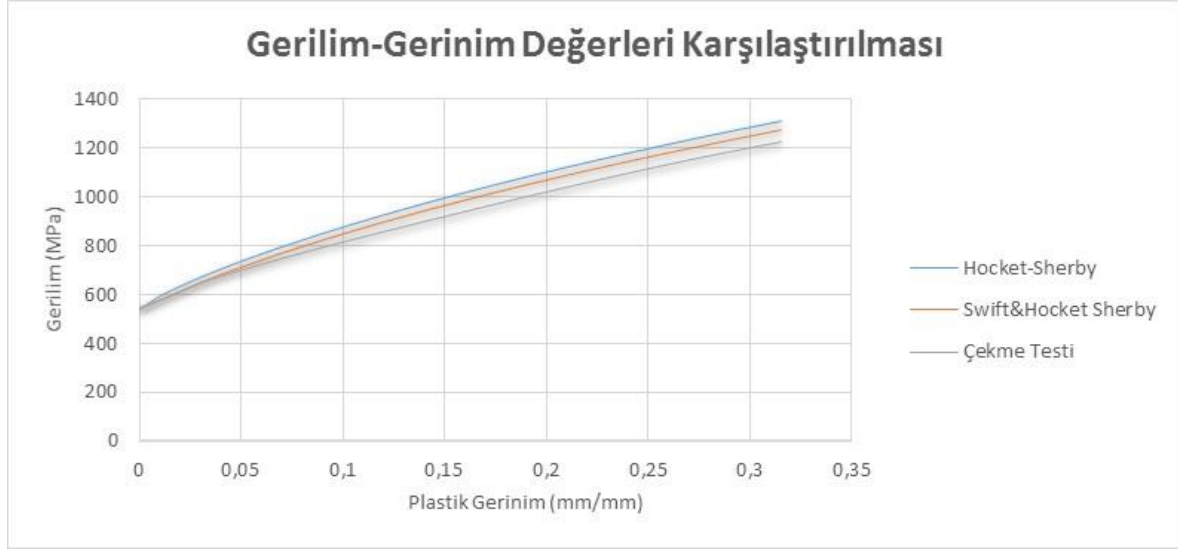
$$\bar{\sigma}(\varepsilon_p) = 2940 - 2400 * e^{-0.9947 * (\varepsilon_p^{0.817})} \quad (7.1)$$

Denklemi alınarak Swift & Hocket-Sherby denklemine dönüştürülmüştür.

$$\sigma(\alpha, K, \varepsilon_0, \varepsilon_p, n, R_{SAT}, R_0, a, m) = (1 - \alpha)K(\varepsilon_0 - \varepsilon_p)^n + \alpha(R_{SAT} - (R_{SAT} - R_0)e^{-a\varepsilon_p^m}) \quad (7.2)$$

Çizelge 7.1. Denklem katsayılarının uyarlanması

	$n$ , HS için $m$ , S&HS için	$K$	$a$ , HS için $R_{sat}$ , S&HS için	$b$ , HS için $R_{sat}-R_0$ S&HS için	$c$ , HS için $a$ , S&HS için	$n$ , S&HS için	$\alpha$
<i>Hocket-Sherby</i>	0.817	-	2940	2400	0.9947	-	-
<i>Swift &amp; Hocket-Sherby</i>	0.817	3266	2940	2400	0.9947	0.2	0.99



Şekil 7.7. Inconel 625'e ait gerilim-gerinim değerlerinin karşılaştırılması

Diyaframın tanımlanması;

Diyafram tanımlanırken; Mooney-Rivlin malzeme kanunu kullanılmıştır. Bu model gerinim-enerji fonksiyonu olan  $W$  'dan yola çıkar.

$$W = f(I_1, I_2, I_3) \quad (7.3)$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (7.4)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \quad (7.5)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (7.6)$$

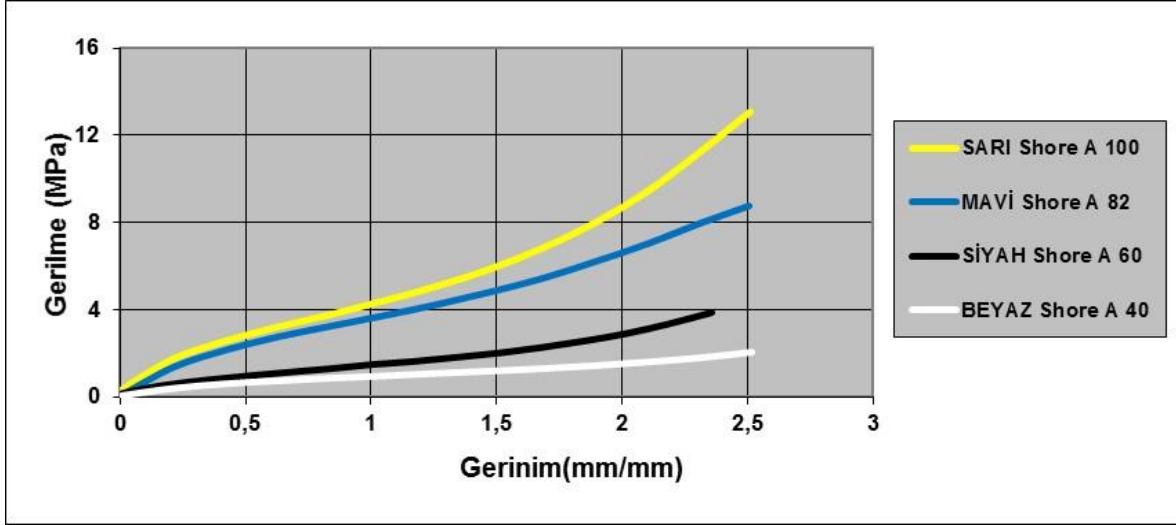
Hiper-elastik malzemeler sıkıştırılmaz kabul edildiği için ;  $I_3 = 1$  böylelikle

$$W = W(I_1 - 3, I_2 - 3) \quad (7.7)$$

$$W = A_{MR}(I_1 - 3) + B_{MR}(I_2 - 3) + C_{MR} \left( \frac{1}{I_3} - 1 \right) + D_{MR}(I_3 - 1)^2 \quad (7.8)$$

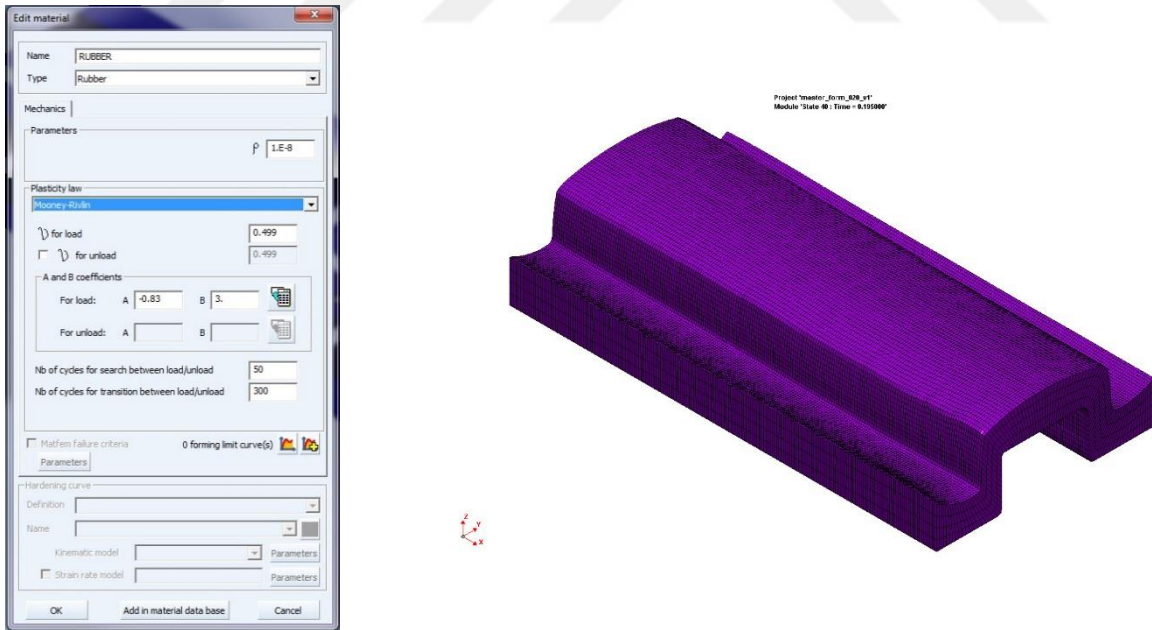
$$C_{MR} = \frac{1}{2} A_{MR} + B_{MR} \quad (7.9)$$

$$D_{MR} = \frac{A(5\nu-2)+B(11\nu-5)}{2(1-2\nu)} \quad (7.10)$$



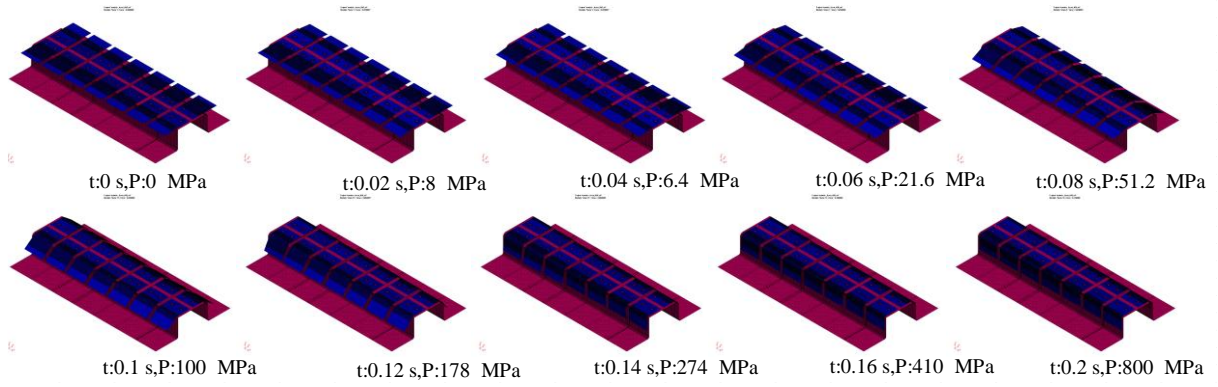
Şekil 7.8. Diyafram örtülerine ait gerilim-gerinim değerleri

Tezgâhın kauçuğu doğal kauçuk olup siyah renkli ve 50 mm kalınlığındadır, analizde de bu şekilde modellenmiştir. Çekme testi verilerine göre  $A_{Rubber}$  ve  $B_{Rubber}$  Abaqus ortamında elde edilmiştir. Poisson oranı  $\nu=0.499$ ,  $A_{Rubber}$  ve  $B_{Rubber}$  sırasıyla; -0,83 ve 3 olarak modellenmiştir.

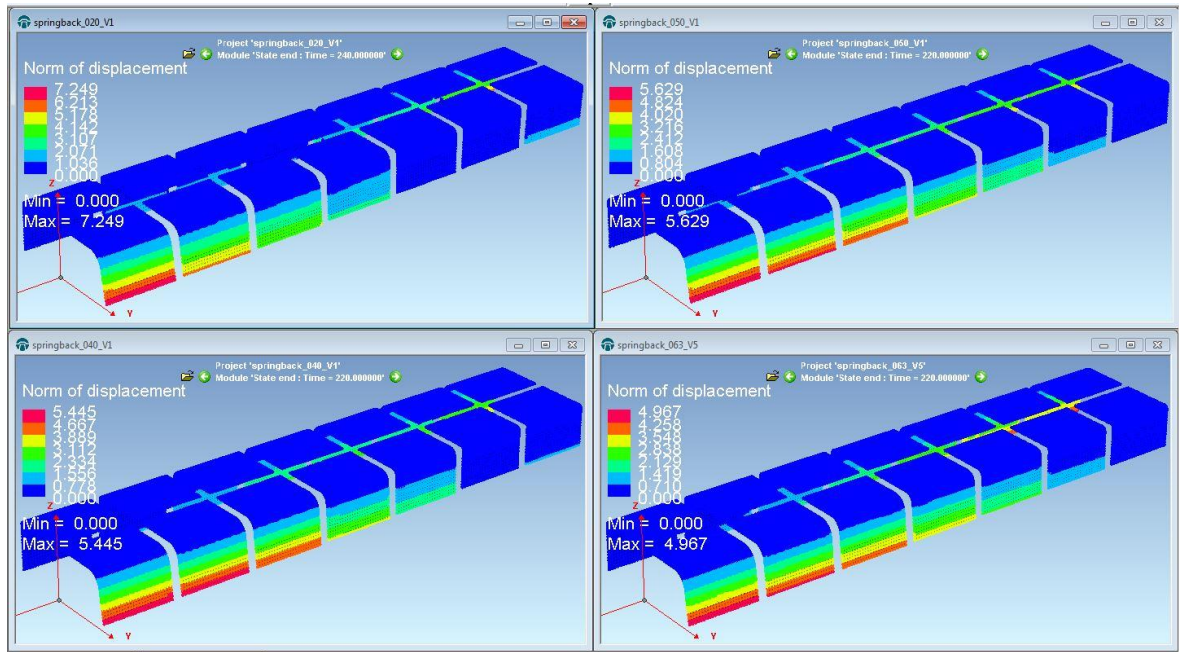


Şekil 7.9. Kauçuk örtünün pam-stamp ortamında modellenmesi

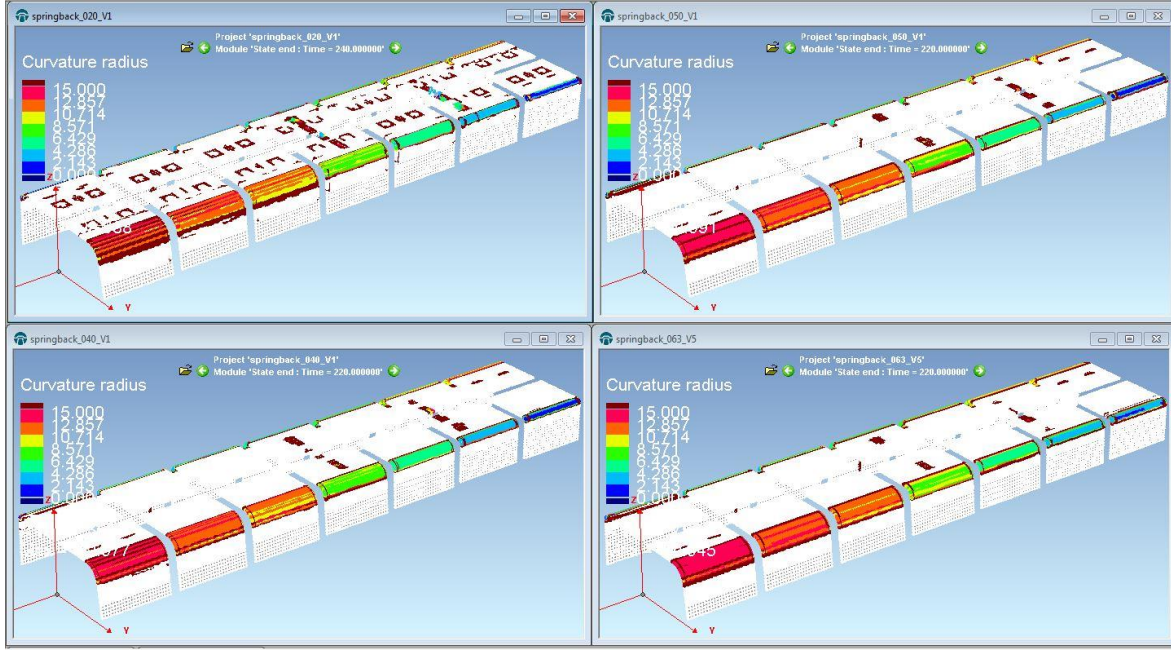
Pam-Stamp ortamında 4 farklı kalınlık (0.5 mm, 1 mm, 1.27 mm ve 1.63 mm) için 4 farklı analiz yapılmıştır.



Şekil 7.10. Büküm örneklerinin kalıp üzerinde şekillendirilmesi

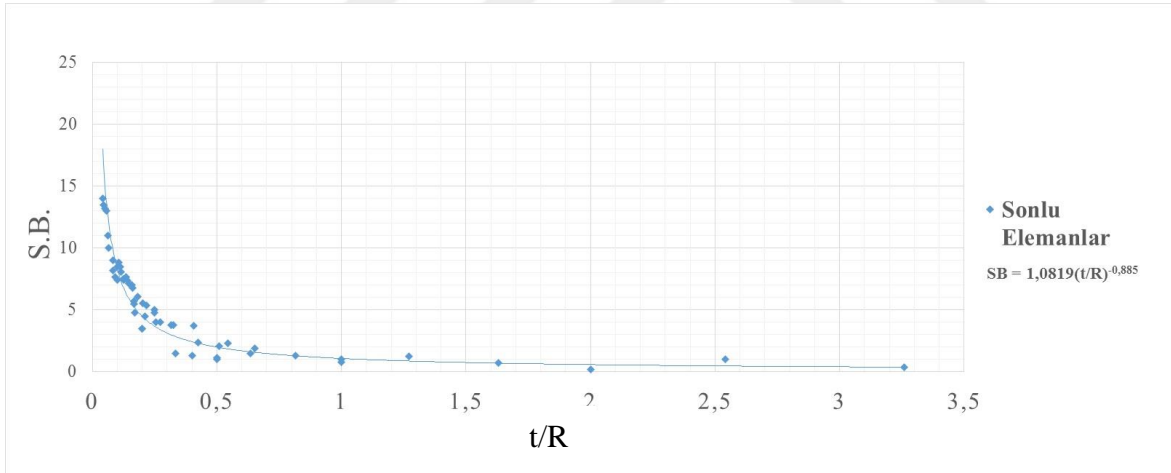


Şekil 7.11. Pam-Stamp ortamında geri esneme (mm cinsinden)



Şekil 7.12. Pam-Stamp ortamında geri esneme (büküm yarıçapındaki değişim)

Elde edilen mesh üzerinden geri esneme açıları ölçüldüğünde ise;



Şekil 7.13. Pam-Stamp ortamında yapılan analiz sonuçları SB-t/R

Bu sonuçlardan elde edilen empirik denklem ise;

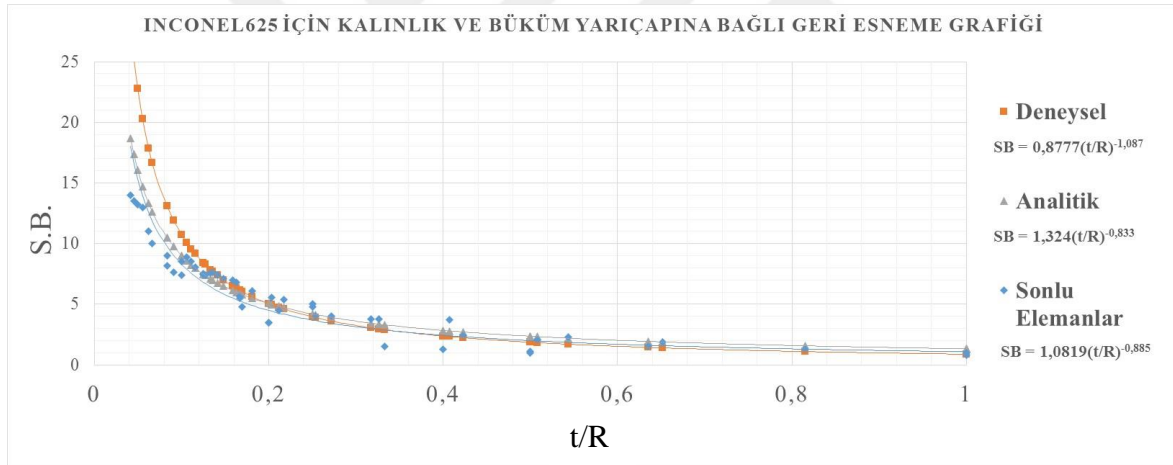
$$\theta_{SB_{FEM}} = 1,0819 \left( \frac{t}{R_{TOOL}} \right)^{-0,885} \quad (7.11)$$



## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER



Şekil 8.1. Geri esneme  $-t/R$  grafiği



Şekil 8.2. Geri esneme  $-t/R$  grafiği  $t/R$  1'e kadar

$t/R$  oranının 1 ve üzeri olduğu durumlarda malzeme kesmeye maruz kaldığından 1 ve altında kalan bölge incelenmiştir.





Resim 8.1. Büküm sonrası geri esneme davranışı

Şekil 8.1 de de görüldüğü üzere kalınlık değişip büküm yarıçapı sabit tutulduğunda geri esneme kalınlığın azalmasıyla artmaktadır. Büküm yarıçapı arttırıldığında geri esnemenin arttığı görülmüştür.

Analitik denklem 6.17'de görüldüğü üzere geri esnemenin elastik modül, akma noktası ile arttığı iş parçası kalınlık ile azaldığı görülebilir.

Büküm yarıçapı ve parça kalınlığı denklem 7.11, 6.29 ve 5.1 de yerine koyularak geri esneme değerini açısız olarak tespiti mümkün olabilmektedir. Elde edilen bu empirik formüller sayesinde  $90^{\circ}$  için herhangi bir büküm yarıçapı ve kalınlığında geri esneme tahmini yapabilmek mümkündür. Böylece ilgili kalıp için tasarım aşamasında kalıp için verilecek telafi açısının tespiti mümkün olmaktadır.

Görüldüğü üzere kalınlık, büküm yarıçapına oranı 1 ve üzerine çıktığında şekillendirmek yerine iş parçası kalıp üzerinde kesilmeye yakın bir davranış sergilemektedir. Bu oranın 1



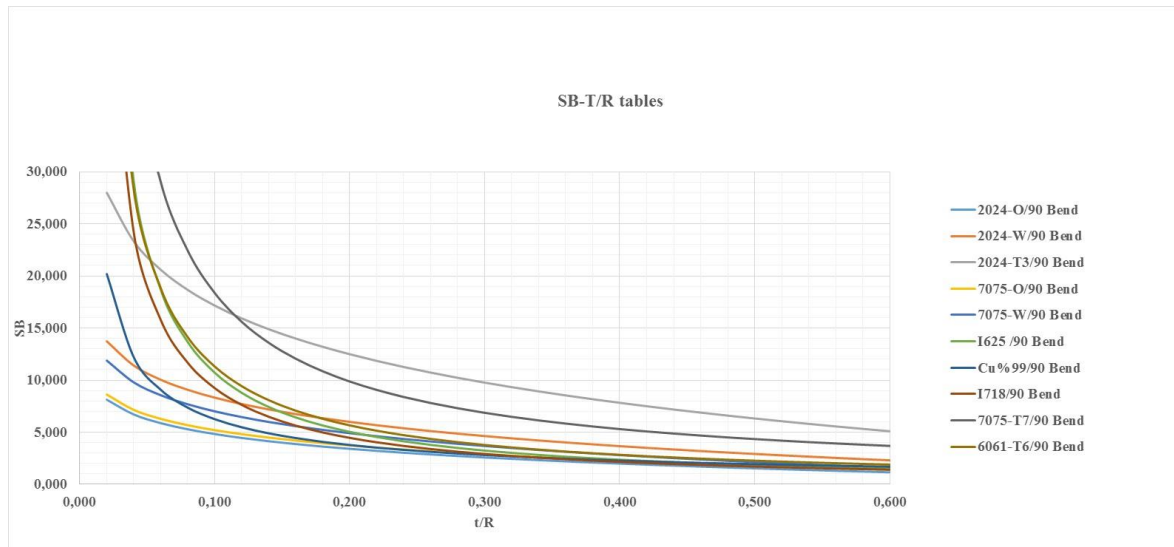
olduğu durumlarda ise iş parçasında geri esneme hemen hemen olmamaktadır bu da geri esneme oluşmamasının parça içerisindeki iç gerilmelerin çok yüksek olduğuna ve çatlak riskine işaret etmektedir. Bu t/R oranı 1'in üzerinde olduğu kalık ve büküm yarıçapı oranında uçak parçası tasarımı yapılmaması tavsiye edilebilir.

Deney sonuçlarından da görüldüğü üzere benzer t/R oranına sahip numunelerin benzer geri esneme açısına sahip olduğu görülmüştür. Geri esnemeyi etkileyen en büyük parametrenin t/R oranı olduğunu göstermiştir.

Inconel 625 gibi süper alaşım veya elastik modülü yüksek malzemeler için tespit edilen geri esneme değerlerinin t/R oranı 0.1 altında kaldığı durumlarda geri esnemenin  $10^0$  ve üzeri derecelere çıktığı bu da doğru bir açı değerinin tespitini zorlaştırmaktadır. İmalat süreci olarak flexform çelik parçalar için zor olmakta bu tarz parçalar için şahmerdan ile dövme yolu ile şekillendirme işlemi tavsiye edilebilir.

Şekil 8.2 de görüldüğü üzere genel eğilim t/R azaldıkça geri esnemenin artmasıdır.

3 farklı çözüm yaklaşımının farklı eğriler vermesinin sebebi ise analitik sonuçlarda flanş boyu



Şekil 8.3. Farklı malzemelere ait geri esneme tablosu

Farklı malzemeler için yapılabilecek çalışmalarda benzer deneyler tekrarlanıp benzer şekilde empirik formüller çıkarılabilmemesi mümkün olabilir.

Deneysel kalıp sayesinde şirket içerisinde geri esneme davranışı bilinmeyen diğer malzemeler için de deneyler yapılmış onlar için de empirik formüller çıkarılmıştır.

Şirket bünyesine kazandırılan deneme kalıbı sayesinde 7075-T6,7075-T7,C10100,Inconel 718 gibi malzemeler için de denemeler yapılmış ve onlar için de empirik formüller elde edilmiştir. Böylece sac metal şekillendirme konusunda bir tecrübe kazanılmıştır.



## KAYNAKLAR

1. Marciniak Z., Duncan J.L., (2002). *Mechanics of Sheet Metal Forming* 61-106.
2. Hosford W.F., Caddell R.M. (2007). *Metal Forming 3rd Edition* 35-40.
3. Wagoner R.H., Wang J.F., Li M (2006). Springback
4. Kulkarni P., Subhrangshu D., (2006). Method of predicting springback in hydroforming  
*Us patent no:US7130714*
5. Chen L., Chen H., Guo W., Chen G., Wang Q., (2014). Experimental and simulation studies of springback in rubber forming using aluminium sheet straight flanging process  
*Materials & Design, 54, 354-360*
6. Hatipoğlu H.A., (2015). *Experimental And Numerical Investigation of Stretch Forming Process for Aerospace Applications*, Doktora Tezi, Atılım Üniversitesi, İmalat Mühendisliği 23-32
7. Lim H., Lee M.G., Sung J.H., Kim J.H., Wagoner R.H., (2012). Time-dependent springback of advanced high strength steels  
*International Journal of Plasticity* 29(1), 42-59
8. Desouza T., Rolfe B.F., (2013). Understanding robustness of springback in high strength steel.  
*International Journal of Mechanical Sciences* , 68, 236-245.
9. Konzack S., Radonjic R., Liewald M., Altan T., (2018). Prediction and reduction of springback in 3D hat shape form  
*Procedia Manufacturing* 660-667
10. Vajragupta N., Hassan H., Hartmaier A. (2017). Towards prediction of springback in deep drawing using a micromechanical modeling scheme  
*Procedia Engineering*, 207, 60-65
11. Li B., McClelland Z., Horstemeyer S.J., Aslam I., Wang P.T, Horstemeyer M.F., (2015). Time dependent springback of a magnesium alloy  
*Materials & Design Volume* 66, 575-580
12. Zhang F., Ruan J., Zhang J., He K., Du R. (2018). Experimental study of springback behavior in incremental bending process ,  
*Procedia Manufacturing* 15, 1290-1297
13. Quadfasel A., Lohmar J., Hirt G., (2017). Investigations on Springback in High Manganese TWIP-Steels using U-Profile Draw Bending  
*Procedia Engineering* , 207, 1582-1587
14. Hou Y., Min J., Lin J., Liu Z., Carsley J.E., (2017). Springback prediction of sheet metals using improved material models  
*Procedia Engineering*, 207, 173-178
15. Palaniswamy H., Ngaile G., Altan T., (2004). Optimization of blank dimensions to reduce springback in the flexforming process  
*Journal of Materials Processing Technology* 146,28-34

16. Gupta M.S., Reddy D.R., (2016). Design and Analysis of aircraft sheet metal for spring back effect , *Materials Today,Proceedings* , 4, 8287-8295



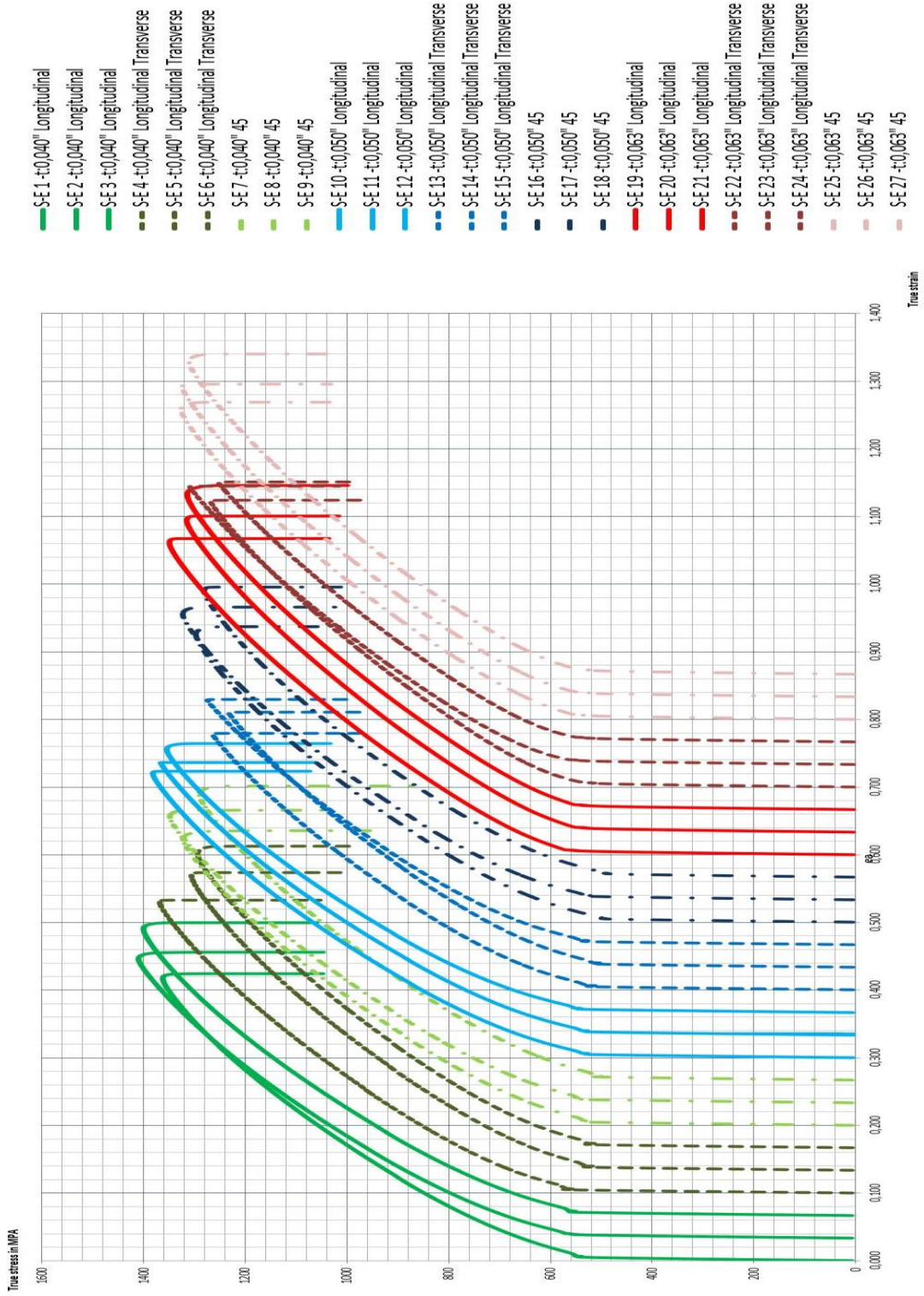


**EKLER**

EK-1. Çekme Testi Sonuçları Tablosu

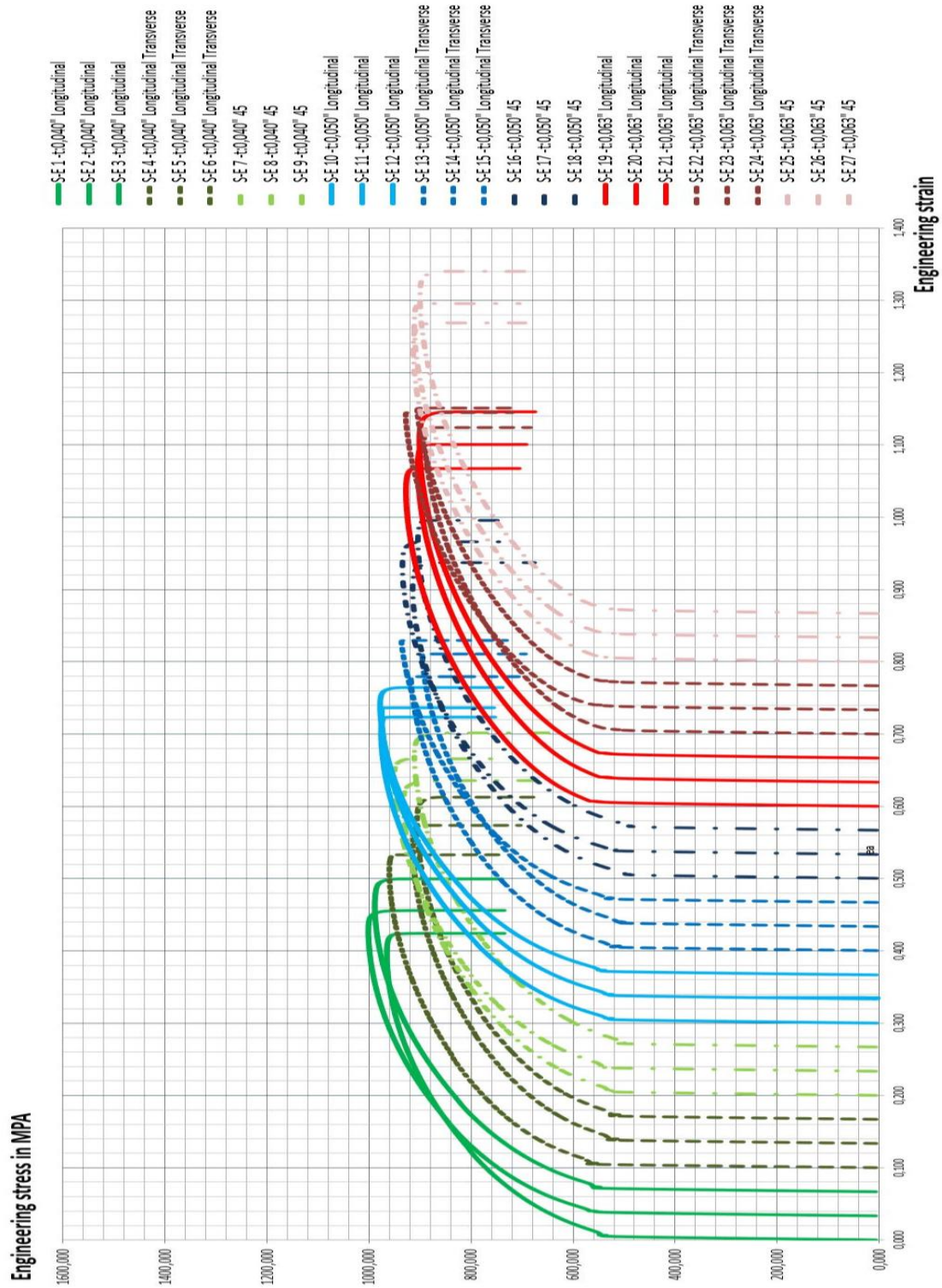
	Saun Altın Kalınlık	Hadde Yönü	Ölçülen Kalınlık	Kopma Sonrası Kalınlık	Width actual mm	Kopma Sonrası Genişliği	Elastik Modül Mpa	Tresile Stress At Yield (Offset 0.2 %) Mpa	Tensile Strength Mpa	Elongation %	Lo	Kopma Anındaki Uzunluk	% Kesit Daralması (w)	% Kesit Daralması (t)	$\epsilon l = -(e_w + \epsilon t)$	$r = e_w / \epsilon t$	R mean	R Planar = $(r_0 - 2 * r_{45} + r_{90}) / 2$	R Normal = $(r_0 + 2 * r_{45} + r_{90}) / 2$	
1			1,08	0,81	12,85	10,85	199,00	536,3	965,2	39,78		139,78	-0,16	-0,25	0,41	0,64	0,69	1,67		
2		L	1,03	0,80	12,82	10,75	186,00	558,3	1001,4	41,00		141	-0,16	-0,22	0,38	0,73	0,69			
3			1,06	0,78	12,86	10,54	186,10	554,6	988,8	41,50		141,5	-0,18	-0,26	0,44	0,69				
4			1,06	0,82	12,90	10,35	201,30	560,6	960,3	43,06		143,06	-0,2	-0,23	0,43	0,87				
5	0,04"	LT	1,08	0,82	12,92	10,27	197,40	522,0	914,3	44,80		144,8	-0,21	-0,24	0,45	0,88				
6			1,09	0,83	12,89	10,16	193,80	511,3	906,4	46,08		146,08	-0,21	-0,24	0,45	0,88				
7			1,08	0,82	12,85	10,25	186,20	526,9	933,4	42,52		142,52	-0,2	-0,24	0,44	0,83				
8		45	1,06	0,83	12,85	10,15	185,50	538,3	951,2	41,22		141,22	-0,21	-0,22	0,43	0,95	0,88			
9			1,08	0,83	12,87	10,32	176,30	497,5	911,1	41,86		141,86	-0,2	-0,23	0,43	0,87				
10			1,32	1,05	12,90	10,95	189,30	523,7	976,6	32,28	100	132,28	-0,15	-0,2	0,35	0,75	0,76			
11		L	1,32	1,13	12,88	11,21	183,40	524,3	975,8	35,48		135,48	-0,13	-0,14	0,27	0,93				
12			1,30	0,94	12,83	10,70	183,40	538,9	978,5	38,92		138,92	-0,17	-0,28	0,45	0,61				
13	0,05"	LT	1,32	1,08	12,88	10,80	199,80	513,0	918,2	36,52		136,52	-0,16	-0,18	0,34	0,89	0,84	1,70		
14			1,35	1,09	12,92	10,85	188,70	505,1	896,2	36,52		136,52	-0,16	-0,19	0,35	0,84				
15			1,35	1,09	12,88	10,93	197,40	504,7	898,4	35,50		135,5	-0,15	-0,19	0,34	0,79				
16			1,33	1,05	12,84	10,45	179,40	489,1	914,7	44,18		144,18	-0,19	-0,21	0,4	0,9				
17		45	1,34	1,03	12,94	10,02	179,30	516,8	934,7	43,88		143,88	-0,23	-0,24	0,47	0,96	0,9			
18			1,34	1,02	12,90	10,38	189,20	488,4	904,6	41,94		141,94	-0,2	-0,24	0,44	0,83				
19			1,61	1,24	12,87	10,21	185,50	554,0	928,0	47,92		147,92	-0,21	-0,23	0,44	0,91	0,84	1,75		
20		L	1,70	1,26	12,88	10,13	196,20	532,0	904,6	46,90		146,9	-0,21	-0,26	0,47	0,81	0,84			
21			1,66	1,21	12,87	10,10	179,80	535,0	901,7	48,14		148,14	-0,22	-0,27	0,49	0,81				
22	0,063"		1,69	1,33	12,92	10,58	179,80	522,3	892,8	40,86		140,86	-0,18	-0,21	0,39	0,86	0,94	1,75		
23		LT	1,64	1,36	12,89	10,50	185,80	547,3	928,9	37,12		137,12	-0,19	-0,17	0,36	1,12				
24			1,67	1,36	12,88	10,88	190,00	534,2	906,1	35,22		135,22	-0,16	-0,19	0,35	0,84				
25			1,67	1,28	12,90	10,20	191,90	542,1	913,8	47,16		147,16	-0,21	-0,23	0,44	0,91	0,86			
26		45	1,64	1,29	12,88	10,30	184,60	535,6	911,5	46,36		146,36	-0,2	-0,21	0,41	0,95				
27			1,67	1,24	12,89	10,50	187,20	526,3	900,1	46,86		146,86	-0,19	-0,26	0,45	0,73	0,86			
			Ortalama		12,88	10,49	188,23	527,36	930,27	39,78		141,61	-0,19	-0,22	0,41	0,84	0,86	0,94	1,75	

EK-2. Çekme Testi Sonuçları Gerçek Gerilim; 0,03 offsetlenmiş 27 x Çekme Testi  
(Gerçek Gerilim-Gerinim/Alan değişimi dikkate alınmış)





EK-3. Çekme Testi Sonuçları Mühendislik Gerilimi; 0,03 ofsetlenmiş 27 adet çekme testi  
(Mühendislik Gerilim-Gerinim/Alan değişimi yok)





## EK-4. Eğri oturtma sonuçları

Specimen No	Power Law		hocket-sherby				Elastic strain up to yield	voce		
	n	k	a	b	c	n		E0	a	b
1	0,244	3,236	2928,019	2403,086	1,088	0,834	0,005	1950,501	1400,093	2,631
2	0,234	3,213	2938,237	2437,752	1,088	0,826	0,005	1932,662	1400,078	2,681
3	0,235	3,217	2932,492	2397,820	1,075	0,819	0,005	1932,662	1400,078	2,681
4	0,224	3,181	3203,261	2216,785	1,075	0,819	0,005	2175,022	1608,970	1,749
5	0,226	3,183	2838,537	2286,165	1,029	0,908	0,005	2192,501	1626,590	1,714
6	0,229	3,178	3063,319	2511,988	0,896	0,906	0,006	2230,881	1666,503	1,617
7	0,228	3,191	3106,798	2542,604	0,914	0,901	0,005	2261,557	1683,253	1,667
8	0,230	3,189	3106,798	2542,604	0,914	0,901	0,005	2261,557	1683,253	1,667
9	0,237	3,208	2950,007	2401,893	0,951	0,907	0,005	2209,775	1648,321	1,652
10	0,223	3,168	2771,951	2317,972	0,905	0,722	0,005	2114,688	1555,077	1,755
11	0,226	3,188	2931,828	2469,434	0,858	0,690	0,005	2119,654	1538,793	1,882
12	0,227	3,187	2928,019	2403,086	1,088	0,834	0,005	1999,737	1432,892	2,008
13	0,227	3,190	2966,102	2548,370	0,927	0,718	0,005	1956,607	1411,109	2,327
14	0,232	3,203	3031,850	2498,061	0,989	0,853	0,005	2009,648	1453,293	2,289
15	0,244	3,236	2699,281	2258,815	1,036	0,736	0,008	1982,919	1440,785	2,172
16	0,233	3,210	2920,443	2387,270	1,080	0,848	0,005	1957,657	1402,631	2,530
17	0,241	3,233	3051,442	2503,570	1,045	0,826	0,005	1967,343	1392,439	2,704
18	0,238	3,225	2957,246	2413,552	1,097	0,847	0,005	1997,822	1431,308	2,548
19	0,248	3,257	3022,460	2469,236	0,985	0,851	0,004	1950,501	1400,093	2,631
20	0,251	3,254	3056,361	2540,236	0,899	0,835	0,004	1892,710	1353,679	2,369
21	0,244	3,235	2923,330	2410,310	0,951	0,842	0,004	1878,157	1343,167	2,358
22	0,220	3,175	2801,000	2276,086	1,051	0,851	0,005	1768,252	1229,783	2,773
23	0,248	3,185	2823,593	2316,846	0,991	0,838	0,004	1805,101	1271,846	2,508
24	0,244	3,235	2845,935	2321,557	1,038	0,825	0,005	1779,378	1230,706	2,867
25	0,267	3,210	2805,437	2393,374	0,975	0,711	0,004	1753,483	1238,011	2,822
26	0,228	3,193	2953,535	2500,262	0,919	0,723	0,004	1895,493	1351,382	2,497
27	0,275	3,211	2753,315	2347,993	0,991	0,708	0,004	1625,598	1126,157	3,269
Min	0,220	3,168	2699,281	2216,785	0,858	0,690	0,004	1625,598	1126,157	1,617
Max	0,275	3,257	3203,261	2548,370	1,097	0,908	0,008	2261,557	1683,253	3,269
Band width	0,055	0,088	503,980	331,585	0,238	0,218	0,004	635,959	557,095	1,652
Ave	0,237	3,207	2937,430	2411,731	0,995	0,818	0,00488	1985,254	1434,085	2,310
Specimen No	n	k	a	b	c	n	E0	a	b	c
	Power Law		hocket-sherby				Elastic strain up to yield	voce		

## EK-5. Deney ölçüm sonuçları

SP NO	R	Kalınlık	Ölçüm Sonucu	t/R Teorik ve Analitik	Teorik değerler	Analitik Değerler	Sonlu Elemanlar Sonucu
S19	12,5	0,49	19,56	0,0392	15,9696	23,2786	12,635
S6	11	0,48	18,04	0,04364	14,8213	20,8418	9,56
S18	10	0,5	15,74	0,05	13,4815	18,1737	6,935
S27	9	0,5	9,41	0,05556	12,5283	16,3474	9,14565
S5	8	0,47	17,92	0,05875	12,0502	15,442	5,4605
S17	7,5	0,48	12,93	0,064	11,3533	14,1897	3,85
S20	6,35	0,48	6,51	0,07559	10,1113	12,0459	8,26
S19	12,5	0,98	13,42	0,0784	9,85776	11,7483	4,82
S4	6	0,5	13,4	0,08333	9,44784	10,9573	8,39
S6	11	0,99	13,07	0,09	8,95508	10,2528	7,535
S16	5	0,48	8,55	0,096	8,56173	9,5506	1,68
S19	12,5	1,23	10,63	0,0984	8,41584	9,42562	9,1
S18	10	0,99	12,03	0,099	8,38031	9,34029	5,23
S6	11	1,24	10,13	0,11273	7,65614	8,25808	8,04
S3	4	0,49	8,73	0,1225	7,22569	7,56622	3,865
S5	8	1	10,65	0,125	7,1248	7,45977	1,735
S18	10	1,27	8,48	0,127	7,04652	7,36474	7,525
S19	12,5	1,61	8,58	0,1288	6,97784	7,28598	5,61
S17	7,5	0,98	8,48	0,13067	6,9083	7,14983	7,945
S27	9	1,28	6,3	0,14222	6,51264	6,61224	5,245
S6	11	1,6	7,94	0,14545	6,41156	6,48661	7,15
S18	10	1,58	6,67	0,158	6,05281	5,99792	5,095
S5	8	1,28	8,89	0,16	6,00005	5,91739	6,85
S2	3	0,49	6,7	0,16333	5,91456	5,77647	4,14
S4	6	0,98	7,84	0,16333	5,91456	5,79427	0,87
S17	7,5	1,27	6,34	0,16933	5,7679	5,61163	5,345
S20	6,35	1,24	4,03	0,19528	5,22313	4,91739	6,29
S15	2,5	0,49	5,12	0,196	5,20969	4,8841	3,725
S16	5	0,98	5,18	0,196	5,20969	4,89526	0,625
S5	8	1,64	6,74	0,205	5,04942	4,71028	5
S4	6	1,3	5,63	0,21667	4,8586	4,47281	4,53
S17	7,5	1,65	5,21	0,22	4,80724	4,41638	3,94
S16	5	1,25	3,85	0,25	4,39801	3,93092	3,765
S3	4	1	4,77	0,25	4,39801	3,92809	0,375
S20	6,35	1,6	3,3	0,25197	4,37406	3,90718	3,96
S4	6	1,56	4,66	0,26	4,27958	3,79888	4,19
S14	2	0,55	7,43	0,275	4,11573	3,60517	3,625
S3	4	1,26	3,94	0,315	3,74454	3,20708	3,47
S16	5	1,59	3,47	0,318	3,71991	3,18283	2,245
S2	3	1	3,67	0,33333	3,59997	3,05273	1,07
S15	2,5	1	2,66	0,4	3,17094	2,61582	3,63
S2	3	1,26	2,67	0,42	3,06507	2,5127	2,29
S3	4	1,71	3,33	0,4275	3,02755	2,47752	1,33
S15	2,5	1,24	1,97	0,496	2,73003	2,19392	0,4
S1	1	0,5	3,78	0,5	2,71481	2,17812	1,91
S14	2	1	3,34	0,5	2,71481	2,17931	2,3
S2	3	1,67	1,85	0,55667	2,51935	2,00279	1,575
S15	2,5	1,58	1,03	0,632	2,30634	1,81563	1,81
S14	2	1,3	2,08	0,65	2,2617	1,77705	1,29
S14	2	1,59	1,27	0,795	1,96592	1,53247	1,39
S7	0,5	0,46	1,18	0,92	1,77593	1,38265	1,4385
S1	1	1,02	1,47	1,02	1,65286	1,29013	1,035
S1	1	1,25	1,03	1,25	1,43474	1,13298	0,385
S1	1	1,58	0,46	1,58	1,21887	0,98741	0,075
S7	0,5	1	0,2	2	1,03444	0,87145	0,853
S7	0,5	1,26	0,15	2,52	0,88074	0,78157	0,17
S7	0,5	1,6	0,05	3,2	0,74583	0,70811	

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BEYAZGÜL, Kutay  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 23.09.1991, Ankara  
Medeni hali : Bekâr  
Telefon : 0 (537) 400 45 10  
Faks : 0 (312) 811 18 00  
e-mail : kbeyazgul@yahoo.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2013
Lise	Mehmet Emin Rezulzade Anadolu Lisesi	2009

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2015-Halen	Türk Havacılık ve Uzay Sanayii	Tasarım Mühendisi
2014-2015	Hidromek A.Ş.	Tasarım Mühendisi

### Yabancı Dil

İngilizce & Almanca

### Yayımlar

-

### Hobiler

Motosiklet, Kayak, Fotoğraf



**GAZİ GELECEKTİR...**