

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**DİYAFRAMLA HİDROLİK ŞEKİLLENDİRMEDE PASLANMAZ
AISI-301 ÇELİKLERİN GERİ ESNEME MİKTARLARININ SAYISAL
VE DENEYSEL İNCELENMESİ**

HAZIRLAYAN

ERTUĞ EREN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2025

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**DİYAFRAMLA HİDROLİK ŞEKİLLENDİRMEDE PASLANMAZ
AISI-301 ÇELİKLERİN GERİ ESNEME MİKTARLARININ SAYISAL
VE DENEYSEL İNCELENMESİ**

HAZIRLAYAN

ERTUĞ EREN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. MUHAMMED ARAS

ANKARA – 2025

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Ertuğ EREN tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 02 / 01 / 2025

Tez Adı: Diyaframla Hidrolik Şekillendirmede Paslanmaz AISI-301 Çeliklerin Geri Esneme Miktarlarının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi

Tez Jüri Üyeleri

İmza

Doç. Dr. Reza AGHAZADEH (Türk Hava Kurumu Üniversitesi)

Doç. Dr. Muhammed ARAS (Başkent Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Erhan SOLAKOĞLU (Başkent Üniversitesi)

ONAY

Prof. Dr. Dilek ÇÖKELİLER SERDAROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 20 / 01 / 2025

Öğrencinin Adı, Soyadı: Ertuğ EREN

Öğrencinin Numarası:22120134

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Programı: Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Doc. Dr. Muhammed ARAS

Tez Başlığı: Diyaframla Hidrolik Şekillendirmede Paslanmaz AISI-301 Çeliklerin Geri Esneme Miktarlarının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 63 sayfalık kısmına ilişkin, 20 / 01 / 2025 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından İthenticate adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 7'dir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

Tarih: 20 / 01 / 2025

Öğrenci Danışmanı:

Doç. Dr. Muhammed ARAS

.....

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde değerli katkıları ve rehberliği ile bana yol gösteren danışmanım Doç. Dr. Muhammed ARAS'a,

Tez çalışmam için sağladığı imkânlar ve desteği için Türk Havacılık ve Uzay Sanayii AŞ'ye, Süreç boyunca destekleri esirgemeyen yöneticim Hakan AYDIN'a ve diğer çalışma arkadaşlarıma,

Son olarak her zaman yanımda olan ailem ve sevgili eşim S. Betül ÖNDER EREN'e sonsuz teşekkür ederim.



ÖZET

Ertuğ EREN

**DİYAFRAMLA HİDROLİK ŞEKİLLENDİRMEDE PASLANMAZ AISI-301
ÇELİKLERİN GERİ ESNEME MİKTARLARININ SAYISAL VE DENEYSEL
İNCELENMESİ**

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

2025

AISI-301 çelik, yüksek mukavemet ve korozyon direnci özelliğiyle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde sıklıkla tercih edilir. Bu malzemenin şekillendirilme yöntemlerinden biri de form kalıbı üzerinde hidroforming işlemidir. Bu yöntemle diyafram ile parçaya iletilen yüksek basınçla, parçanın kalıp geometrisini alması sağlanır. Ancak bu şekillendirme operasyonu esnasında öngörülemeyen geri yaylanma miktarları parçanın istenmeyen şekilde üretilmesine neden olabilir. Bu çalışmada AISI-301 çelik sac malzemenin hidroforming işlemi sonrasındaki geri yaylanması incelenmiştir. Geri yaylanmayı etkileyen faktörler olan kalınlık, büküm açısı ve büküm radiusunu incelemek üzere 0,635 mm, 1,016 mm ve 1,27 mm kalınlıkta numuneler, 2,5 mm, 5 mm, 7,5 mm ve 10 mm büküm yarıçapları ve 90° ve 120° büküm açısı olan kalıp üzerinde hidroformla şekillendirmeye tabi tutulmuşlardır. Aynı zamanda bu değişkenlerle şekillendirme prosesinin sonlu eleman analizleri PAM-STAMP programında gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Hem deneyler hem de sonlu eleman analizleri AISI-301 paslanmaz çelik sac malzemenin sac kalınlığı ve büküm radiusu oranının 0,1'e yaklaştığı durumlarda geri yaylanma miktarının 20 derecelere kadar çıktığı hesaplanmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: AISI-301 Çelik, hidroforming işlemi, Geri Esneme, Sac Metal

ABSTRACT

Ertuğ EREN

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SPRINGBACK OF AISI-301 BY HYDROFORMING WITH MEMBRANE DIAPHRAGM

Baskent University Institute of Science and Engineering

Department of Mechanical Engineering

2025

AISI-301 steels with their high strength and corrosion resistance, are widely preferred in the aerospace and automotive industries. One of the forming methods for this sheet metals is hydroforming on a form die. In this method, the high pressure transmitted to the part by the diaphragm ensures that the part takes the shape of the die geometry. However, during this forming operation, unpredictable amounts of springback can cause the part to be produced with undesirable deviations. In this study, the springback of AISI-301 sheet material after the hydroforming process was investigated. In this context, specimens with thicknesses of 0.635 mm, 1.016 mm, and 1.27 mm were subjected to hydroforming using a die with bending radius of 2.5 mm, 5 mm, 7.5 mm, and 10 mm and bending angles of 90° and 120° to examine the effects of thickness, bending angle, and bending radius on springback. Additionally, the finite element analyses of the forming process with these variables were conducted using the PAM-STAMP software. Both FEA and experiments have shown that in cases where the sheet thickness to bending radius ratio of AISI-301 stainless steel sheet material reaches 0.1, the amount of springback can reach up to 20 degrees.

KEYWORDS: AISI-301 Steel, Hydroforming Process, Springback, Sheet Metal

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1.Tez Konusu ve Amacı.....	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. AISI-301 Paslanmaz Çelik	3
2.2. Sac Metal Şekillendirme	5
2.3. Şekillendirme Sınır Diyagramı.....	8
2.4. Hidrolik Şekillendirme.....	10
2.5. Saclarda Geri Esneme Sorunu	16
2.6. Geçmişte Yapılan Çalışmalar	20
3. MATERYAL VE YÖNTEM	24
3.1. Deneyde Kullanılan Malzeme ve Özellikleri	24
3.2. Çekme Testi.....	24
3.3. Deney Kalıbı Tasarımı	26
3.4. Test Numunesi	27
3.5. Deney	28
3.6. Ölçüm.....	30
4. SAYISAL YÖNTEM.....	31
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	37
5.1. Çekme Testi Sonuçları	37
5.2. Deney Sonuçları.....	40
5.3.Analiz Sonuçları.....	44
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR.....	60

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. AISI-301çeliğın kimyasal bileşenleri.....	4
Tablo 2.2. AISI-301 çeliğın spesifikasyonları.....	4
Tablo 2.3. AISI-301 çeliğın elastisite modülü değeri 4	
Tablo 2.4. Hidrofomingle sıklıkla şekillendirilen metaller	16
Tablo 5.1. Ölçüm sonuçları	42
Tablo 5.2. SAE sonucu geri yayınma açıları	54
Tablo 6.1. SAE ve deney sonuçları	56

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 AISI-301 çeliğin gerilim gerinim eğrileri	5
Şekil 2.2. Sac şekillendirme süreçlerinin sınıflandırılması	6
Şekil 2.3. Sac şekillendirme sorunları: (a)(b) kırışma, (c) yırtılma, (d) kulaklanma.....	6
Şekil 2.4. ŞSD'e göre kopma ve boyun verme.....	8
Şekil 2.5. Keeler'a göre şekillendirme Sınır Diyagramı	9
Şekil 2.6. Keeler ve Goodwin'e göre şekillendirme Sınır Diyagramı.....	9
Şekil 2.7. Hidroformingin sınıflandırılması	10
Şekil 2.8. Hidrolik şekillendirmeyeyle üretilmiş otomobil parçaları	11
Şekil 2.9. Hidrolik şekillendirmeyeyle üretilmiş parçalar.....	11
Şekil 2.10. AESA Quintus hidrolik şekillendirme tezgâhı.....	12
Şekil 2.11. Akışkan hücreli hidrolik şekillendirme bileşenleri	12
Şekil 2.12. Diyaframla hidroform şekillendirme.....	13
Şekil 2.13. Hidroforming için hazırlanan iş parçası	14
Şekil 2.14. Hidroforming işlemi sonrası görüntüsü.....	14
Şekil 2.15. Bükme işlemi.....	16
Şekil 2.16. Bükme işlemi sonrası geri yaylanma.....	17
Şekil 2.17. Moment-eğrilik diyagramı	18
Şekil 2.18. Elastik bükmede moment eğrilik diyagramı	18
Şekil 2.19. Gerilme uygulanmaksızın bükülmüş bir sac'ta yükün kaldırılması	19
Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan malzemenin malzeme yapısı	24
Şekil 3.2 ASTM E8'e göre numune ölçüleri	25
Şekil 3.3. ASTM E8 standardına göre kestirilen AISI-301 çelik numuneler.....	25
Şekil 3.4. Instron çekme cihazı.....	26

	Sayfa
Şekil 3.5. Test kalıbı	27
Şekil 3.6. Test numunesi	28
Şekil 3.7. Kalıp üzerine yerleştirilmiş numuneler	28
Şekil 3.8. Tezgâh üzerine yerleştirilmiş kalıp ve numuneler	29
Şekil 3.9. Tezgâhın kontrol ekranı	30
Şekil 3.10. Mitutoyo açılı ölçüm aleti.....	30
Şekil 4.1. Analiz için tasarlanan yüzeyler	31
Şekil 4.2. Mesh ağı görüntüsü	32
Şekil 4.3. Adaptif meshing	33
Şekil 4.4. Diyaframın PAM-STAMP ortamında modellenmesi	33
Şekil 4.5. Kauçuk yapısında sınır koşulları	34
Şekil 4.6. İş parçasının sınır koşulları	34
Şekil 4.7. Temas yüzeyleri	35
Şekil 4.8. Analizde genel yerleşim	35
Şekil 4.9. Zaman-basınç eğrisi ve grafiği	36
Şekil 4.10. AISI-301 çeliğe ait parametrelerin girilmesi.....	36
Şekil 5.1. Çekme testi sonuçları	37
Şekil 5.2 AISI-301 çelik çekmedeki mühendislik gerilim-gerinim grafiği	38
Şekil 5.3. AISI-301 çelik çekmedeki gerçek gerilim-gerinim grafiği	39
Şekil 5.4 Logaritmik skalada çekme diyagramı	40
Şekil 5.5. Form işlemi sonrası numuneler	41
Şekil 5.6. Form işlemi sonrası numune ölçümü	41
Şekil 5.7. AISI-301 çeliğin farklı kalınlıklara ve büküm açılarına göre geri yaylanmalar	42
Şekil 5.8. AISI-301 çeliğin t/R cinsinden geri yaylanmaları.....	43

Şekil 5.9.	Lastik-diyafram ile form sonrası görüntüsü	45
Şekil 5.10.	Analizde şekillendirme sonucunda numune üstündeki gerinim.....	45
Şekil 5.11.	Numune kalınlığı 0,635 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	46
Şekil 5.12.	Numune kalınlığı 1 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	46
Şekil 5.13.	Numune kalınlığı 1,27 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	46
Şekil 5.14.	Numune kalınlığı 0,635 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	47
Şekil 5.15.	Numune kalınlığı 1,0 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	47
Şekil 5.16.	Numune kalınlığı 1,27 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	47
Şekil 5.17.	Numune kalınlığı 0,635 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	48
Şekil 5.18.	Numune kalınlığı 1,0 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	48
Şekil 5.19.	Numune kalınlığı 1,27 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	48
Şekil 5.20.	Numune kalınlığı 0,635 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	49
Şekil 5.21.	Numune kalınlığı 1 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	49
Şekil 5.22.	Numune kalınlığı 1,27 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	49
Şekil 5.23.	Numune kalınlığı 0,635 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	50
Şekil 5.24.	Numune kalınlığı 1 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	50
Şekil 5.25.	Numune kalınlığı 1,27 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	50
Şekil 5.26.	Numune kalınlığı 0,635 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	51
Şekil 5.27.	Numune kalınlığı 1 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	51
Şekil 5.28.	Numune kalınlığı 1,27 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	51
Şekil 5.29.	Numune kalınlığı 0,635 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	52
Şekil 5.30.	Numune kalınlığı 1 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	52
Şekil 5.31.	Numune kalınlığı 1,27 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	52
Şekil 5.32.	Numune kalınlığı 0,635 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	53

Şekil 5.33.	Numune kalınlığı 1 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	53
Şekil 5.34.	Numune kalınlığı 1,27 mm için geri yaylanma miktarları (mm)	53
Şekil 5.35.	Analize sonucu t/R – geri yaylanma.....	54
Şekil 6.1.	Deney ve analiz sonuçları t/R – geri yaylanma karşılaştırması.....	57
Şekil 6.2.	Deney ve analiz sonuçları t/R – geri yaylanma karşılaştırması.....	57



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ABB	Asea Brown Broveri
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
ASTM	American Society for Testing and Materials
DXF	2 boyutlu Teknik Resim Formatı
E	Elastik Modül
E _c	Elastik Modül, basma
FLD	Forming Limit Diagram
FEA	Finite Element Analysis
G	Rijitlik modülü
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
K	Geri yayınma faktörü
Mm	Milimetre
n	Pekleşme üsteli
R ₀	Bükme öncesi büküm yarıçapı
R ₁	Bükme sonrası büküm yarıçapı
SB	Geri esneme
SEA	Sonlu eleman analizi
ŞSD	Şekillendirme Sınır Diyagramı
TUSAŞ	Türk Havacılık Uzay Sanayi AŞ.
t	Kalınlık
XFEM	Extended finite element
σ_{ak}	Akma gerilimi
ϵ	Gerinim
θ_0	Bükme öncesi büküm açısı
θ_1	Bükme sonrası büküm açısı
ν	Poisson oranı

1. GİRİŞ

Havacılık, uzay ve otomotiv sektörleri, modern mühendislikte en zorlu tasarım ve üretim gerekliliklerini karşılamak zorunda olan sektörler arasında yer almaktadır. Bu sektörlerde kullanılan bileşenlerin hem yüksek performans sergilemesi hem de güvenilirlik ve dayanıklılık açısından en üst düzeyde olması gerekmektedir. Ayrıca maliyet, sürdürülebilirlik, karlılık ve yüksek rekabet gibi faktörler malzeme seçimi ve tasarım süreçlerinde yenilikçi yaklaşımları zorunlu kılmaktadır. Özellikle hafif, dayanıklı ve şekillendirilebilir malzemelerin tercih edilmesi, bu sektörlerin öncelikli hedefleri arasındadır [1].

Uçak komponentlerinde ve parçalarında kullanılan geleneksel metalik malzemeler, alüminyum, titanyum ve çelik alaşımlarıdır. Son otuz yılda, gelişmiş fiber kompozitlerin kullanımı hızla artmıştır. Bugün itibarıyla, Boeing 787 gibi yeni ticari jetlerde, yapısal ağırlığın %50'sine kadar kompozit malzemeler kullanılmaktadır [2].

Günümüzde sac metaller bu sektörlerde yaygın olarak kullanılmakta ve sac metallerin üretim yöntemleri konusunda oldukça çalışma bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi de flexform olarak da adlandırılan hidrolik şekillendirme. Özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde birçok avantajı olması sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Hidrolik şekillendirme karmaşık şekiller ve düzensiz konturlu parçaların kalıp üzerinde üretilmesi için ideal yöntemdir. Düşük kalıp maliyetleri ve kısa kurulum süresi gibi birçok avantaj sunması sebebiyle tercih edilmektedir [3].

Bu yöntemle şekillendirilen sac malzemelerin üretiminde ortaya çıkan teknik zorluklardan bir tanesi geri esneme (springback) olarak bilinen, şekillendirme prosesi sonrasında malzemenin üzerindeki yüklerin kaldırılması ile bir miktar eski haline dönme hareketidir. Geri yaylanma sorunu üretilecek parçanın geometrisini etkileyerek istenilen toleranslardan sapmalara yol açabilir. Bu durum, özellikle yüksek hassasiyet gerektiren otomotiv, havacılık ve uzay sanayinde kritik bir sorun haline gelmektedir [4].

Geri yaylanma, malzemenin elastik ve plastik deformasyon özellikleri, şekillendirme yöntemi, kalıp tasarımı ve işlem parametreleri gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Bu

nedenle, geri yaylanmayı öngörmek ve minimize etmek için hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle kapsamlı analizler yapılması gerektirir.

1.1. Tez Konusu ve Amacı

Bu çalışmada, paslanmaz AISI-301 çelik sac malzemenin hidropres ile şekillendirilmesi sırasında meydana gelen geri yaylanma davranışı hem deneysel hem analitik olarak incelenmiştir.

Malzemenin mekanik özellikleri incelenmiş ve bu özelliklerin hidroforming ile prosesi sonucundaki geri yaylanma davranışına etkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca, deneysel ve sayısal analizler yardımıyla geri yaylanmanın öngörülmesi ve kontrol edilmesine yönelik stratejiler geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Analitik yöntem olarak Pam-Stamp sonlu eleman analiz programı tercih edilmiştir. Bu bağlamda, iki farklı büküm açısına ve dört farklı büküm radiusuna sahip kalıp üzerinde farklı kalınlıklarda AISI-301 çelik sac malzeme diyaframla şekillendirme yöntemiyle bükülmüş ve parçalarda oluşan geri yaylanma miktarlarının ve bunları etkileyen parametrelerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu çıktıların sonucunda tasarlanacak kalıplardaki geri yaylanma miktarlarının daha doğru tahmin edilmesi ve daha doğru parça üretiminin sağlanması planlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE GENEL BİLGİLER

2.1. AISI-301 Paslanmaz Çelik

AISI-301 çelik, %18 krom ve %8 nikel içeren çelikler serisindeki en düşük alaşımlı üye olup, östenitik paslanmaz çelik ailesine aittir. Östenitik Fe-Cr-Ni alaşımları, 1909-1912 yılları arasında Benno Strauss ve Edward Maurer tarafından Krupp Laboratuvarlarında geliştirilmiş ve günümüzde yaygın olarak kullanılan 18-8 serisi paslanmaz çeliklerin ortaya çıkmasına öncülük etmiştir [5].

Bu östenitik alaşımlar, korozyon direnci yüksek alaşımlar olarak geliştirilmiş; ancak aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda iyi oksidasyon direncine, iyi sünme dayanımına ve mükemmel soğuk şekillendirilebilirliğe de sahiptir.

AISI-301 çelik, uçak ve füze uygulamalarında yüksek mukavemet seviyelerinde en sık kullanılan malzemedir. Bunun nedeni, daha yüksek deformasyon sertleşmesi (işlenerek sertleştirilebilme) özelliğidir. Ayrıca yüksek mukavemet özellikleri nedeniyle otobüs, kamyon, treyler ve demiryolu vagon gövdelerinin imalatında kullanılır [5].

Yüksek korozyon direnci sebebiyle, havalandırma ve iklimlendirme, güç santralleri, petro-kimya tesisleri, petrol rafinerileri, gıda endüstrisi, kâğıt hamuru endüstrisi, katık ve temiz su hatları, denizcilik endüstrisi gibi birçok sektörde kullanım alanı bulunmaktadır [6].

Bu malzeme ısı ile sertleştirilemez, ancak soğuk şekillendirme yoluyla hızla sertleşir. Oda sıcaklığında 275 ksi (1896 Mpa) gibi yüksek çekme mukavemetlerine ulaşmak mümkündür. Genellikle tavllanmış veya soğuk haddelenmiş halde kullanılır [5].

AISI-301'in kimyasal bileşenleri Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. AISI-301 çeliğin kimyasal bileşenleri [5]

Alloy	Type 301			
Source	AMS (ref. 3. 1)		AISI (ref. 3. 2)	
Constituert	Percent		Percent	
	Min	Max	Min	Max
Carbon	-	0.15	-	0.15
Chromium	17.00	-	16.00	18.00
Copper	-	0.75	-	-
Mangenes	-	2.00	-	2.00
Molybdenum	-	0.75	-	-
Nickel	7.00	-	6.00	8.00
Phosphorus	-	0.040	-	0.045
Silicon	-	1.00	-	1.00
Sulfur	-	0.030	-	0.030
Iron	Balance		Balance	

AISI-301 çeliğinin spesifikasyonları Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. AISI-301 çeliğin spesifikasyonları [7]

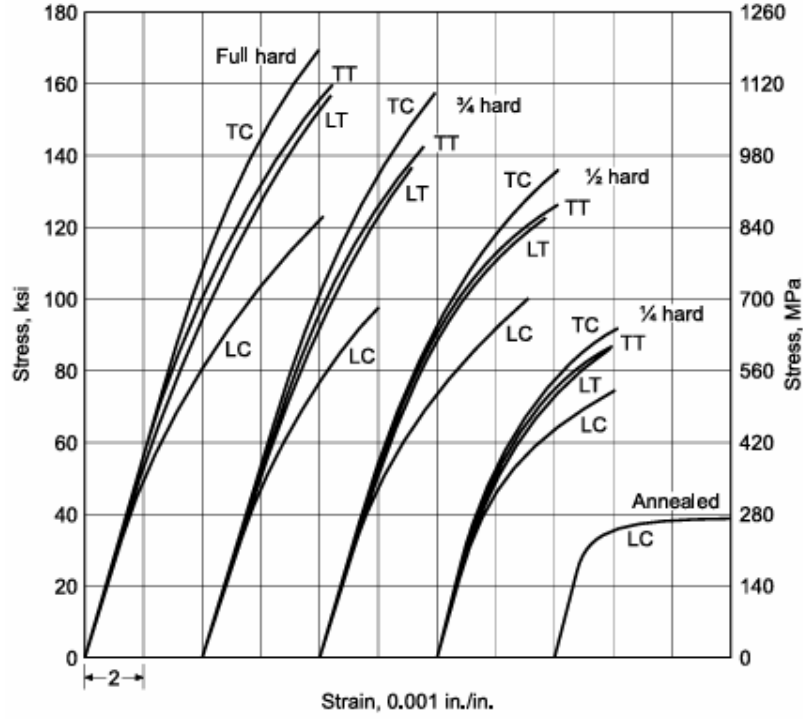
Specification	Form
AMS 5517	Sheet and strip
AMS 5518	Sheet and strip
AMS 5519	Sheet and strip
AMS 5901	Plate, Sheet, and strip
AMS 5902	Sheet and strip

Farklı formlardaki AISI-301’in elastisite modülü değerleri Tablo 2.3’de gösterilmiştir.

Tablo 2.3. AISI-301 çeliğin elastisite modülü değerleri [5]

Alloy		Type 301				
Condition		Ann	i/4 Hard	½ Hard	¾ Hard	Full Hard
E, 10 ³ ksi	- L	29.00	27.00	26.00	26.00	26.00
	- T	29.00	28.00	28.00	28.00	28.00
E _c , 10 ³ ksi	- L	28.00	26.00	26.00	26.00	26.00
	- T	28.00	27.00	27.00	27.00	27.00
G, 10 ³ ksi (b)		12.5	12.00	11.5	11.00	11.00

Farklı sertliklerdeki AISI-301 çeliğinin gerilim gerinim eğrileri Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

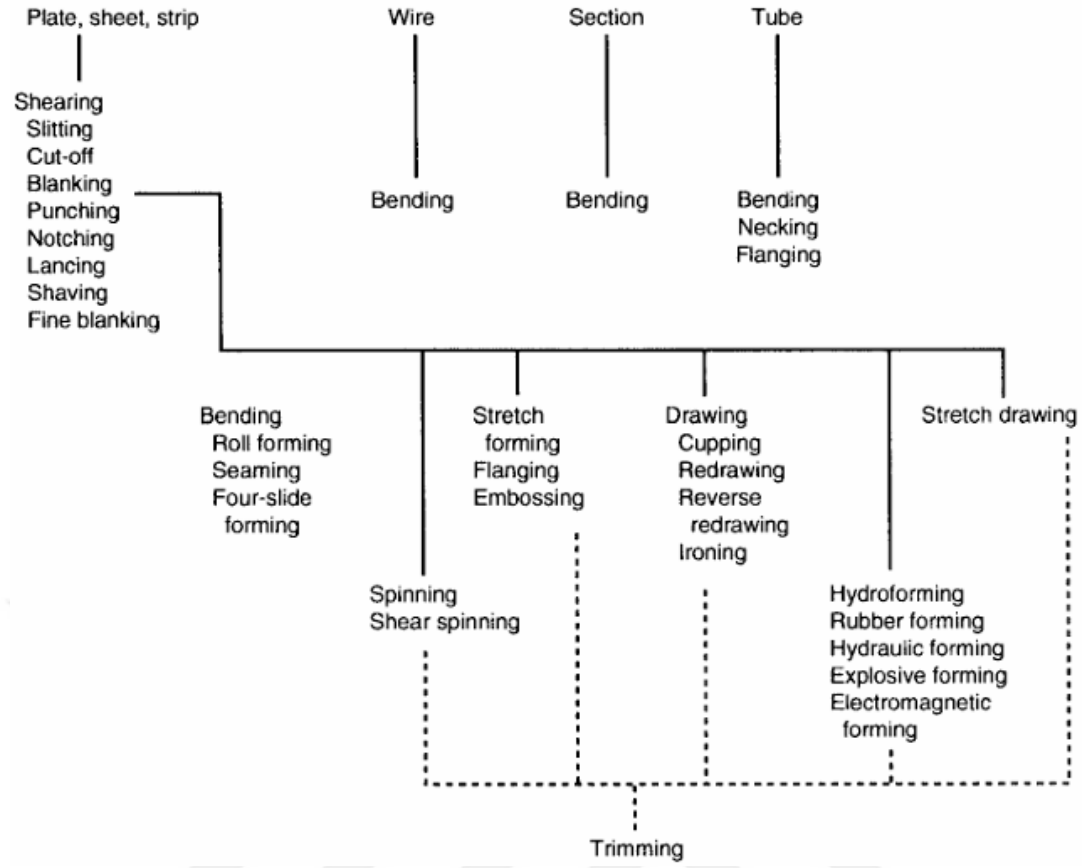


Şekil 2.1. AISI-301 çeliğin gerilim gerinim eğrileri [8]

2.2. Sac Metal Şekillendirme

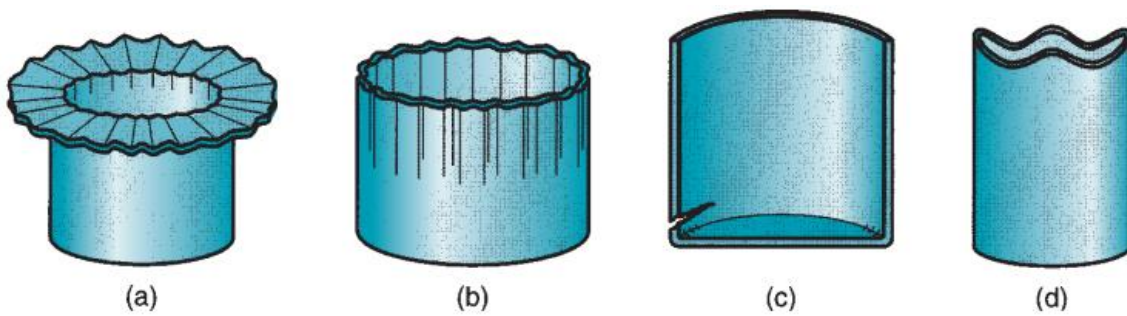
Sac metal şekillendirme süreçleri genellikle çok az veya hiç hurda üretmez, ayrıca genellikle presin bir veya birkaç strokunda nihai parça geometrisini hızlı bir şekilde üretir. Sonuç olarak, sac metal şekillendirme, özellikle orta ve büyük üretim miktarlarında, takım maliyetlerinin kolaylıkla amorti edilebildiği durumlarda, enerji ve malzeme açısından tasarruf olanağı sunar [9].

Bu bileşenlerin imalatında kullanılan başlıca sac şekillendirme prosesleri, Şekil 2.2’de özetlenmiştir.



Şekil 2.2. Sac şekillendirme süreçlerinin sınıflandırılması [10]

Ancak sac şekillendirme işleminde karşılaşılan bazı sorunlar da bulunmakta. Bu sorunlar genellikle sac malzemenin şekillendirilebilirlik kabiliyeti sınırlarının aşılmasından ya da göz ardı edilmesinden kaynaklanır. Yaygın olarak karşılaşılan bazı şekillendirme sorunları Şekil 2.3'te tanımlanmıştır.



Şekil 2.3. Sac şekillendirme sorunları: (a)(b) kırışma, (c) yırtılma, (d) kulaklanma [11]

Kırışma:

Sac metalin şekillendirme sırasında basma gerilmeleri altında stabilitesini kaybederek yüzeyinde dalgalanmaların oluşmasıdır. Bu durum, özellikle derin çekme ve bükme işlemlerinde yaygın olarak görülür. Kırışmanın başlıca nedenleri arasında yetersiz baskı plakası kuvveti, uygun olmayan kalıp tasarımı ve malzeme kalınlığının yetersizliği sayılabilir. Kırışmayı önlemek için baskı plakası kuvvetinin optimize edilmesi, uygun kalıp tasarımı ve malzeme seçimi önem taşır [12].

Yırtılma:

Sac metalin şekillendirme sırasında aşırı gerilme altında kopmasıdır. Bu problem, genellikle malzemenin şekillendirme sınırlarının aşılması durumunda ortaya çıkar. Yırtılmanın önlenmesi için malzemenin şekillendirilebilirlik sınırlarının iyi bilinmesi ve işlem parametrelerinin buna göre ayarlanması gerekmektedir. Şekillendirme Sınır Diyagramı (SSD), malzemenin hangi gerinim koşullarında yırtılacağını öngörmek için kullanılan bir araçtır [12].

Kalınlık Değişimleri ve İncelme:

Şekillendirme sırasında sac metalin bazı bölgelerinde kalınlık azalması meydana gelebilir. Bu incelme, parçanın mukavemetini düşürebilir ve yırtılma riskini artırabilir. Kalınlık değişimlerinin kontrolü için şekillendirme parametrelerinin dikkatlice ayarlanması ve uygun üretime metodu gereklidir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan simülasyonlar, incelme bölgelerinin önceden tespit edilmesine yardımcı olur.

Kulaklanma:

Özellikle derin çekme sırasında ortaya çıkan, çekilmiş sac malzemenin kenarlarında oluşan dalgalanma veya düzensiz yükseklik farkları anlamına gelir. Bu, sacın çekme yönünde eşit olmayan mekanik özelliklerinden kaynaklanır. Bu sorunu minimize etmek için malzemenin kristal yapısı ve haddeleme yönü dikkate alınarak işlem parametreleri ayarlanmalıdır [12].

Geri Yaylanma:

Sac metalin şekillendirme sonrası elastik özelliklerinden dolayı orijinal formuna kısmen dönmesidir.

2.3. Şekillendirme Sınır Diyagramı

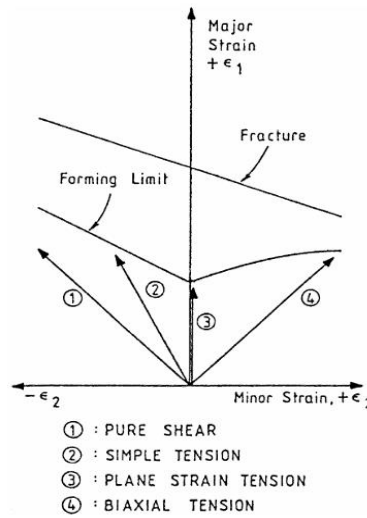
Sac metal şekillendirme prosesinde kullanılan malzemelerin şekillendirme sınırlarının bilinmesi, son ürün kalitesi açısından çok önemlidir. Malzemenin ne kadar uzayabileceği, nerede yırtılmaya ya da boyun vermeye başlayacağı, üreticinin tasarım parametrelerini belirlemesine yardımcı olur.

Bu noktada “Şekillendirme Sınır Diyagramı (Forming Limit Diagram, FLD)” kavramı devreye girer. ŞSD, bir sac metal malzemenin, belirli kalınlık ve malzeme özellikleriyle, hangi gerinim koşullarına kadar güvenli bir şekilde form alabileceğini gösterir. Bu diyagramda, farklı gerinimlerin (örneğin tek eksenli çekme, çift eksenli çekme) malzeme üzerindeki etkileri analiz edilir. Böylece tasarımcı, ilgili malzemenin kritik gerinim bölgelerini ŞSD üzerinden kolayca görebilir [13].

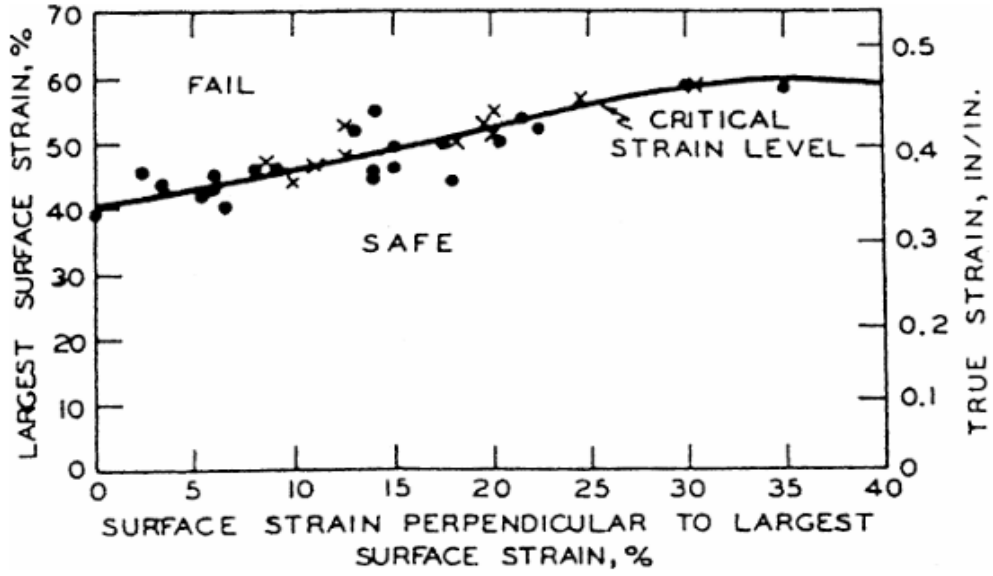
ŞSD, temelde iki eksenli gerinim durumunu esas alarak, sac malzemelerin yırtılma veya kritik boyun verme limitlerini grafiksel olarak sunar. ŞSD, tipik olarak şu şekilde oluşturulur:

Minor strain: Malzemeye uygulanan daha düşük orandaki gerinim değeri.

Major strain: Malzemeye uygulanan daha yüksek orandaki gerinim değeri.

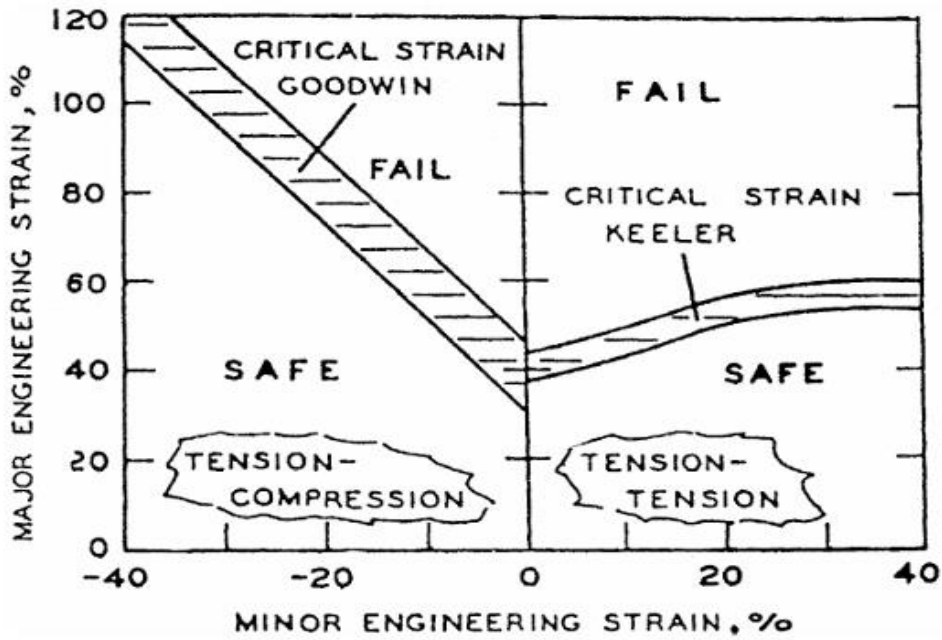


Şekil 2.4. ŞSD’ye göre kopma ve boyun verme [13]



Şekil 2.5. Keeler'a göre şekillendirme Sınır Diyagramı [13]

Diyagram üzerinde Forming Limit Curve (FLC) eğrisi bulunur. Bu eğri, malzemenin “kritik gerinim” değerlerini ifade eder. Eğrinin üstündeki alan malzemenin şekillendirme esnasında yırtılmaya veya boyun vermeye uğradığını, yani güvenli olmayan bölgeyi gösterir. Eğrinin altında kalan bölge ise, malzemenin güvenli bir şekilde şekillendirilebileceği alanı gösterir.



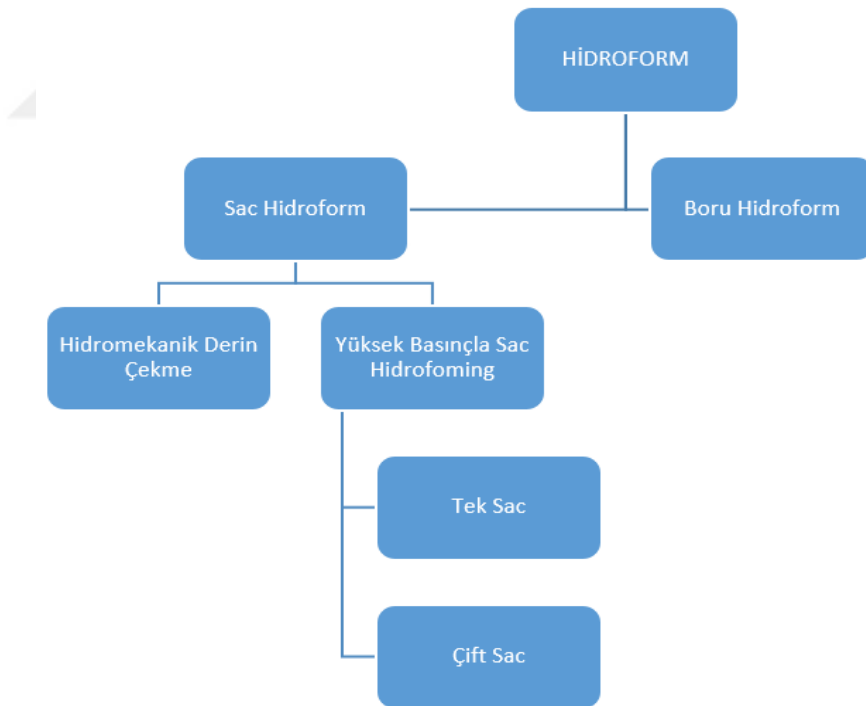
Şekil 2.6. Keeler ve Goodwin'e göre şekillendirme Sınır Diyagramı [13]

ŞSD'yi deneysel olarak belirleyen çeşitli testler bulunmaktadır [13][14]. Bu testler arasında tek eksenli çekme testi, hidrolik şişirme testi, zımba ile germe testi, Keeler testi, Hecker testi, Marciniak testi, Nakazima testi ve Hasek testi yer almaktadır. Bu testlerden, sürtünme etkilerini ortadan kaldırmak için Marciniak testi veya hidrolik şişirme testi tercih edilebilir.

2.4. Hidrolik Şekillendirme

Hidrolik şekillendirme, metal sac veya boru malzemelerinin, esnek bir membran (diyafram) ve çoğunlukla su veya yağ olan yüksek basınçlı akışkan kullanılarak istenen geometriye dönüştürülmesini sağlayan bir imalat yöntemidir.

Hidroforming prosesi genel olarak sac hidroforming ve tube hidroforming olarak iki ana kategoriye ayrılır [15].



Şekil 2.7. Hidroformingin sınıflandırılması [16]



Şekil 2.8. Hidrolik şekillendirmeyle üretilmiş otomobil parçaları [16]



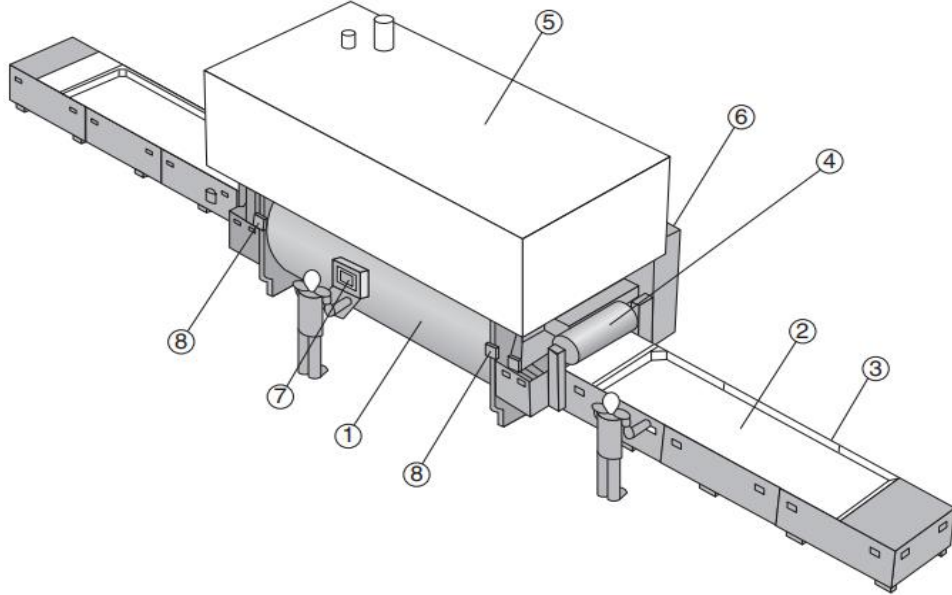
Şekil 2.9. Hidrolik şekillendirmeyle üretilmiş parçalar [17]

Havacılık endüstrisinde hidroformla şekillendirmenin bir çeşidi olan akışkan hücreli presleme, Boeing, Airbus, Cessna, Bombardier, TUSAŞ, Embraer gibi havacılık firmaları tarafından sac metal bileşenlerini hassas olarak şekillendirmek için yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu metot daha önce ortaya çıkmış olmasına rağmen, pres ve kalıp tasarımındaki gelişmeler, bu yüksek basınçlı şekillendirme yöntemini daha uygulanabilir ve ekonomik hale getirmiştir [16].

İsveç'teki ASEA firması 1950'lerin başlarında bu tür akışkan hücreli presinin geliştirilmesine öncülük etmiştir. Yeni tasarımda kauçuk yastığı daha ince ve daha esnek bir kauçuk diyafram ile değiştirilmiş, bu yöntemle güçlendirilmiş bir pres çerçevesi, daha düşük basınçlı preslere benzer bir maliyetle ancak daha yüksek şekillendirme basınçlarının elde edilmesini sağlamıştır [16].



Şekil 2.10. AESA Quintus hidrolik şekillendirme tezgâhı [18]

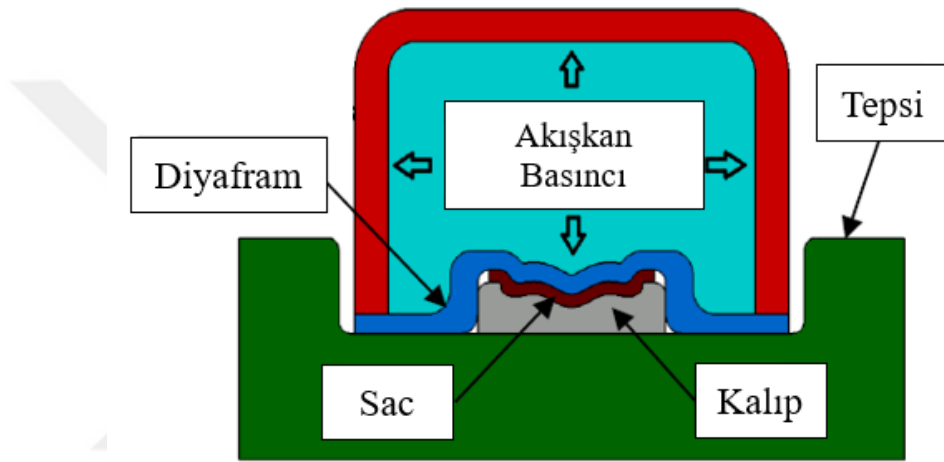


Şekil 2.11. Akışkan hücreli hidrolik şekillendirme bileşenleri [16]

1. Silindirik pres
2. Şekillendirme tepsisi
3. Tepsi istasyonu
4. Otomatik tepsi pad düzenleyici
5. Hidrolik sistem
6. Motor kontrol ünitesi
7. Operatör kontrol paneli
8. Operatör başlatma/durdurma butonu

Hidroforming proseslerinde kullanılan form bloklar genellikle geleneksel bir kalıptaki zımbaya benzese de dişi kalıp şeklinde de olabilir. Kauçuk, hidrolik sıvıya benzer bir etki yaratarak, şekillendirme bloğunun etrafında preslenirken iř parçasının tüm yüzeylerine neredeyse eşit basınç uygular.

Parçanın üretilmesi için 10 ila 50 saniyelik bir çevrime tabi tutulur ve şekillendirme basıncı 160 MPa'a kadar çıkabilir.



Şekil 2.12. Diyafraamla hidroform şekillendirme [19]

Bu proses řu şekilde açıklanabilir:

Şekillendirilecek metal iř parçası, hazırlanmış kalıbın yüzeyine yerleştirilir. Bu kalıp, nihai ürünün geometrisini belirler.



Şekil 2.13. Hidroforming için hazırlanan iş parçası

Kalıbın karşı yüzünde esnek kauçuk benzeri esnek bir diyafram bulunur. Bu diyafram arkası yüksek basınçlı bir akışkan beslenir. Bu akışkan genellikle su, yağ veya özel bir hidrolik sıvıdır.

İşleme başlandığında, membranin arkasındaki akışkan basıncı artırılır. Membran, esnek yapısı nedeniyle basıncı metal sacın üzerine eşit ve kontrollü şekilde iletir. Bu sayede metal sac, kalıbın yüzeyine doğru itilir ve kalıp geometrisini alır.



Şekil 2.14. Hidroforming işlemi sonrası görüntüsü

Avantajları:

- Genellikle tek taraf için kalıp gerekir, karşı tarafı membran desteklediğinden, daha az maliyetli ve kısa sürede kalıp değişiklikleri yapılabilir.
- Kalıplar düşük maliyetli ve kolay işlenebilen malzemelerden yapılabilir.
- Farklı metaller ve kalınlıkta malzemeler aynı takımda şekillendirilebilir.
- Membran aracılığıyla iletilen basınç metal sac üzerinde eşit dağıldığından, daha düzgün kalınlık dağılımı elde edilir. Bu, malzemenin lokal yırtılma veya kıvrılma riskini azaltır.
- Takım izleri oluşmadığından, mükemmel yüzey kalitesine sahip parçalar üretilebilir.
- Geleneksel yöntemlerle zor olan karmaşık geometriler bu yöntemle daha kolay elde edilebilir.

Dezavantajları:

- Kauçuk ped veya diyaframın ömrü sınırlıdır ve bu ömür şekillendirmenin zorluk derecesine ve uygulanan basınç seviyesine bağlıdır.
- Yeterli şekillendirme basıncının olmaması, keskinliği düşük veya kırışıklık parçalarla sonuçlanır ve bu parçalar bazen sonradan elle düzeltme gerektirebilir.
- Üretim hızı nispeten yavaştır, bu da süreci daha çok prototip ve düşük hacimli üretimler için uygun kılar.

Özetle, membranla hidrolik şekillendirme, esnek bir diyafram ve yüksek basınçlı akışkan kullanarak metal malzemeyi kalıp yüzeyinde şekillendirme prensibine dayanır. Bu yaklaşım, maliyet, kalite, hassasiyet ve tasarım esnekliği açısından birçok avantaj sunar.

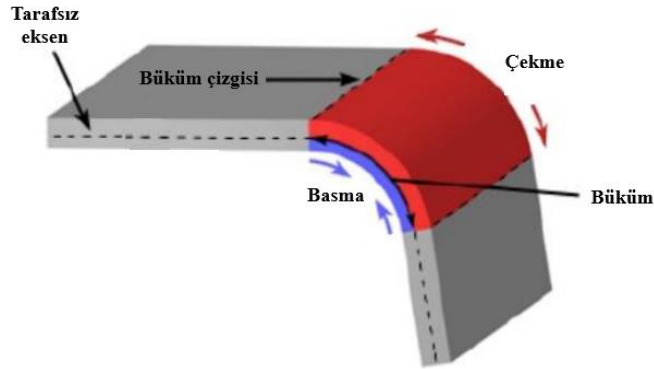
Hidroforming metodunda yaygın olarak kullanılan metalik malzeme çeşitleri Tablo 2.4'te gösterilmiştir.

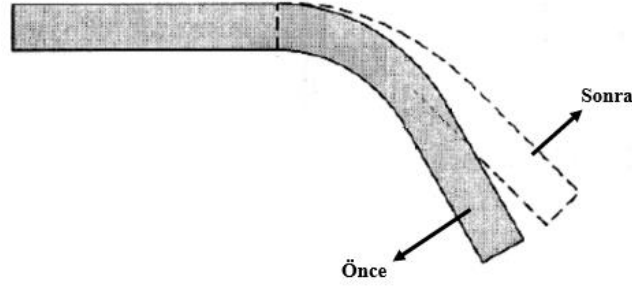
Tablo 2.4. Hidrofomingle sıklıkla şekillendirilen metaller [10]

Metal	Maximum thickness(a)	
	Mm	In.
Mild forming		
Aluminum alloys		
2024-O, 7075-W	4.7	0,187
2024-T4	1,6	0.064
Austenitic stainless steels		
Annealed	1.3	0.050(b)
Quarter hard	0.8	0.032(c)
Titanium alloys	1.0	0.040(d)
Stretch flanging		
Aluminum alloy 2024-T4	1.6	0.064
Austenitic stainless steels		
Annealed	1.3	0.050
Quarter hard	0.8	0.030

2.5. Saclarda Geri Esneme Sorunu

Metal levhanın kalıpla büküldükten ya da şekillendirildikten sonra, üzerinde uygulanan deformasyon kuvveti kaldırıldığında malzemenin elastik özelliklerinden dolayı kısmen orijinal şekline dönmesiyle meydana gelir. Bunun sonucu olarak, parçanın nihai şekli, kalıp tarafından oluşturulan şekilden sapar. Bu olguya geri esneme (springback) adı verilir.

**Şekil 2.15.** Bükme işlemi



Şekil 2.16. Bükme işlemi sonrası geri yaylanma

Geri esneme, sac metal kalıplama alanındaki en önemli kalite sorunlarından biridir. Bir parçanın nihai şekli, geri esneme sonucunda oluşan şekil sapmasıyla belirlenir. Eğer geri esnemenin yol açtığı sapma, belirlenen tolerans değerini aşarsa, sonraki montaj işlemlerinde ciddi sorunlar meydana gelebilir.

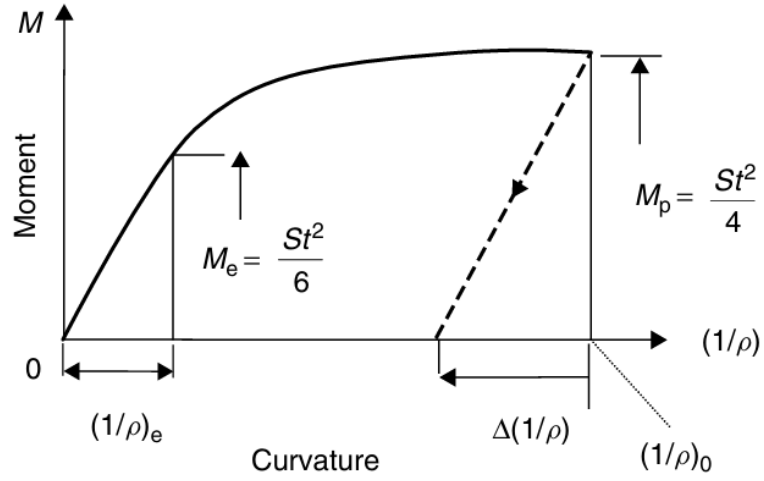
Elastik modül ve akma dayanımı, geri esnemeyi etkileyen birincil malzeme parametreleridir. Bu, bir gerilme-gerinim eğrisi göz önüne alındığında sezgisel olarak anlamak mümkündür. Young modülü arttığında ve akma dayanımı azaldığında, geri kazanılabilir enerji miktarı azalır. Alüminyum alaşımları, benzer akma dayanımlarına sahip olmalarına rağmen yumuşak çeliklerden daha düşük elastik modüllere sahiptir ve bu nedenle daha fazla geri esneme oluşturma eğilimindedirler [10].

Son yıllarda, sahip oldukları düşük ağırlık-mukavemet oranları nedeniyle otomobil bileşenlerinde yüksek mukavemetli çelik ve alüminyumun kullanılma eğilimi yaygınlaşmıştır. Bunun sonucu olarak, geri esneme sapmaları, daha yüksek akma dayanımı-modül oranına sahip bu malzemeler nedeniyle daha şiddetli hale gelmiştir [16].

Tam plastik momente kadar bükülmüş bir sac için, boşaltma eğrisi, Şekil 2.17’de gösterildiği gibi elastik yükleme çizgisine paralel olacaktır. Benzer üçgenlere dikkat edildiğinde, momentte $-M_p$ ’lik bir değişim için şu sonucu görebiliriz [20]:

$$\frac{\Delta(1/\rho)}{(1/\rho)_e} = \frac{\Delta M}{M_e} = \frac{-M_p}{M_e} \quad (2.1)$$

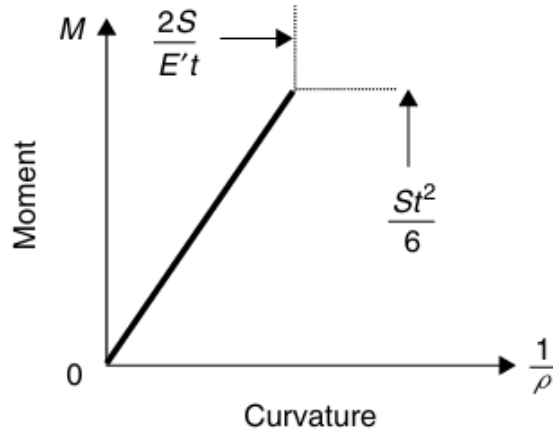
Burada M_p plastik momenti, M_e elastik momenti, $1/\rho$ ise eğriliği ifade etmektedir.



Şekil 2.17. Moment-eğrilik diyagramı

Tam plastik momentin sınır elastik momente oranı şu şekilde olduğu gösterilmiştir:

$$\frac{M_p}{M_e} = \frac{3}{2} \quad (2.2)$$



Şekil 2.18. Elastik bükmede moment eğrilik diyagramı

Burada momentteki eğim

$$\left(\frac{1}{\rho}\right)_e = \frac{2S}{E't} \quad (2.3)$$

Bu eşitlikte S akma gerilmesini, E' elastik modülüsü, t kalınlığı ifade eder.

Yukarıdaki denklem 2.2 ile birleştirilerek:

$$\Delta\left(\frac{1}{\rho}\right) = -\frac{3}{2}\Delta\left(\frac{1}{\rho}\right)_e = -\frac{S}{E't} \quad (2.4)$$

Eğer saçtaki yük kaldırılırsa eğrilikteki oransal değişim şu şekilde olur:

$$\frac{\Delta(1/\rho)}{(1/\rho)_0} = -3 \frac{S}{E'} \frac{\rho_0}{t} \theta \quad (2.5)$$

Eğer bir sac, bir moment ile belirli bir eğrilığe bükülür ve ardından moment serbest bırakılırsa, eğrilik ve bükme açısında bir değişiklik meydana gelir. Orta yüzeyin uzunluğu şu şekilde ifade edilir:

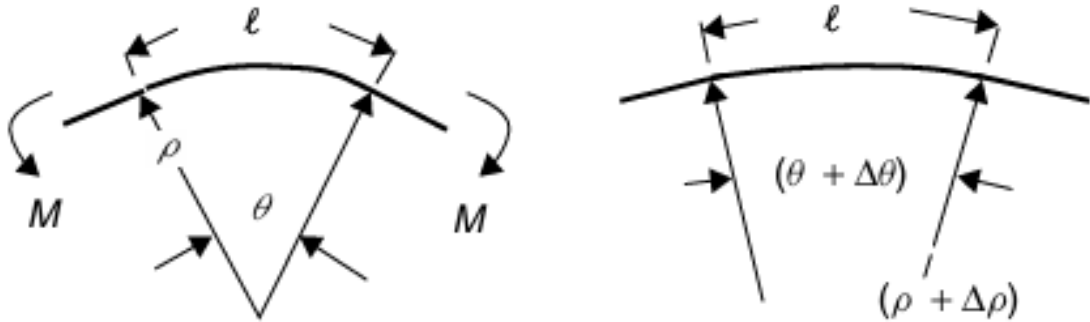
$$l = \rho\theta \quad (2.6)$$

Boşaltma sırasında orta yüzeydeki gerilme ve gerilim sıfır olduğu için bu uzunluk değişmeden kalır. Buradan şu sonucu elde ederiz:

$$\theta = l \frac{1}{\rho} \quad (2.7)$$

Denklemleri türev alarak, burada l sabit olmak üzere şu sonucu elde ederiz:

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{\Delta(1/\rho)}{1/\rho} \quad (2.8)$$



Şekil 2.19. Gerilme uygulanmaksızın bükülmüş bir saça yükün kaldırılması

Eşitlik 2.8’den büküm açısındaki değişim şu şekilde bulunur;

$$\Delta\theta \approx -3 \frac{S}{E'} \frac{\rho_0}{t} \theta \quad (2.9)$$

Bu denklem yalnızca yaklaşık bir ifadedir ve küçük açı veya eğrilik farkları ile sacın neredeyse tamamen plastik bir duruma büküldüğü durumlar için geçerlidir.

Bununla birlikte, denklem oldukça kullanışlıdır ve geri esnemenin şu faktörlere orantılı olduğunu gösterir:

- Akma gerilmesinin elastik modüle oranı S/E'
- Bükme oranı ρ_0/t
- Bükme açısı

2.6. Geçmişte Yapılan Çalışmalar

Aydoğan ve arkadaşları sonlu elemanlar metoduyla titanyum sac malzemesinin hidrolik şekillendirmesindeki geri yaylanma tahminini incelemişlerdir. Farklı radyus ve büküm açılarında özel olarak tasarlanmış ve hazırlanmış kalıp ile deneyler gerçekleştirmiş ve geri yaylanma sonuçları daha sonra sonlu eleman analizi ile karşılaştırmıştır. Bu çalışmaya göre geri esneme olgusu uygun kalıp modifikasyonları ile en aza indirilebilir ancak ortadan kaldırılamayacağı tespit edilmiş [19].

Sayın ve Basmacı bakır sac levhaların “V” bükme yöntemi ile şekillendirilmesiyle oluşan geri esneme miktarının deneysel olarak incelemiştir. Kalıp açısı arttıkça geri esnemenin azaldığı görülmüştür. Sac levha kalınlığının artmasıyla geri esneme miktarının azaldığı ve bükme radyusu arttıkça geri esnemenin arttığı gözlemlenmiştir [21].

Kılıç ve arkadaşları DP800 çeliğinin mekanik özelliklerinin ve geri esneme davranışının incelemiş ve malzemenin geri esneme davranışının, artan deformasyon hızına bağlı olarak çok az miktarda azaldığı ve sac genişliğinin geri esneme üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir [22].

Aydoğan titanyum için farklı büküm yarıçapları ve büküm açılarında titanyumun hidrolik şekillendirilmesinde geri yaylanma davranışını incelemiştir. Büküm yarıçapının ve açısının artmasıyla geri esnemenin arttığı görülmüştür [23].

Beyazgöl Inconel 625 (AMS 5599) alaşımının diyaframla hidrolik şekillendirilmesinde geri esneme miktarlarının sayısal ve deneysel incelemiş t/R azaldıkça geri esnemenin arttığını belirtmiştir [24].

Chowdhury yaptığı çalışmada, düşük karbonlu çelik, alüminyum ve paslanmaz çelik için bükme işlemlerinde geri yaylanma tahminini Box–Behnken deneysel tasarımı kullanılarak, kalıp boşluğu, zımba yarıçapı ile sac kalınlığı oranı, set açısı ve malzeme parametrelerini içeren deneysel modeller üretmiş. Zımba yarıçapı ile sac kalınlığı oranının en hassas etkiye sahip olduğunu ve kalıp boşluğunun daha az etkili olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, malzemelerin mekanik özelliklerinin geri yaylanma üzerindeki etkilerinin doğrusal olmadığı görülmüştür [25].

Mo ve arkadaşları ağır plakaların bükme ve işleme süreçlerindeki fazla malzeme işlenmesi, yüksek geri yaylanma ve çatlama gibi problemlere sorunları çözmek amacıyla, elastik yardımcı plakalı hidroformlama ile derin çekme yöntemi uygulamıştır. Sürtünmenin hidroforming üzerindeki rolü analiz edilmiştir. Sonuçlar, hidrolik basıncın artırılmasının arayüz sürtünmesini artırdığını, parçada kalınlık incelme oranını azalttığını ve ince bölgedeki kalınlık dağılımını ve deformasyon homojenliğini iyileştirdiğini göstermiştir [26].

Movahedi ve arkadaşları değişen basma gerilmeleri ve bükme eğriliklerine sahip bir AA061 alüminyum alaşımlı sac üzerinde çalışma gerçekleştirmiştir. Sonlu eleman modellemesi ile geri yaylanma açıları karşılaştırıldığında, normal basma gerilmesinin akma gerilmesinin %75'i ve %100'üne artırılması durumunda geri yaylanmanın sırasıyla %17,4 ve %32 oranında azaldığı görülmüştür. Akma gerilmesinin %75'inde, sayısal model ile analitik model arasındaki fark yalnızca %4,4 olarak belirlenmiştir. Sac yüzeyinde kalınlık boyunca basma normal gerilmeleri kontrolü ile geri yaylanma azaltılabileceğini ortaya koymuştur [27].

Sun ve arkadaşları hidroformlama sürecinde kalınlık yönündeki basıncın ve sürtünmenin geri yaylanma üzerindeki etkilerini ortaya koymuş, hidrolik basıncın yükseltilmesi ile parça kesitinde çekme gerilmesinin arttığı, sürtünmenin arttığı ve geri yaylanmanın azaldığını belirtmiştir [28].

Trzepieciński sac metal şekillendirme teknolojilerinde son on yılda önemli ilerlemeler kaydettiğini ve özellikle hafif, zor şekillendirilebilir malzemelerin otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde kullanımının arttığını belirtmiş, yeni üretim yöntemleri olan elektromanyetik, elektrohidrolik şekillendirme ve sayısal modelleme tekniklerinin (FEM, XFEM) şekillendirilebilirliği artırırken, geri yaylanma ve yüzey kusurlarını azaltmada önemli etkileri olduğunu belirtmiş. Ayrıca mikro şekillendirme, sıcak şekillendirme ve hibrit teknikler, malzeme özelliklerini ve üretim süreçlerini optimize etmiştir. Bu yenilikler, kompleks geometriler için daha etkin üretim yöntemleri geliştirilmesini sağlamıştır [29].

Cinar ve arkadaşları, A6061 alüminyum alaşımlı sacın bükme işlemlerinde geri yaylanma davranışını etkileyen parametreler ve analiz yöntemleri üzerine inceleme yapmıştır. V bükme ve derin çekme gibi yaygın yöntemlerde gözlemlenen geri yaylanma üzerinde önemli etkilere sahip olan parametrelerin bükme açısı, kalıp omuz yarıçapı, blank tutucu kuvveti, sac kalınlığı, zımba kalınlığı, elastiklik modülü, akma mukavemeti, poisson oranı, tavlama sıcaklığı ve uygulanan yük olduğu belirtilmiştir. Sac kalınlığı ve bükme açısı parametrelerinin geri yaylanma üzerinde belirgin etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Araştırmada, Taguchi yöntemi ve sonlu elemanlar analizi en sık kullanılan yöntemler olarak öne çıkarken, deney tasarımı ve simülasyon yöntemleri için daha fazla çalışma yapılması gerektiği vurgulanmıştır [30].

Joseph, 6022-T4 AA malzemesi üzerinde V-bükmedeki geri yaylanmasının deneysel ölçümü ve sonlu elemanlar analizini gerçekleştirmiş, deneylerde Taguchi deney tasarımı yöntemi uygulamıştır. Deney sonuçları, geri yaylanma üzerinde en büyük etkiye büküm radiusunun sahip olduğunu ve diğer parametreleri gölgede bıraktığını belirtmiştir. Çok küçük bükme yarıçaplarında negatif geri yaylanma gözlemlenmiştir. Diğer faktörlerin, bükme yarıçapıyla karşılaştırıldığında geri yaylanma üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi olduğu belirtilmiştir [31].

Pham ve arkadaşları çalışmasında, 7000 serisi alüminyum sac malzemenin geri yaylanma tahmininde Young modülü, Bauschinger etkisi ve malzeme anizotropisi gibi önemli malzeme davranışlarını dikkate alan çeşitli malzeme modelleri geliştirmiştir.

Sonlu eleman simülasyon sonuçlarında, akma yüzeyinde düzlem gerinim bölgesinin doğru bir şekilde yakalanmasının ve ters yükleme sırasında Bauschinger etkisinin

mükemmel şekilde modellenmesinin, bu tür malzemeler için geri yaylanma tahminindeki başarının iki önemli unsuru olduğu sonucuna varmıştır. Malzeme modellemesinde, Young modülünün azalması ve gerinim yolundaki değişiklikler, geri yaylanma tahmini için kritik öneme sahip olduğu belirtilmiştir [32].



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deneyde Kullanılan Malzeme ve Özellikleri

Deneyde kullanılan numuneler paslanmaz AISI-301 çelik ¼ sertlikte (AMS-5517) 0,635 mm, 1,016 mm ve 1,27 mm kalınlıkta sac haldeki plakalardan kestirilmiştir. Çekme testi için 4 adet numune, şekillendirme deneyleri için toplam 48 adet parça kestirilmiştir.

Numunelere ait datasheet verileri tedarikçi firmadan elde edilmiş olup Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Product ID	Supplier ID	Thickness	Width	Weight	-----Length-----	Mark	Pieces	COMMODITY CODE
03TOHO B	* 03TOHO	.0401	36.0000	16,705	COIL	3383.5	11	1 1/4 H TEMPER

Lab Accreditation Bureau, ISO/IEC 17025, Certificate# L2323

CHEMICAL ANALYSIS		CM(Country of Melt)	ES(Spain)	US(United States)	ZA(South Africa)	JP(Japan)	Chemical analysis per ASTM A751/08				
HEAT	Supplier#	CM	C %	CR %	CU %	MN %	MO %	N %	NI %	P %	S %
TOHO	TOHO	US	.0777	17.0800	.3350	.9245	.2715	.0391	7.0125	.0290	.0010
Lab Check:			.0754	17.1110	.3060	.9290	.2710	.0416	7.0600	.0270	.0036
		SI %									
			.3070								
Lab Check:			.2240								

MECHANICAL PROPERTIES

Product Id	Supplier Id	1 d o i c r	UTS KSI	20C KSI	.2% YS KSI	20C ELONG %-2"	Hard RC	Tail Hard
03TOHO B	03TOHO	F L	149.67	117.37	25.35			
03TOHO B	03TOHO	F T	149.86	120.10	25.49	34.50	31.50	

Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan malzemenin malzeme yapısı

3.2. Çekme Testi

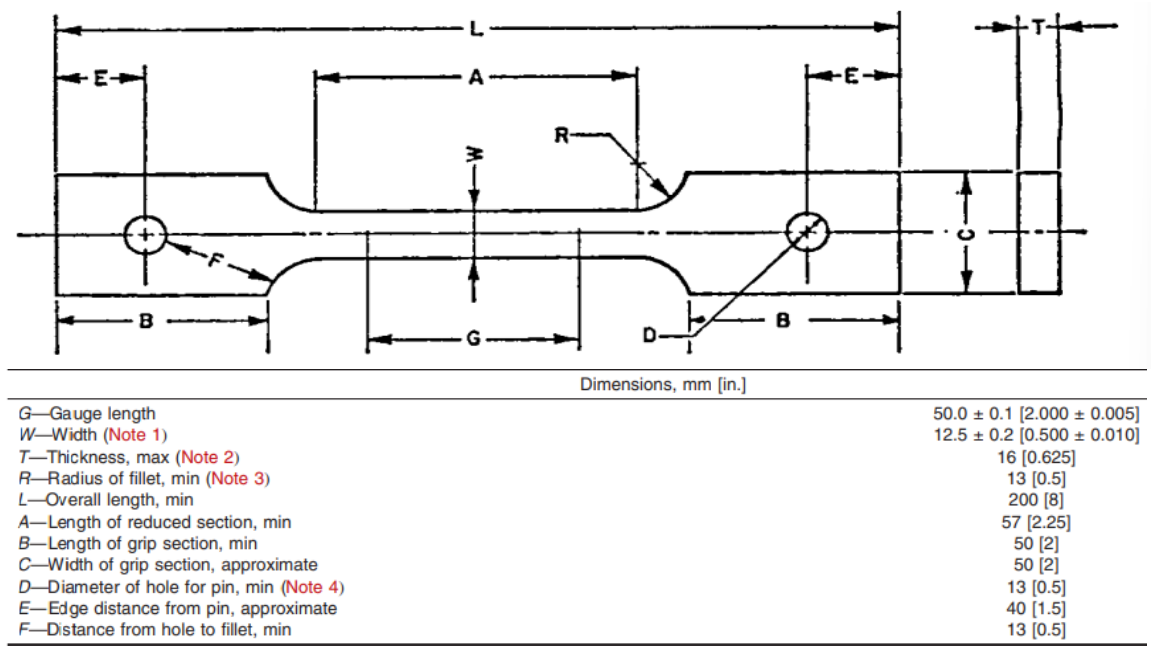
Malzemenin gerilme-gerinim özelliklerini belirlemek, malzemenin şekillenebilirliği, yükler altındaki davranışları hakkında bilgi sağlayacağı için mühendislikte önemli yer tutmaktadır.

Çekme testi, metalik malzemelerin oda sıcaklığında herhangi bir formdaki çekme testlerini kapsar ve özellikle akma mukavemetinin, akma noktasındaki uzamanın, çekme dayanımının, uzamanın ve kesit daralmasının belirlenmesini içerir [33].

Test edilecek numuneye statik yük altında belli standartlarla kopana dek çekme kuvveti uygulanır. Kuvvetin uygulanma süresince standart kesitteki uzama miktarı

uygulanan kuvvete karşılık şekilde kaydedilir. Uzama miktarındaki verilerle mühendislik deformasyonu belirlenir. Bu verilerle malzemenin young katsayısı, poisson oranı, akma mukavemeti ve pekleşme karakteristikleri elde edilebilir.

Deneylerde kullanılacak malzemenin plastik bölgedeki davranışının tespiti için ASTM E8'in belirttiği ölçülerde test numunesi kestirilip ASTM E8'e göre çekme testi yapılmıştır [33].



Şekil 3.2 ASTM E8'e göre numune ölçüleri [33]



Şekil 3.3. ASTM E8 standardına göre kestirilen AISI-301 çelik numuneler

AISI-301 elik sac malzemeden ASTM E-8 standardına göre kestirilen numuneler INSTRON marka test cihazında çekme testine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.4.Instron ekme cihazı

3.3. Deney Kalıbı Tasarımı

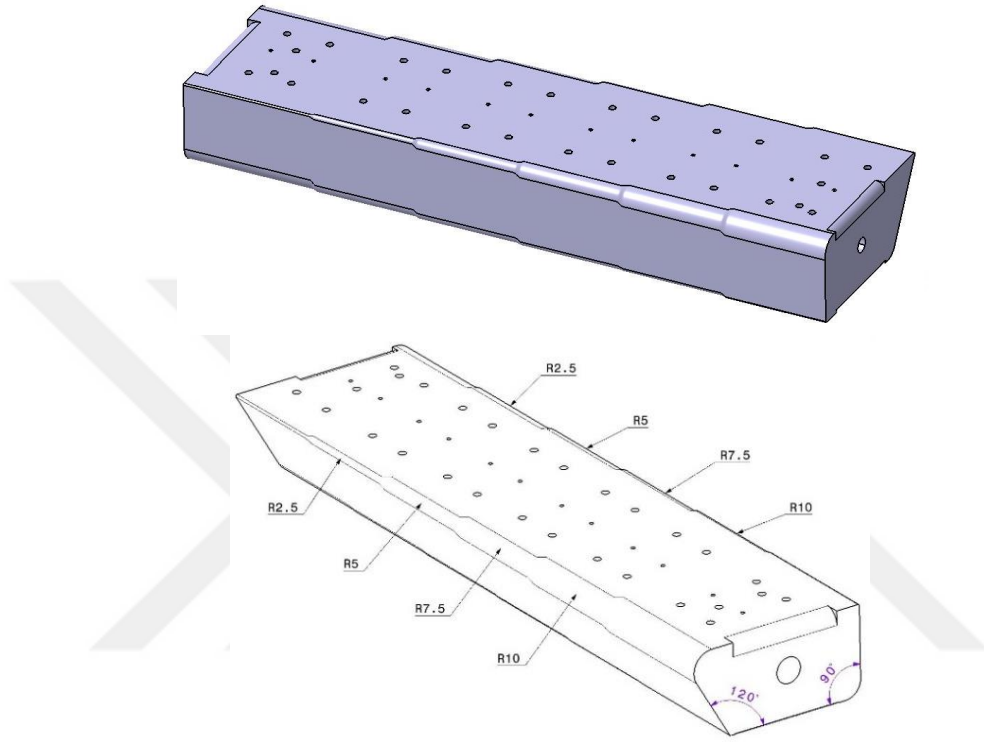
Metal şekillendirme kalıpları, istenilen geometrik toleranslara ve yüzey kalitesine sahip parçaların üretiminde kritik bir role sahiptir. Kalıp tasarımı ve üretiminde dikkat edilmesi gereken hususlar hem üretim sürecinin verimliliğini hem de nihai ürünün kalitesini doğrudan etkiler.

Kalıp malzemesi, şekillendirme işlemi sırasında maruz kalacağı kuvvetlere ve aşınma koşullarına dayanıklı, üretilecek parçaya yakın veya daha mukavim olmalıdır. Kalıp malzemesinin ısı iletkenliği ve sertleşebilirliği de göz önünde bulundurulmalıdır.

Kalıbın tasarımı, şekillendirilecek parçanın karmaşıklığına uygun olmalıdır. Keskin kenarlar yerine radyuslu geçişler tercih edilerek malzeme akışkanlığı artırılmalı ve çatlak

oluşumu engellenmelidir. Geri yaylanma gibi deformasyon sorunlarını minimize edecek şekilde kalıp geometrisi optimize edilmelidir.

Test kalıbı AISI 4140 malzemeden imal edilmiştir. Kalıp üzerindeki 2,5 mm, 5 mm, 7,5 mm ve 10 mm büküm radyusu ile 90° ve 120° büküm açıları deney için kullanılmıştır.

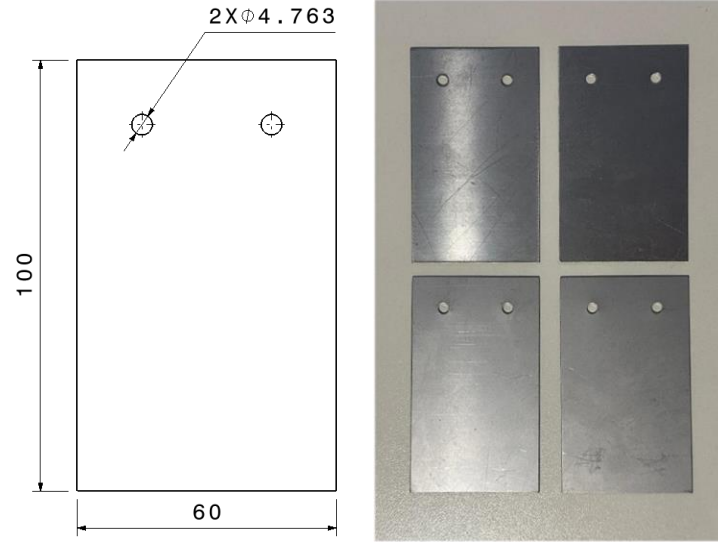


Şekil 3.5. Test kalıbı

3.4. Test Numunesi

Test numuneleri 0,635mm, 1,016 mm ve 1,27 mm kalınlıkta olmak üzere AISI-301 çelik sac malzemeden kestirilmiştir.

Her bir numune kalıba 2 adet pinle sabitlenecek şekilde hazırlanmıştır.



Şekil 3.6. Test numunesi

3.5. Deney

Büküm için hazırlanan numuneler kalıp üzerine planlanan büküm radyuslarına ve açılara konumlanacak şekilde pinlerle sabitlenmiştir.

Kalıp üzerinde aynı anda birçok parçayı konumlandırabilmemiz sebebiyle ve yeterince numune kestirildiği için deneyler full scale yapılmıştır.



Şekil 3.7. Kalıp üzerine yerleştirilmiş numuneler

Numuneler ABB (Asea Brown Boveri) firması üretimi Quintus Press QFC 1.2 × 3-1400 modeli tezgahında şekillendirilmiştir. Bu tezgâhta 1,2 × 3 metre boyutlarında şekillendirme alanına sahip tabla bulunmaktadır. Diayframı basınçlandırma için yağ kullanmaktadır.

Tezgâh kademeli olarak maksimum 140 Mpa basınca ulaşabilmektedir.

Deney kapsamında numuneler maksimum 650 bar ile şekillendirilmiştir.



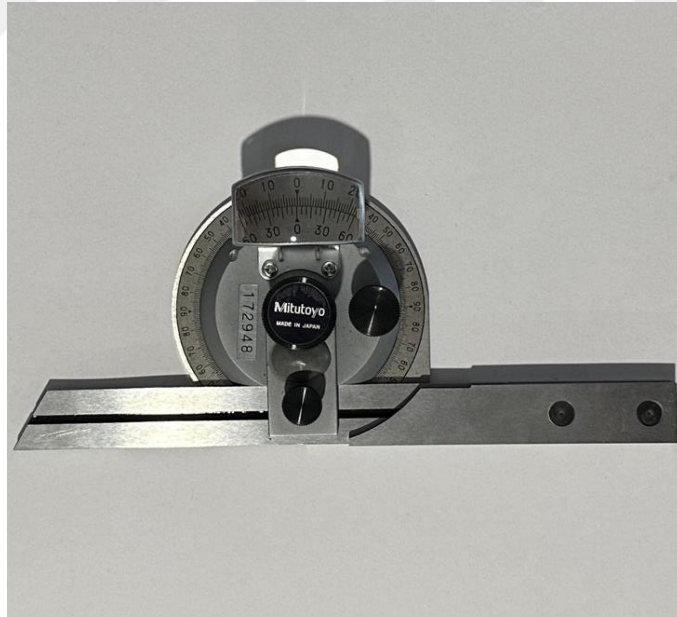
Şekil 3.8. Tezgâh üzerine yerleştirilmiş kalıp ve numuneler



Şekil 3.9. Tezgâhın kontrol ekranı

3.6. Ölçüm

Form işlemi sonrası parçaların açıları Mitutoyo 187-907 marka açı ölçerle ölçülüp kaydedilmiştir.

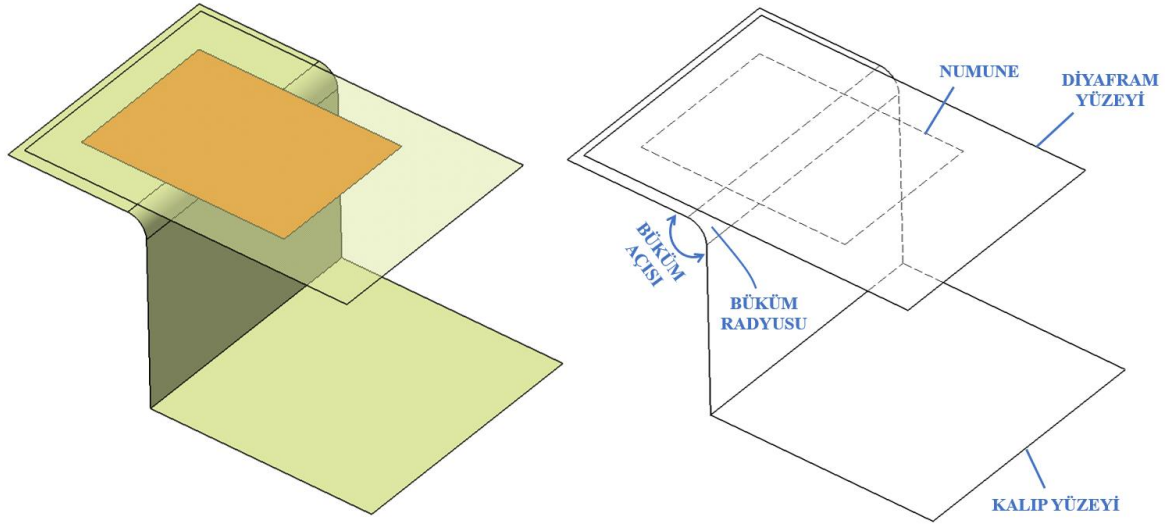


Şekil 3.10. Mitutoyo açı ölçüm aleti

4. SAYISAL YÖNTEM

Analiz modellemesi için gerekli olan kalıp, numune ve diyafram yüzeyleri Catia V5 programında hazırlanıp IGES formatına dönüştürülmüştür.

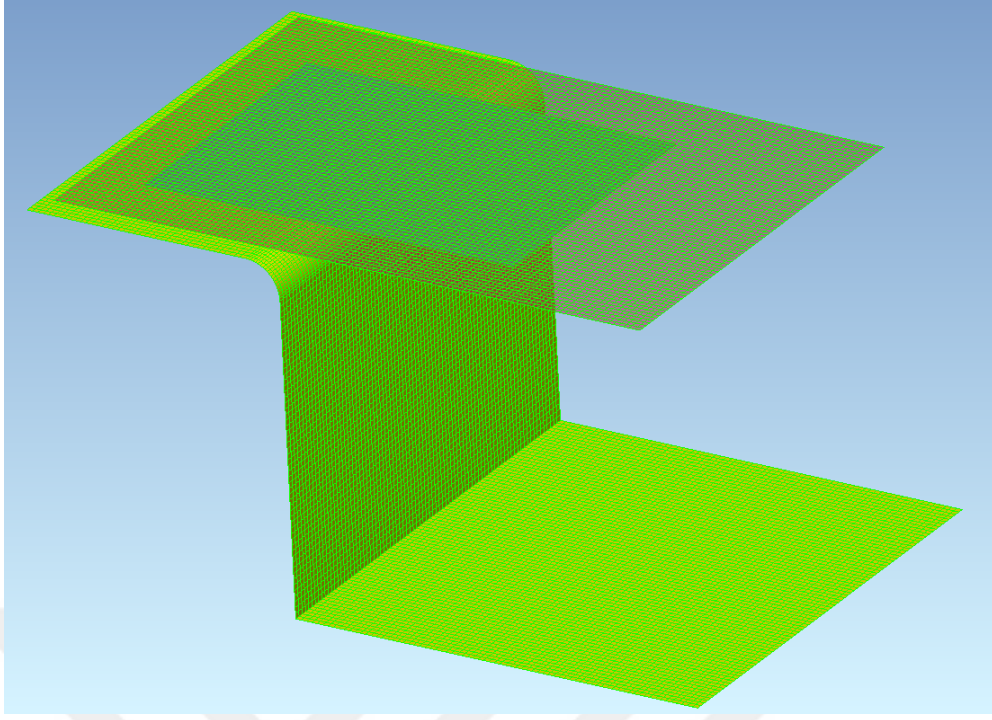
Analiz süresini kısaltmak için, farklı parametrelerdeki numune ve kalıp yüzeyleri için bütün bir analiz yapmak yerine, tek numuneyi kapsayacak şekilde modelleme yapılmıştır.



Şekil 4.1. Analiz için tasarlanan yüzeyler

Hazırlanan yüzeyler PAM-STAMP programında çağırılmışlardır. PAM-STAMP yüzeylerin çağırılması ile birlikte parça boyutlarına ve geometrisine göre uygun ağ yapısını oluşturmaktadır. Ancak mesh size sıklığını artırarak daha güvenilir analiz elde etmek için meshing size factor 0.5 seçilmiştir.

Numune, kalıp ve diyafram yüzeyi meshing sonrası 1.6×1.6 mm büyüklükte ağ yapısına sahip olmuştur.



Şekil 4.2. Mesh ağı görüntüsü

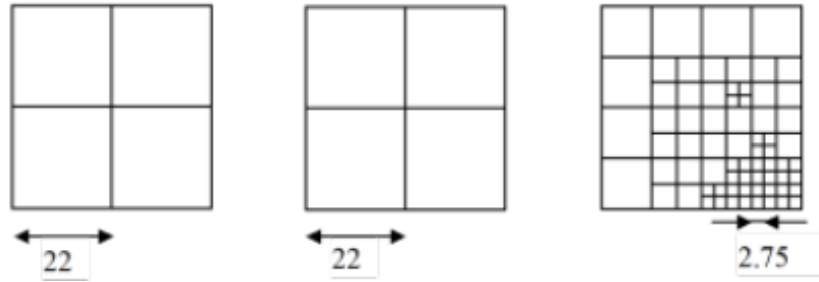
Adaptif meshing kullanımı, CPU süresini önemli ölçüde azaltmak ve bellek alanı gereksinimlerini düşürmek için tavsiye edilmektedir. Her adaptif refinement seviyesi eleman boyutunu yarıya indirdiğinden, elemanların başlangıç boyutunu bulmak için, adaptif ağ kullanmayan bir hesaplamada kullanılan eleman boyutunu, iyileştirme seviyelerinin sayısı kadar ikiyle çarpmak gerekir.

Genel bir kural olarak, başlangıç mesh boyutu yaklaşık olarak kayma radyusunun iki katı olmalıdır ve refinement seviyesi, standart kalite için üç, yüksek kalite için dört seviyede olmalıdır.

Sacın bir radyus üzerinde kaymasını doğru bir şekilde temsil etmek için, sac elemanlarının boyutu, o radyus değerinden daha küçük olmalıdır. Bu nedenle, eğer adaptif ağ kullanmıyorsanız, kalıp radyusundan geçen sac elemanlarının boyutu kalıp radyusundan küçük olmalıdır. Çoğunlukla eleman boyutu, giriş radyusunun yarısına karşılık gelen bir değer olarak kullanılır.

Eğer geri yaylanma hesabı yapılması gerekiyorsa, sac elemanlarının boyutu, sacın nötr lifinde kayma radyüsünden geçtiği sırada benimseyeceği eğrilik yarıçapının %25'inden daha

küçük olmalıdır. Bu, radyus eğrilik yarıçapı ile sac kalınlığının yarısının toplamının %25'ini ifade eder [34].

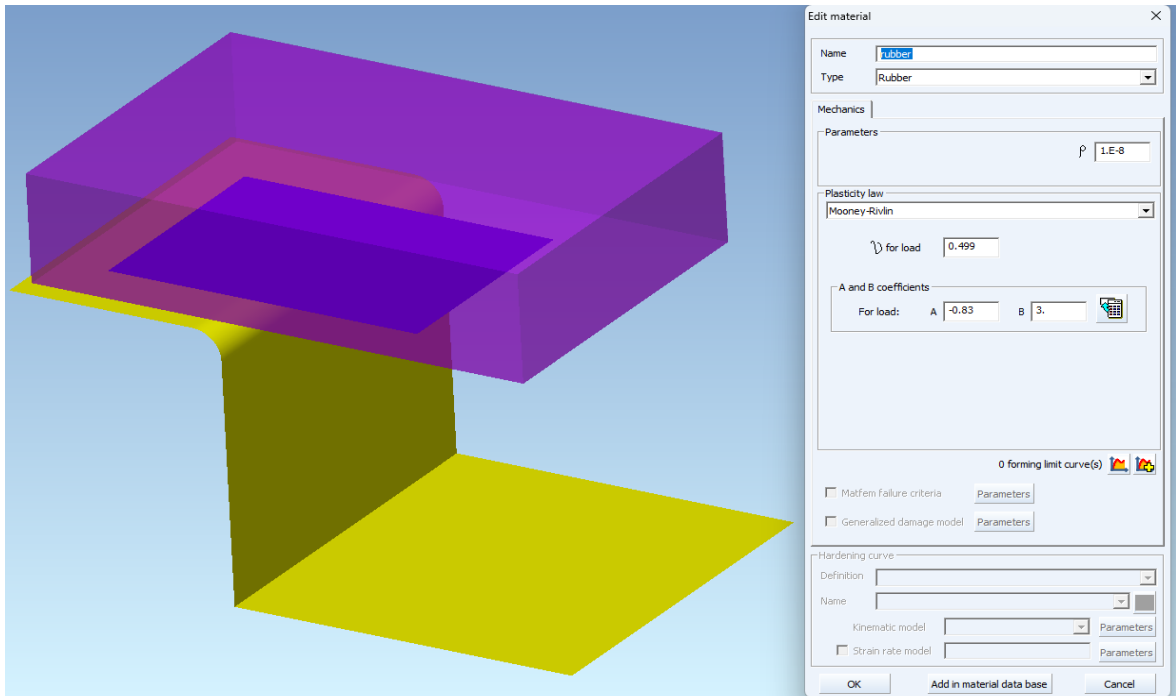


Şekil 4.3. Adaptif meshing [34]

Bu bilgiler doğrultusunda analizi hızlı ve güvenli yapmak için numuneye 4 birim refinement verilmiştir.

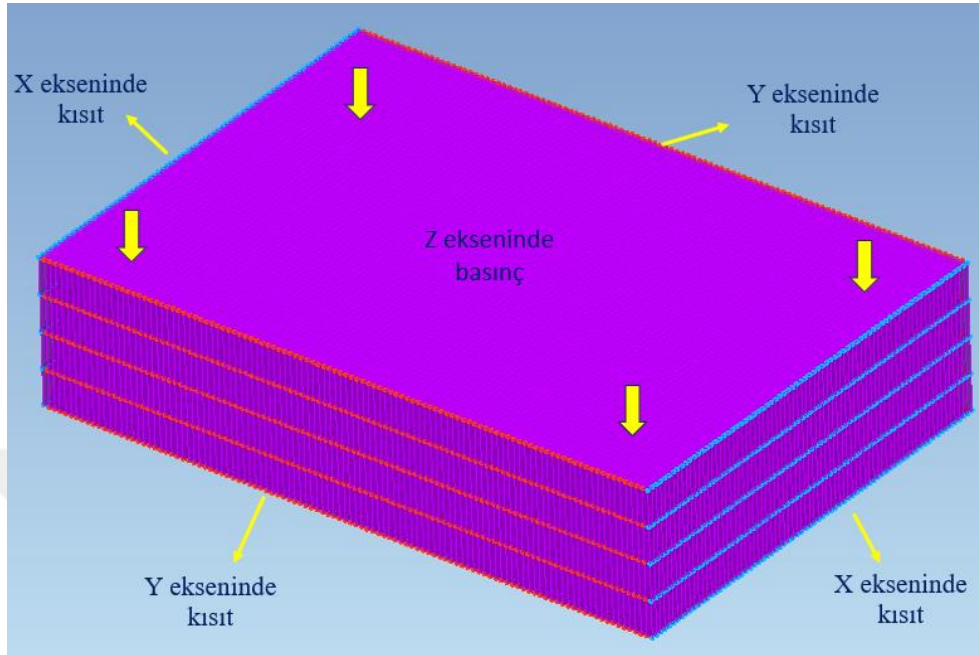
Diyafram özellikleri daha önce kauçuğun çekme test sonuçlarıyla belirlenmiş Beyazgül'ün tezi referans alınıp aynı girdiler kullanılmıştır. Bu doğrultuda poisson oranı $\nu=0.499$, A ve B sabitleri sırasıyla; -0,83 ve 3 olarak girilmiştir [24].

Kauçuk 40 mm kalınlığında 5 katmandan oluşacak şekilde modellenmiştir.



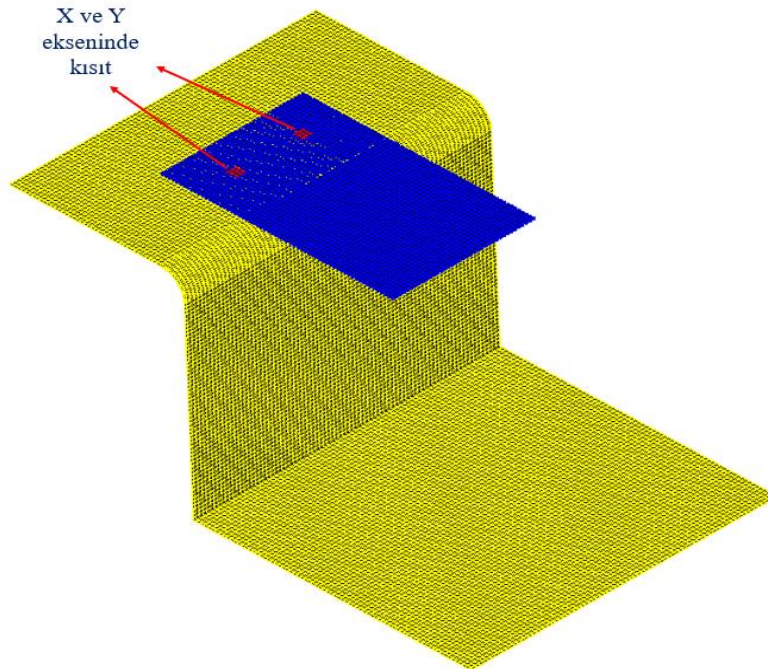
Şekil 4.4. Diyaframın PAM-STAMP ortamında modellenmesi

X ve Y eksenlerinde kauçuğun hareketini önlemek için kenarlardaki nodelar seçilip eksen kısıtı getirilmiştir. Sadece Z ekseninde serbestlik verilmiştir.



Şekil 4.5. Kauçuk yapısında sınır koşulları

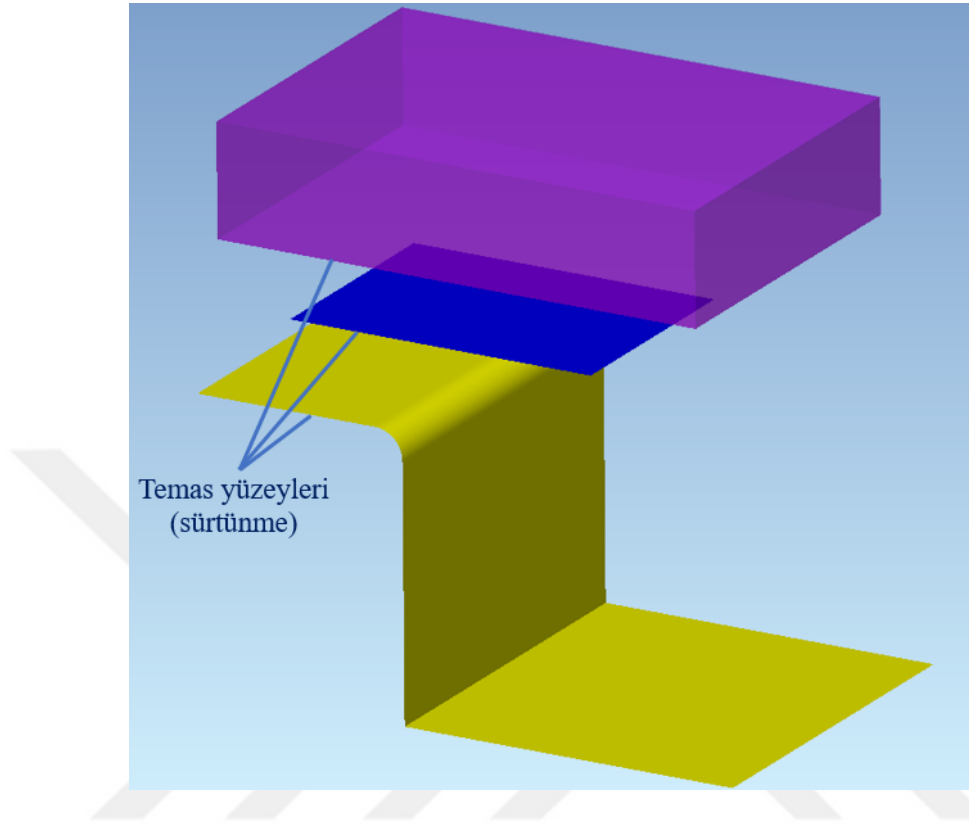
İş parçasının kalıp üzerinde yerleşimini simüle etmek üzere pin yerlerine denk gelen alandaki nodelar seçilmiş, X ve Y eksenlerindeki hareketi kısıtlanmıştır.



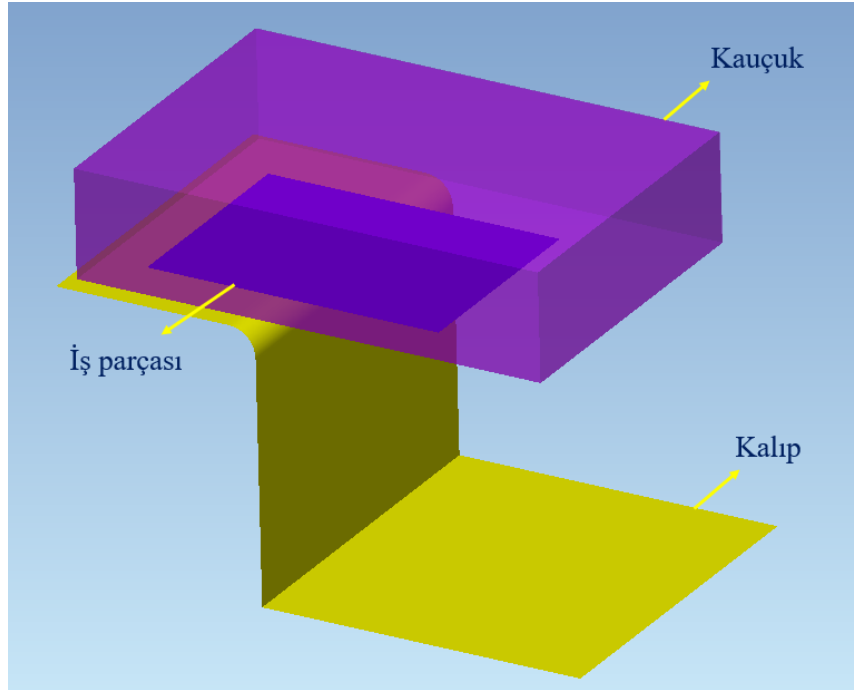
Şekil 4.6. İş parçasının sınır koşulları

Kalıbın her ekseninde hareketi kısıtlanmıştır.

İş parçası, kalıp ve kauçuk arasında temas ve sürtünme katsayısı tanımlanmıştır.

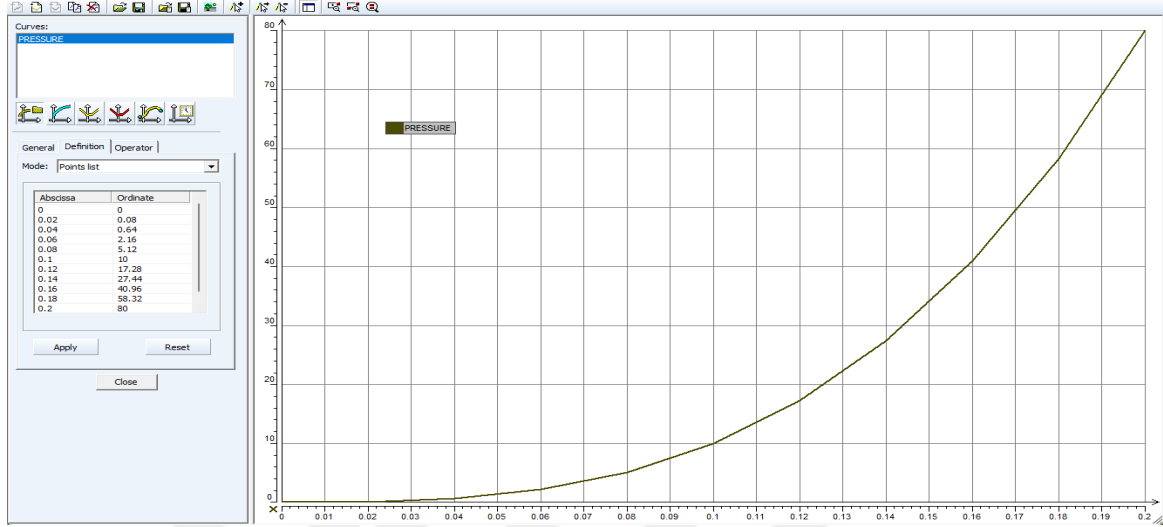


Şekil 4.7. Temas yüzeyleri



Şekil 4.8. Analizde genel yerleşim

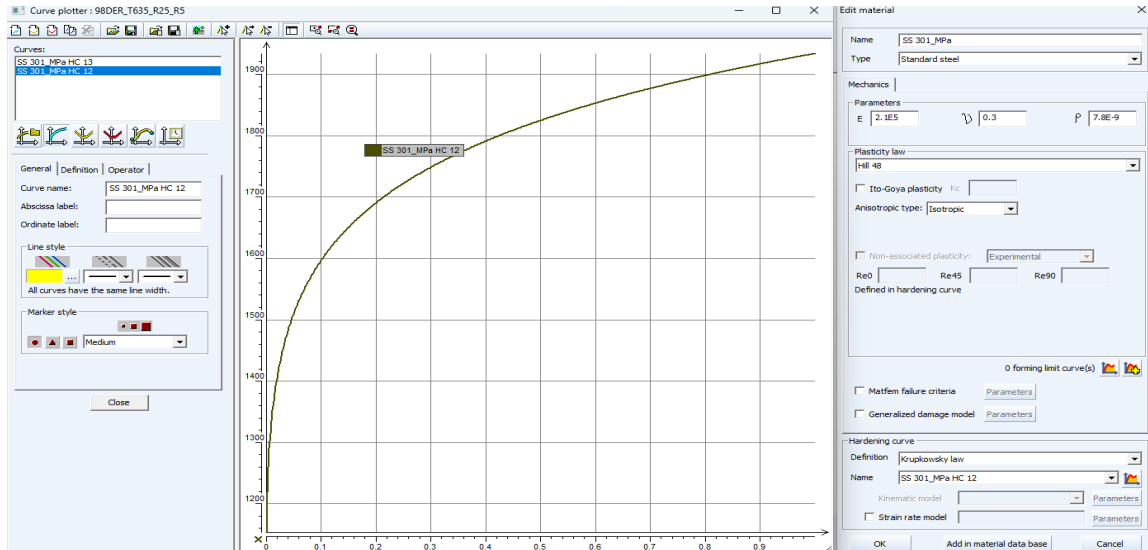
Basınç girdisi kauçuğun üst yüzeyinden -Z yönünde, zaman-basınç eğrisi ve grafiği 0,02 saniyelik bir zaman diliminde 40 adımdan oluşturulmuştur. Yani analizde basınç 0,2 saniyede 80 Mpa'a kadar çıkacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 4.9. Zaman-basınç eğrisi ve grafiği

İş parçasının malzeme kartının oluşturulmasında bölüm 5.1'de bahsedilen çekme testinden sağlanan verilerden yararlanılmıştır.

Pam-stamp analiz programında Krupkowsky law kısmında bu girdiler yapılmıştır.



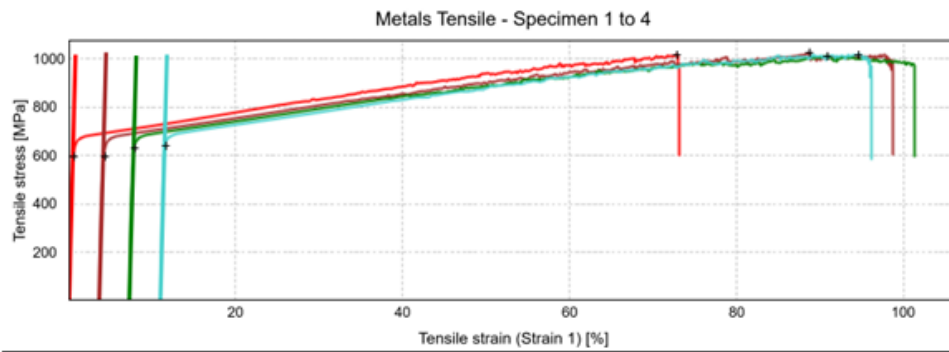
Şekil 4.10. AISI-301 çeliğe ait parametrelerin girilmesi

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Çekme Testi Sonuçları

Çekme testi sonuçları Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

TEST METHOD	ASTM E8 - Standard test method for tension testing of metallic materials.
TEST SPEED	0.005 mm/mm/min until yield strength , 0.05 mm/mm/min until break (Test speed rate : Strain rate controlled)
SPECIMEN TYPE	
SOIR / WORK ORDER NUMBER	ERTUĞ EREN - 2
MATERIAL SPECIFICATION &TYPE	
TEST MACHINE	INSTRON 5985, TENSILE TESTER, S/N 5985L2121 (T440120259)
EXTENSOMETER	INSTRON AutoX-750 EXTENSOMETER , Travel 750 mm (T3901592910) , Target Gauge Length : 50 mm
TEST DATE	04.04.2024
OPERATOR ID	
TEMPERATURE (°C)	23
HUMIDITY (%)	48
RESULT	PASS: / FAIL:
REMARKS	

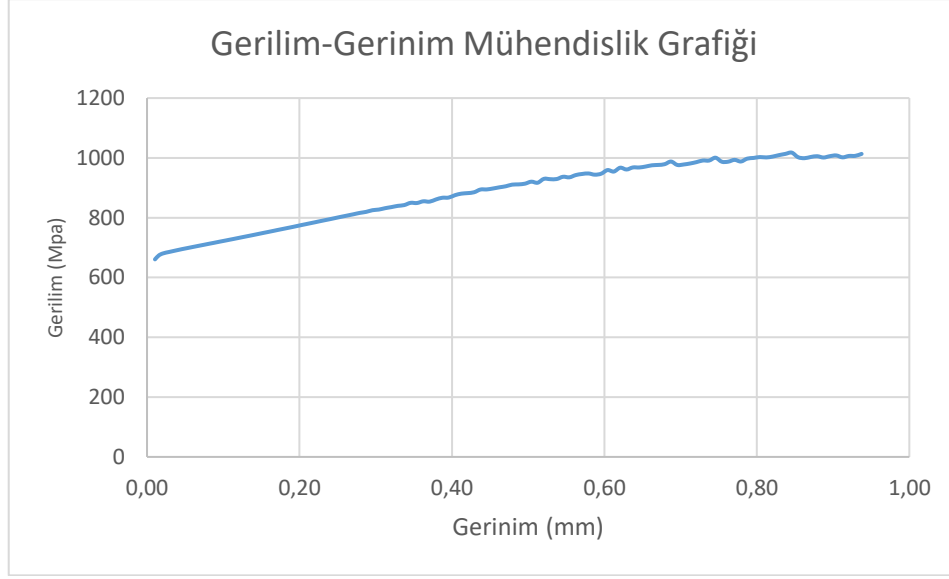


	REF. NO. & LOAD	Thickne ss [mm]	Width [mm]	Force at Tensile strength [N]	Modulus (E-modulus) [MPa]	Tensile stress at Yield (Offset 0.2 %) [MPa]	Tensile Strength [MPa]	Elongation (%)	FAILURE MODE
1	1	1.01	12.43	12766.27	132263.20	601.61	1016.88	56.56	
2	2	1.01	12.36	12813.16	124674.90	600.89	1026.40	56.24	
3	3	1.01	12.36	12638.69	119430.74	634.12	1012.42	52.48	
4	4	1.00	12.38	12594.29	129502.81	641.82	1017.31	51.56	
Minimum		1.00	12.36	12594.29	119430.74	600.89	1012.42	51.56	

Şekil 5.1. Çekme testi sonuçları

Yapılan çekme deneyi sonuçlarında ortaya çıkan verilerin bu malzemenin literatür değerlerine benzer olduğu görülmüştür [5][8].

Çekme testleri sonucunda elde edilen kuvvet-uzama değerleri numunenin ilk boy ve kesit alanlarına bölünerek mühendislik gerilim-gerinim grafikleri elde edilir [23].



Şekil 5.2 AISI-301 çelik çekmedeki mühendislik gerilim-gerinim grafiği

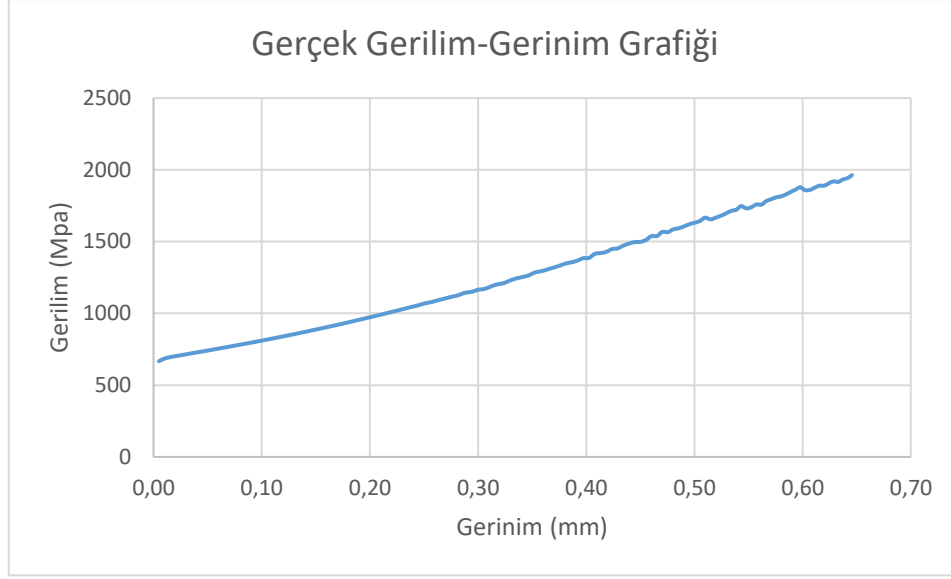
Çekme testi sonucunda elde edilen mühendislik gerinimi değerleri kullanılarak da eşitlik

2.5 ve 2.6’da yer aldığı gibi gerçek gerilim ve gerinim değerleri elde edilir [23].

$$\varepsilon_g = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (5.1)$$

$$\sigma_g = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (5.2)$$

K, n malzeme sabitleri K; Dayanım sabiti, n; Pekleşme üsteli olarak ifade edilmektedir.



Şekil 5.3. AISI-301 çelik çekmedeki gerçek gerilim-gerinim grafiği

Hollomon bağıntısı, plastik deformasyon sırasında malzemelerin gerilme-gerinim ilişkisini tanımlamak için kullanılan bir matematiksel modeldir. Özellikle metal şekillendirme işlemlerinde, malzemelerin akma davranışını ve sertleşme özelliklerini modellemek için yaygın olarak kullanılır.

Hollomon bağıntısı şu şekilde ifade edilir:

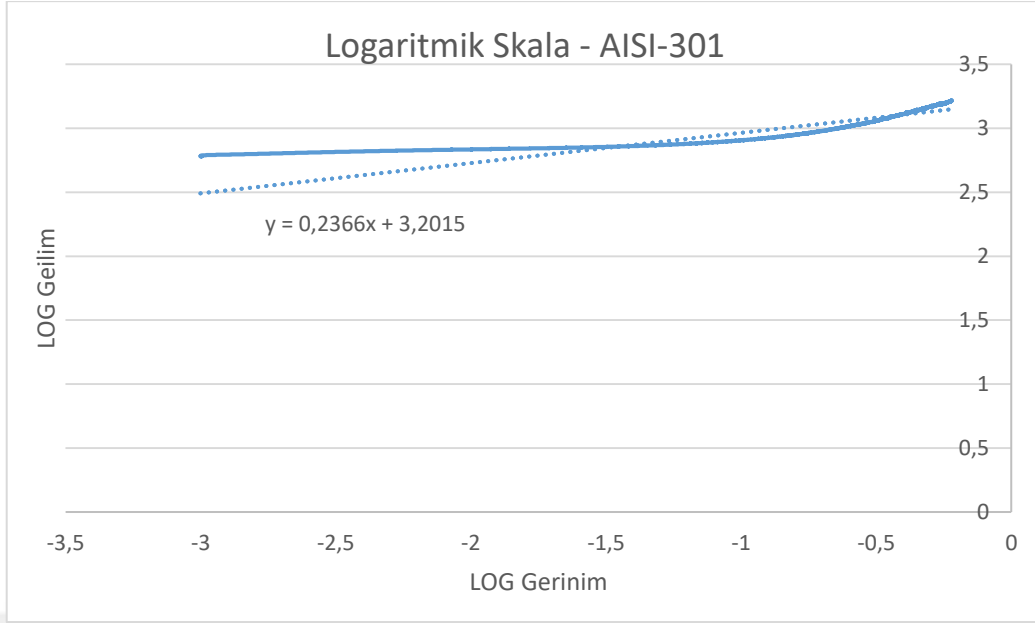
$$\sigma_g = K \times \varepsilon^n \quad (5.3)$$

Burada:

- K : Plastisite modülü, malzemenin sertlik seviyesini belirler,
- n : Sertleşme üssü, malzemenin sertleşme oranını ifade eder ve genellikle 0 ile 1 arasında bir değere sahiptir.

K ve n değerlerini hesaplayabilmek için eşitlik 5.3'e göre Holloman bağıntısının logaritması alındığında bir doğru denklemi olan eşitlik 5.4 elde edilir.

$$\ln \sigma_g = \ln K + n \ln \varepsilon \quad (5.4)$$



Şekil 5.4 Logaritmik skalada çekme diyagramı

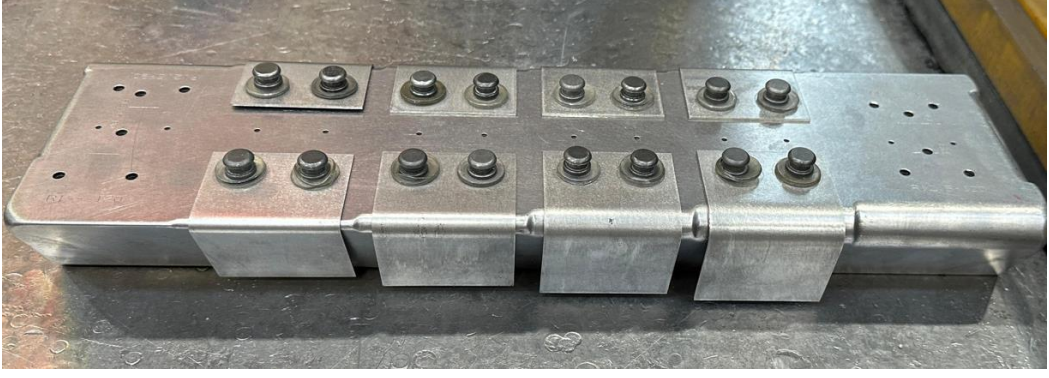
AISI-301 çelik malzemesi için yapılan çekme testleri sonucunda elde edilen grafiklerin logaritmik değerleri alınıp eğimleri bulunursa;

n : 0,236

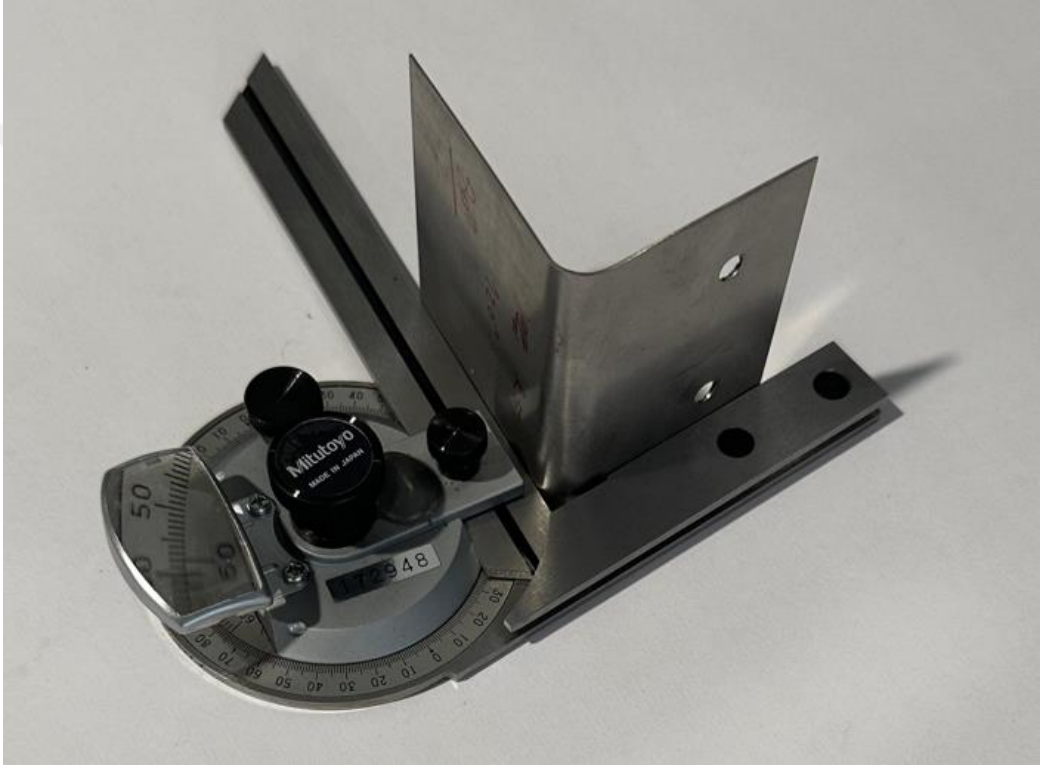
K : 1594,4 MPa

5.2. Deney Sonuçları

Basım sonrası kalıp üzerindeki iş parçalarının görüntüsü Şekil 5.5’de verilmiştir. AISI-301 çelik malzemesi için 5 mm ve 10 mm büküm radyusunda, 90 ° ve 120 ° kalıp açılarında yapılan deneylerden sonuçlar elde edilmiştir. Açı ölçer ile ölçülen iş parçalarının açıları ve ortalama geri yaylanmalar Tablo 5.1’de listelenmiştir.



Şekil 5.5. Form işlemi sonrası numuneler

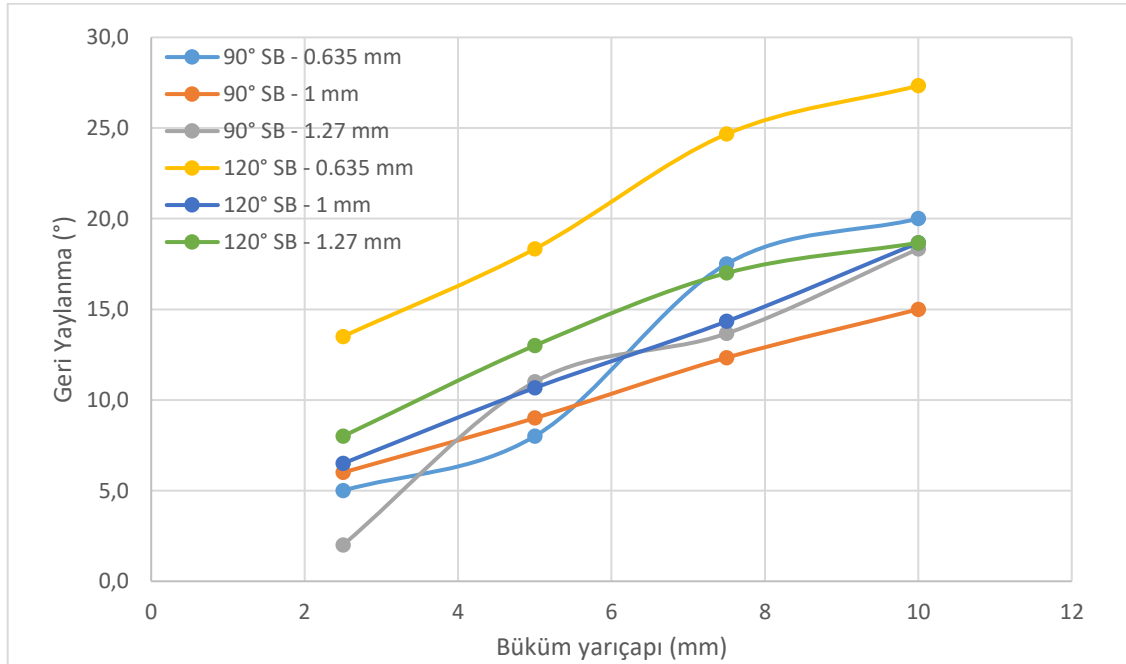


Şekil 5.6. Form işlemi sonrası numune ölçümü

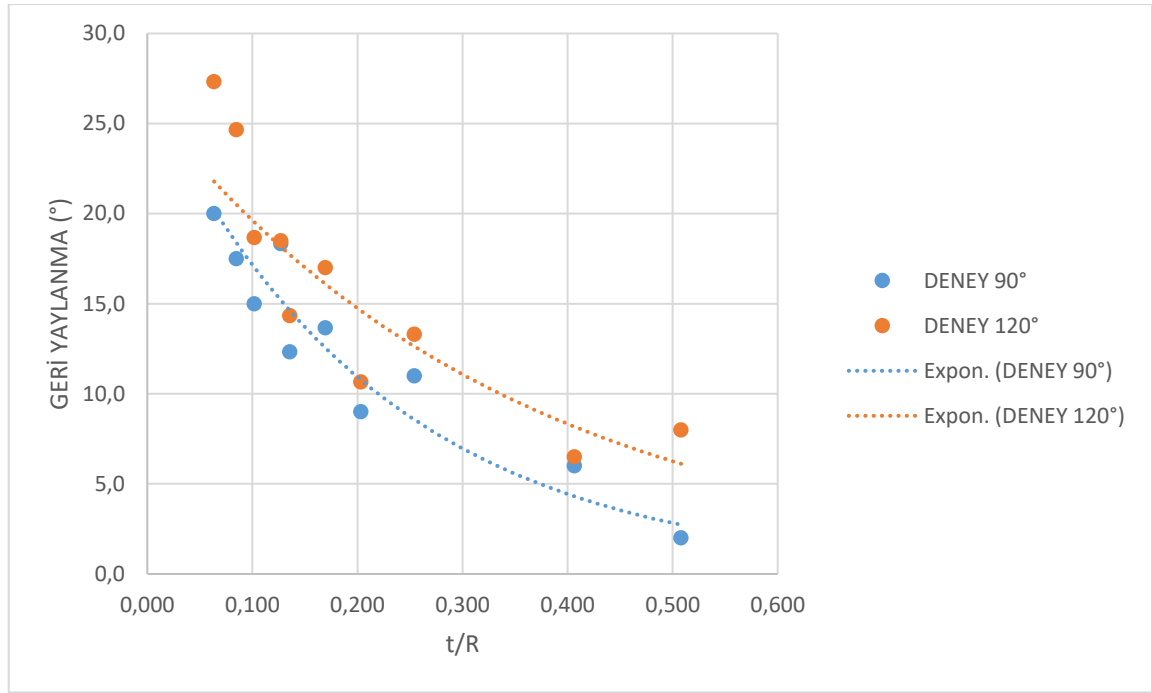
Deney sonuçları listelenmiş ve Tablo 5.1’de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Ölçüm sonuçları

NUMUNE KALINLIĞI (mm)	0,635				1,016				1,270			
BÜKÜM RAYYUSU (mm)	2,5	5,0	7,5	10,0	2,5	5,0	7,5	10,0	2,5	5,0	7,5	10,0
90° KALIP AÇISI BASIM 1 (°)	x	x	72,0	x	84,0	81,0	77,0	x	88,0	79,0	76,0	71,0
90° KALIP AÇISI BASIM 2 (°)	85,0	82,0	x	68,0	84,0	81,0	78,0	75,0	88,0	80,0	78,0	72,0
90° KALIP AÇISI BASIM 3 (°)	85,0	82,0	73,0	72,0	84,0	81,0	78,0	75,0	x	78,0	75,0	72,0
3 BASIM ORTALAMASI (°)	85,0	82,0	72,5	70,0	84,0	81,0	77,7	75,0	88,0	79,0	76,3	71,7
ORTALAMA GERİ YAYLANMA (°)	5,0	8,0	17,5	20,0	6,0	9,0	12,3	15,0	2,0	11,0	13,7	18,3
120° KALIP AÇISI BASIM 1 (°)	74,0	80,0	85,0	88,0	66,0	70,0	75,0	77,0	68,0	73,0	77,0	78,0
120° KALIP AÇISI BASIM 2 (°)	x	77,0	84,0	87,0	67,0	71,0	74,0	79,0	68,0	73,0	78,0	80,0
120° KALIP AÇISI BASIM 3 (°)	73,0	78,0	85,0	87,0	x	71,0	74,0	80,0	68,0	73,0	76,0	78,0
3 BASIM ORTALAMASI (°)	73,5	78,3	84,7	87,3	66,5	70,7	74,3	78,7	68,0	73,0	77,0	78,7
ORTALAMA GERİ YAYLANMA (°)	13,5	18,3	24,7	27,3	6,5	10,7	14,3	18,7	8,0	13,0	17,0	18,7



Şekil 5.7. AISI-301 çeliğin farklı kalınlıklara ve büküm açlarına göre geri yaylanmalar



Şekil 5.8. AISI-301 çeliğin t/R cinsinden geri yaylanmaları

Deney verilerinden oluşturulan grafik, geri yaylanma açısının t/R (malzeme kalınlığının eğrilik yarıçapına oranı) ile nasıl değiştiğini göstermektedir.

Düşük t/R oranlarında (0,064–0,127), büküm açısı 90° için geri yaylanma açısı 20° ile 18,3° arasında değişirken, büküm açısı 120° için daha yüksek bir aralık (27,3°–18,5°) görülüyor. Bu, düşük t/R oranlarında geri yaylanmanın malzemenin geometrik özelliklerinden büyük ölçüde etkilendiğini gösteriyor.

Orta t/R oranlarında (0,135–0,203) her iki deneyde de geri yaylanma açısı düşmeye başlıyor. Bu, malzemenin deformasyon direncinin ve elastik toparlanmanın azaldığını göstermektedir.

Yüksek t/R oranlarında (0,254–0,508) ise geri yaylanma değerleri hem büküm açısı 90° hem de 120° olan deneylerde oldukça düşük değerlere ulaşıyor. Örneğin, 90° için 2°, 120° için 8° değerleri kaydedilmiş. Bu, kalın malzemelerde geri yaylanmanın daha az belirgin olduğunu ortaya koyuyor.

Her iki deney içinde t/R oranı arttıkça geri yaylanma açısının azaldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, ince ve daha küçük eğrilik yarıçaplı malzemelerin daha fazla

geri yaylanmaya maruz kaldığına işaret etmekte. 120°’deki geri yaylanma açıları genellikle 90°’den daha yüksektir. Bu durum, daha büyük eğilme açılarına sahip şekillendirme işlemlerinde daha fazla geri yaylanmanın meydana geldiğini göstermektedir.

Şekil 5.8 üzerindeki üstel eğriler, deneysel verilerin iyi bir şekilde açıklanabildiğini gösteriyor. Bu da geri yaylanma davranışının genellikle t/R ile üstel bir ilişkiye sahip olduğunu ifade etmektedir.

Geri yaylanma açılarının t/R oranına bağlı değişimini gösteren bu üstel eğrilerin R^2 değerleri incelendiğinde;

Büküm yarıçapı 90° olan deney için $R^2=0,891$

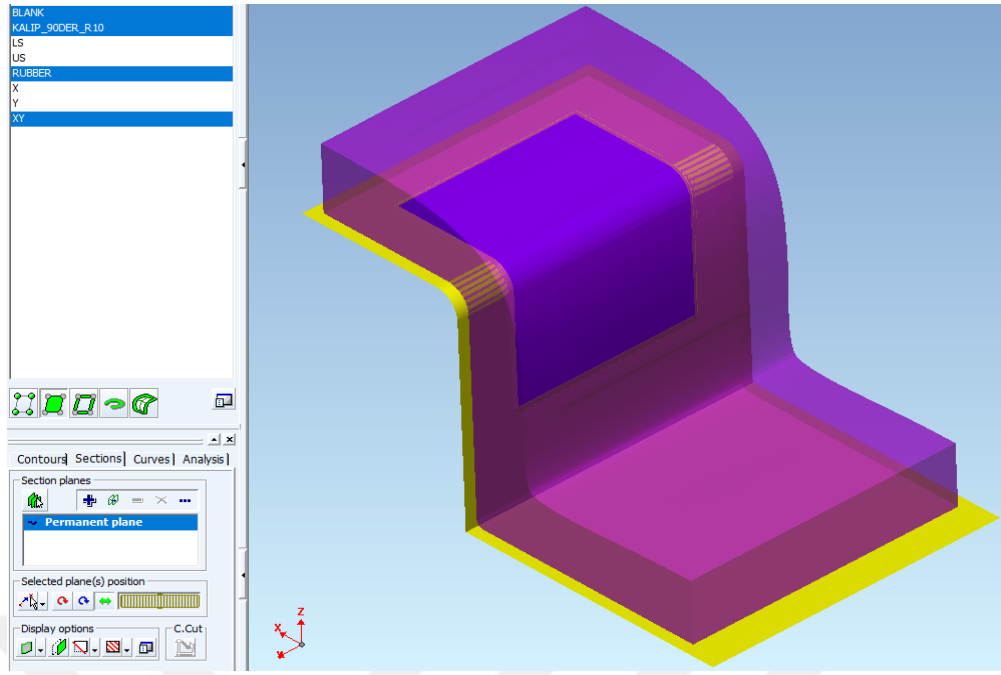
Büküm yarıçapı 120° için $R^2=0,8169$ değerleri bulunur.

Determinasyon katsayısı olan R^2 , bir modelin açıklama gücünü ölçen bir metriktir ve 0 ile 1 arasında bir değer alır ve $0.75 \leq R^2 \leq 1.0$ olan model yüksek doğruluklu veri anlamına gelir.

Dolayısıyla, üstel modellerin geri yaylanma davranışını yüksek bir doğrulukla temsil ettiğini göstermektedir.

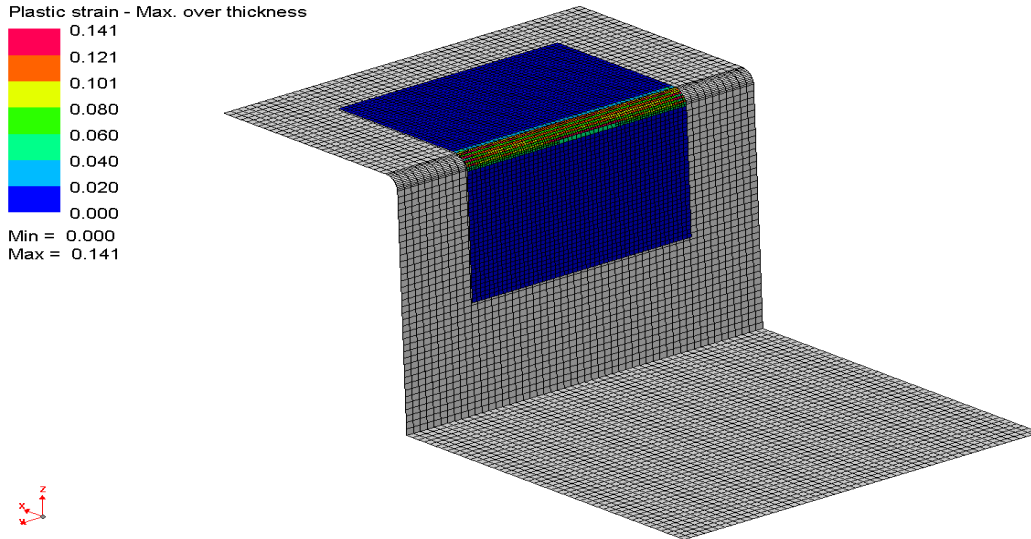
5.3. Analiz Sonuçları

Basınç-zaman girdimizin tamamlanması ile oluşan .pic datası Pam-Stamp’te geri yaylanma modülünde girdi olarak kullanılır ve geri yaylanma analizi burada yapılmıştır.



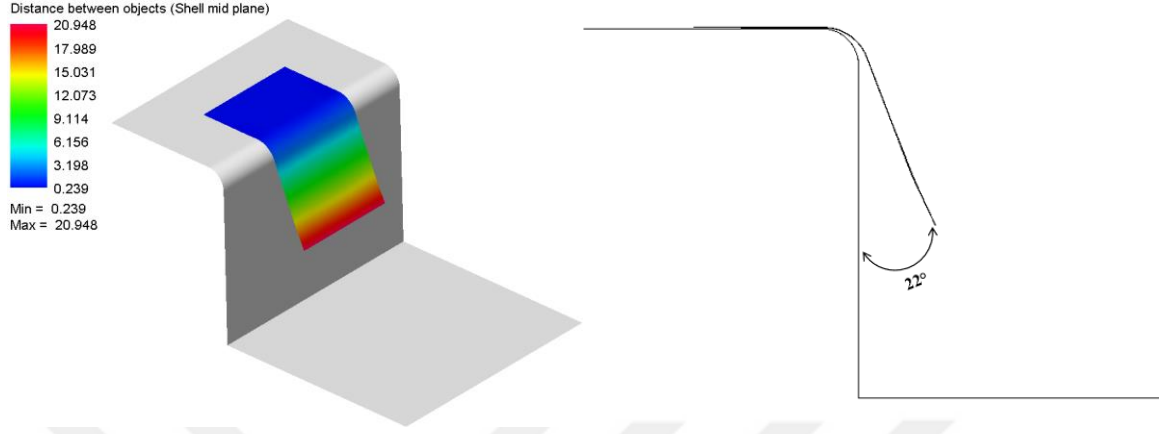
Şekil 5.9. Lastik-diyafram ile form sonrası görüntüsü

Form işlemi sonrası plastik gerinimleri gösteren modülde kabuk elemanın üst, zar ve alt lifleri arasında maksimum plastik deformasyon dağılımı Şekil 5.10’da görülmektedir. Form verildikten sonra numuneler üzerindeki plastik gerinimlerin büküm yerinde düzgün dağılıma sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.10. Analizde şekillendirme sonucunda numune üstündeki gerinim

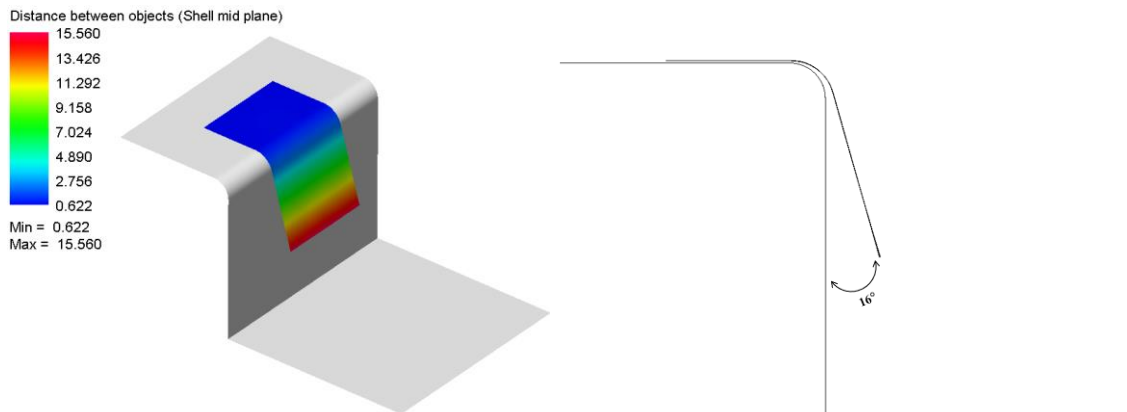
90° büküm açısına sahip 10 mm büküm radiuslu kalıptaki analiz sonuçları Şekil 5.11, 5.13 ve 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Numune kalınlığı 0,635 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

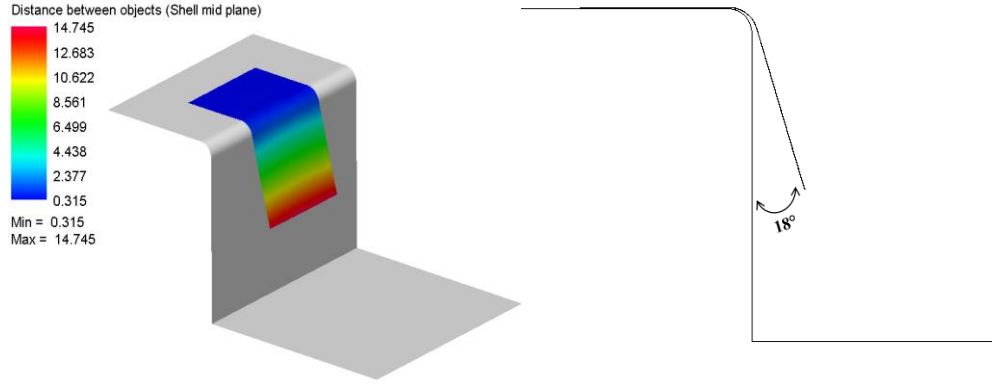


Şekil 5.12. Numune kalınlığı 1 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

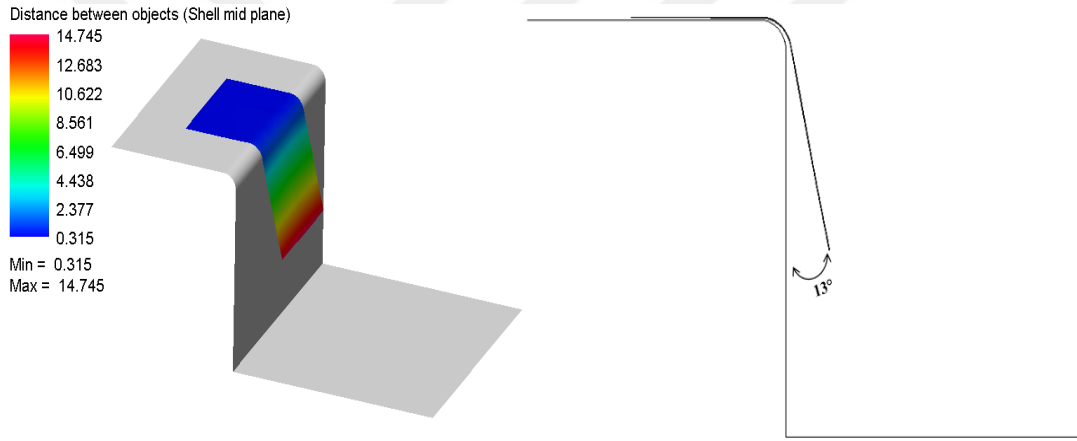


Şekil 5.13. Numune kalınlığı 1,27 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

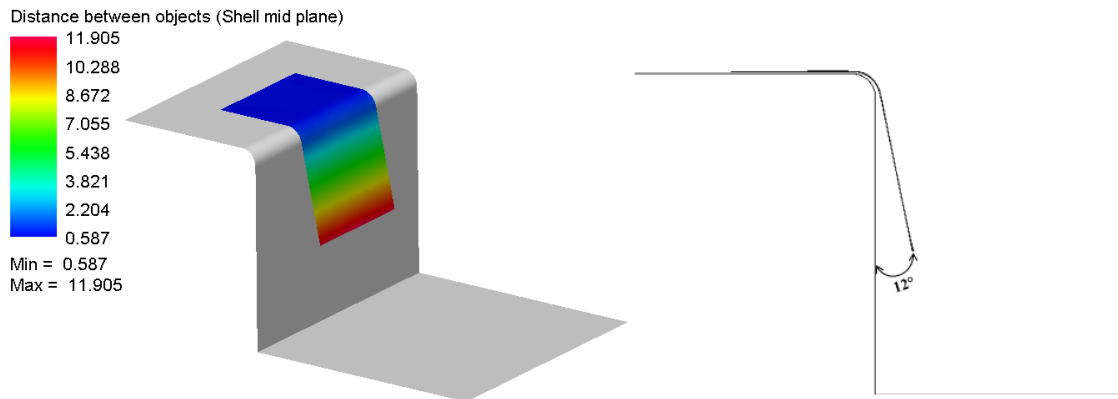
90° büküm açısına sahip 7,5 mm büküm radyuslu kalıptaki analiz sonuçları Şekil 5.14, 5.15 ve 5.16’da gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Numune kalınlığı 0,635 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

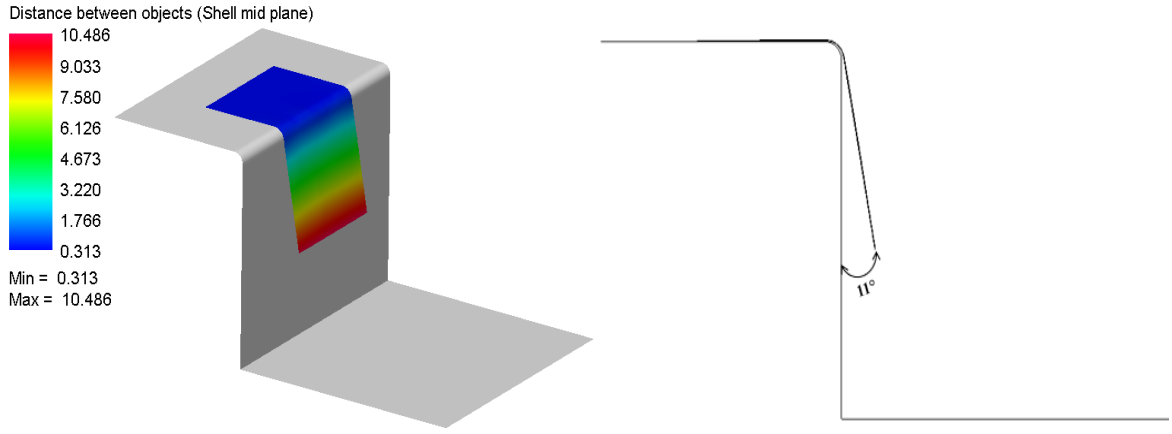


Şekil 5.15. Numune kalınlığı 1,0 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

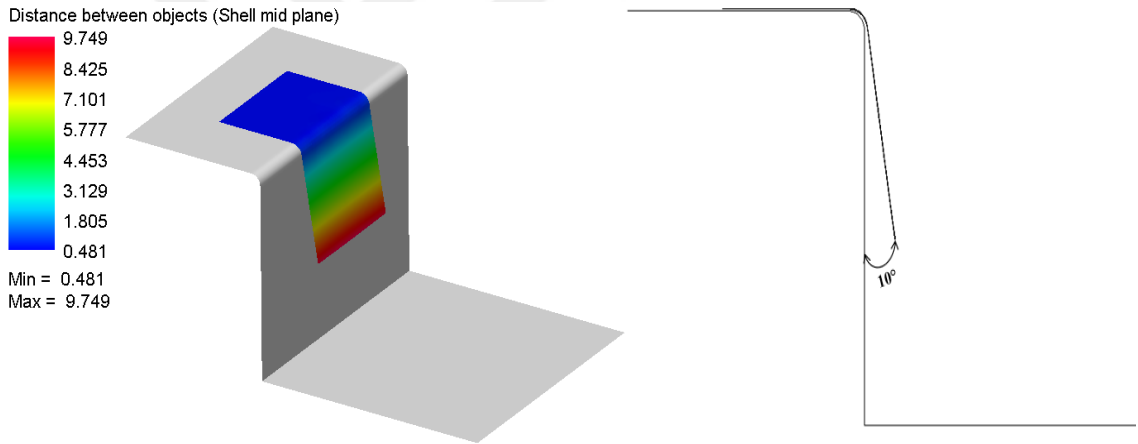


Şekil 5.16. Numune kalınlığı 1,27 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

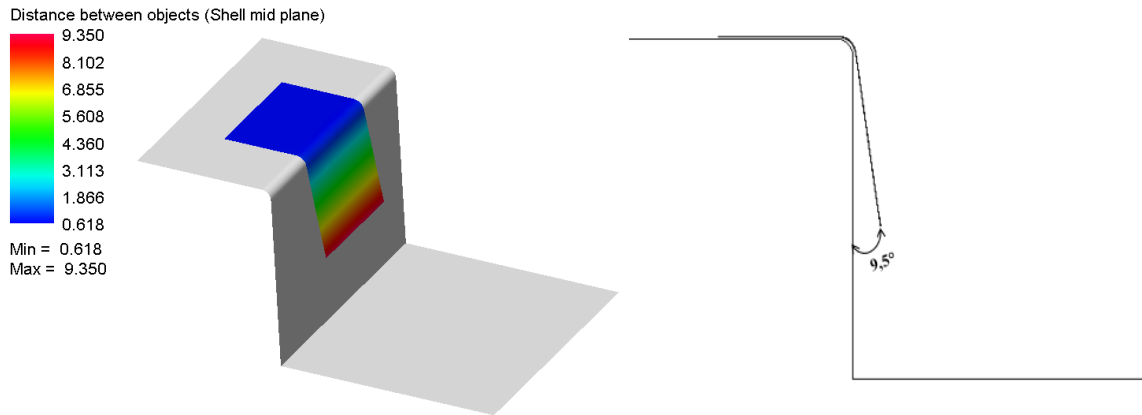
90° büküm açısına sahip 5 mm büküm radyuslu kalıptaki analiz sonuçları Şekil 5.17, 5.18 ve 5.19’da gösterilmiştir.



Şekil 5.17. Numune kalınlığı 0,635 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

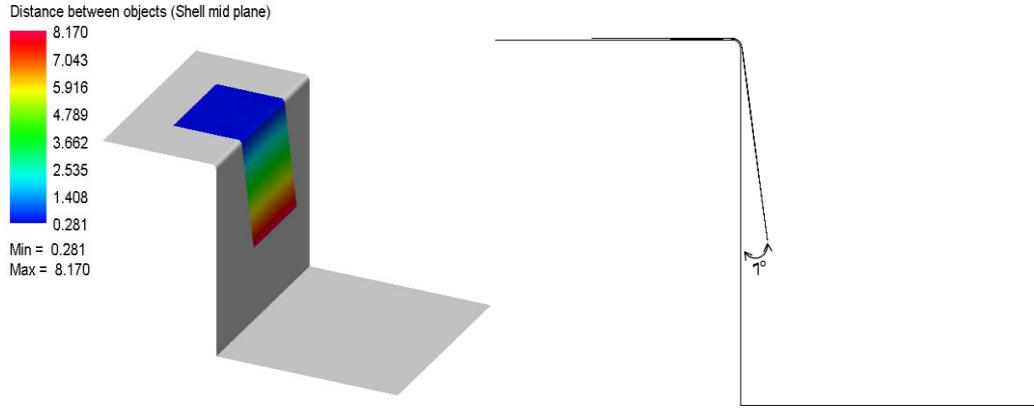


Şekil 5.18. Numune kalınlığı 1,0 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

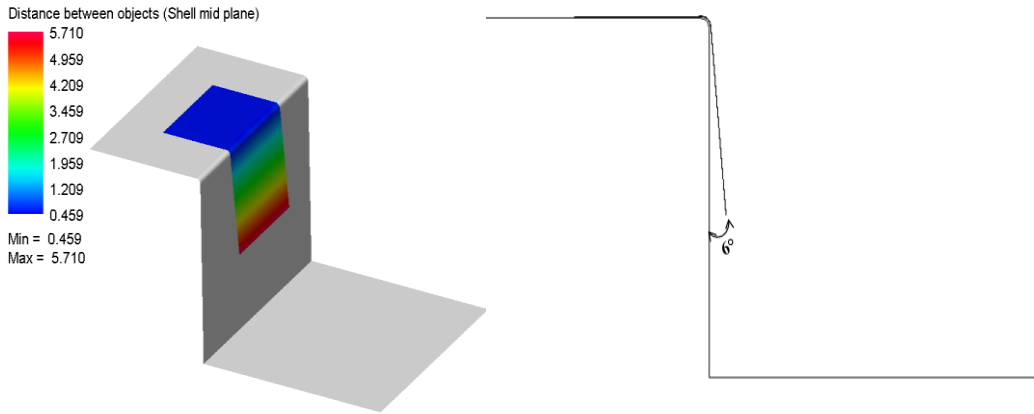


Şekil 5.19. Numune kalınlığı 1,27 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

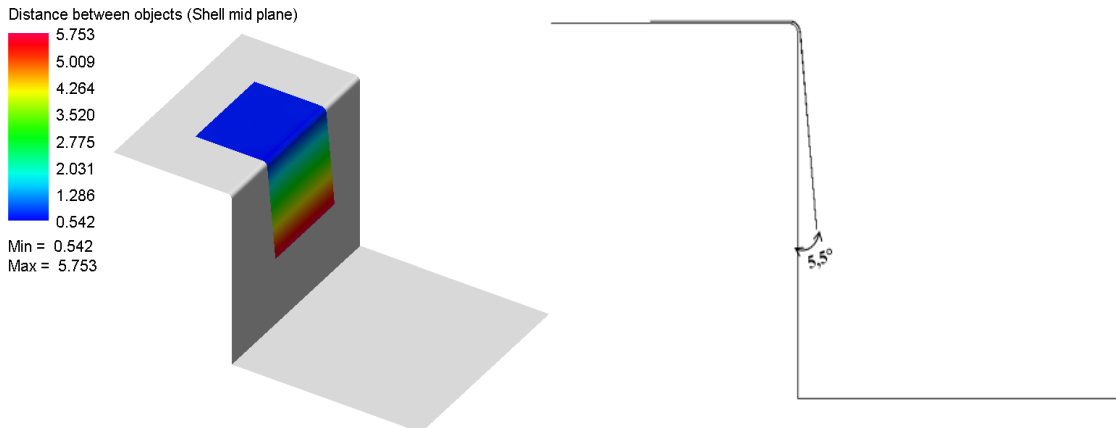
90° büküm açısına sahip 2,5 mm büküm radyuslu kalıptaki analiz sonuçları Şekil 5.20, 5.21 ve 5.22’de gösterilmiştir.



Şekil 5.20. Numune kalınlığı 0,635 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

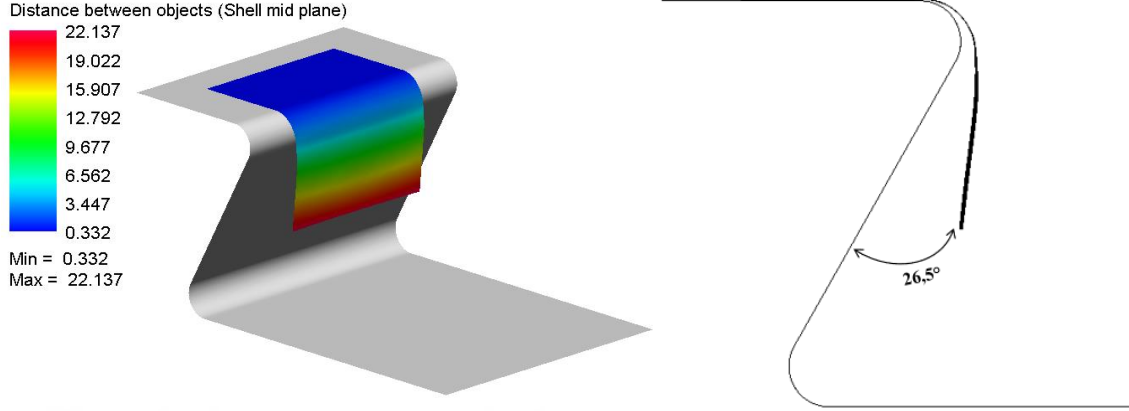


Şekil 5.21. Numune kalınlığı 1 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

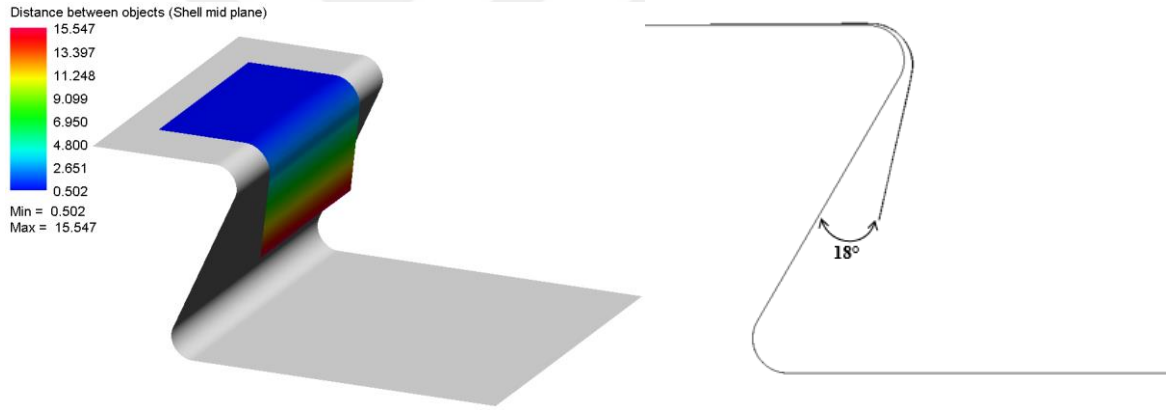


Şekil 5.22. Numune kalınlığı 1,27 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

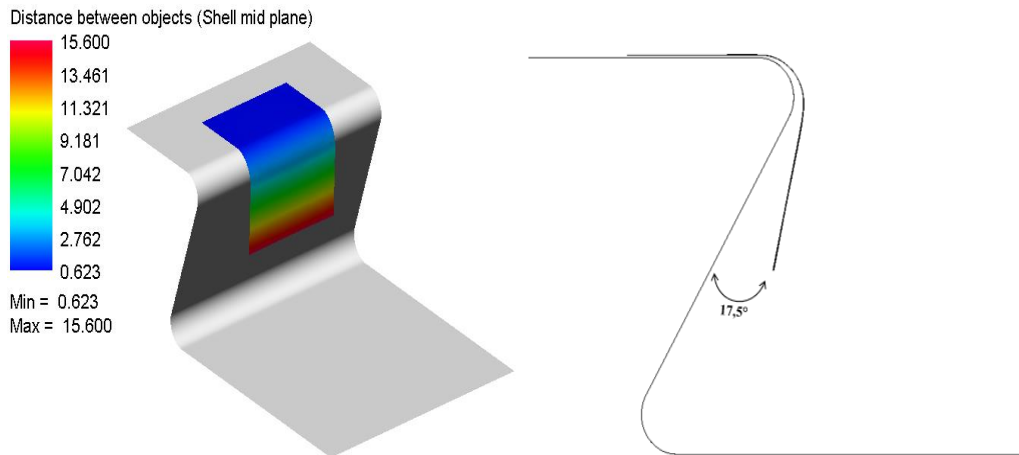
120° büküm açısına sahip 10 mm büküm radyuslu kalıptaki analiz sonuçları Şekil 5.23, 5.24 ve 5.25’de gösterilmiştir.



Şekil 5.23. Numune kalınlığı 0,635 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

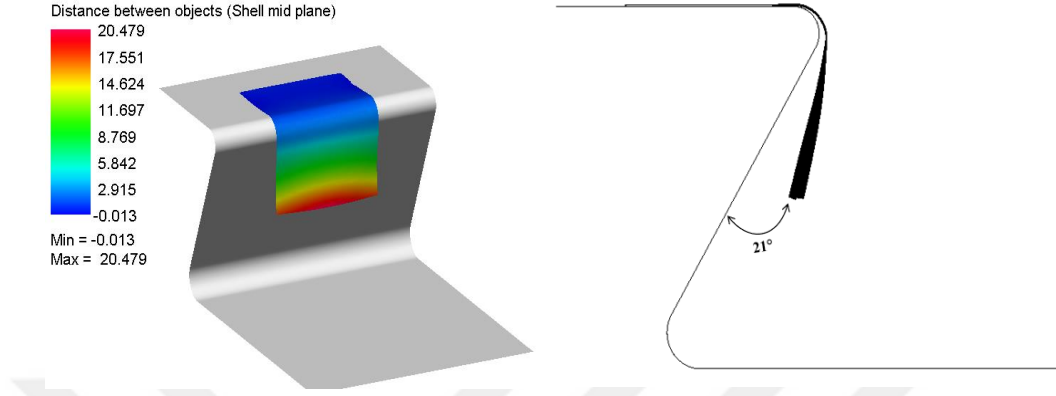


Şekil 5.24. Numune kalınlığı 1 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

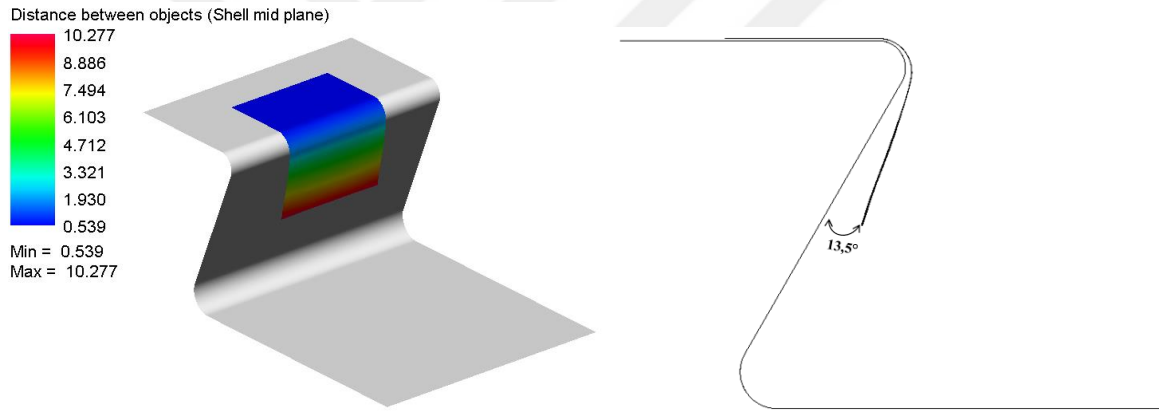


Şekil 5.25. Numune kalınlığı 1,27 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

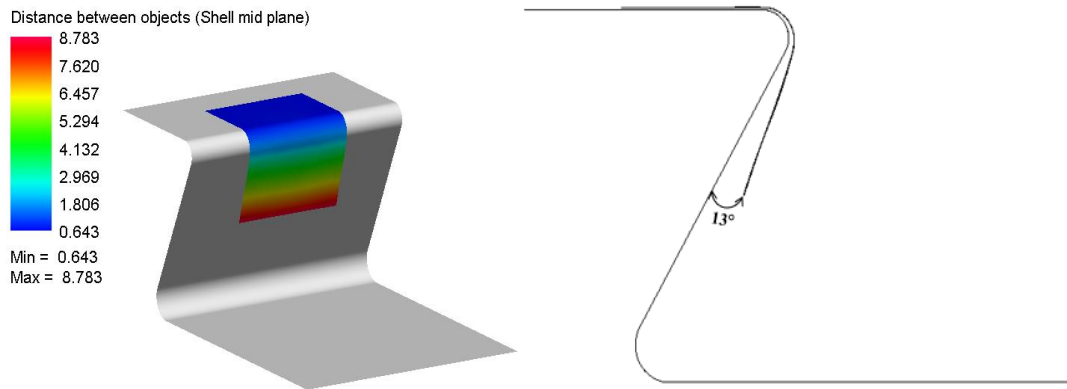
120° büküm açısına sahip 7,5 mm büküm radyuslu kalıptaki analiz sonuçları Şekil 5.26, 5.27 ve 5.28’de gösterilmiştir.



Şekil 5.26. Numune kalınlığı 0,635 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

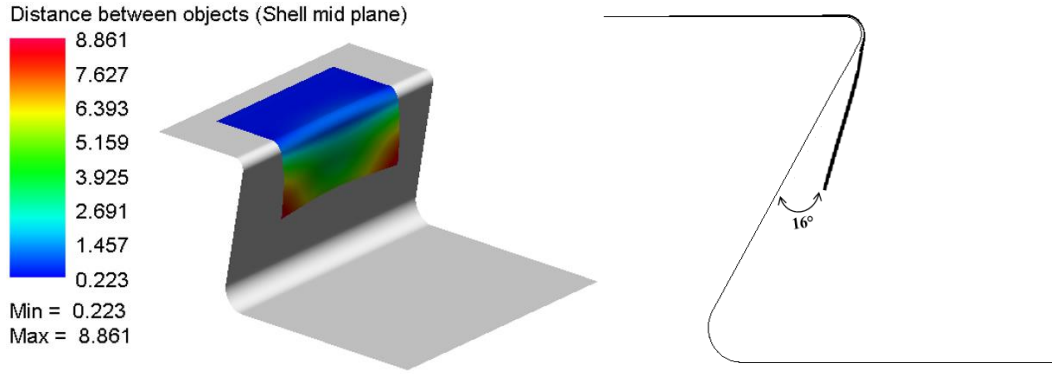


Şekil 5.27. Numune kalınlığı 1 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

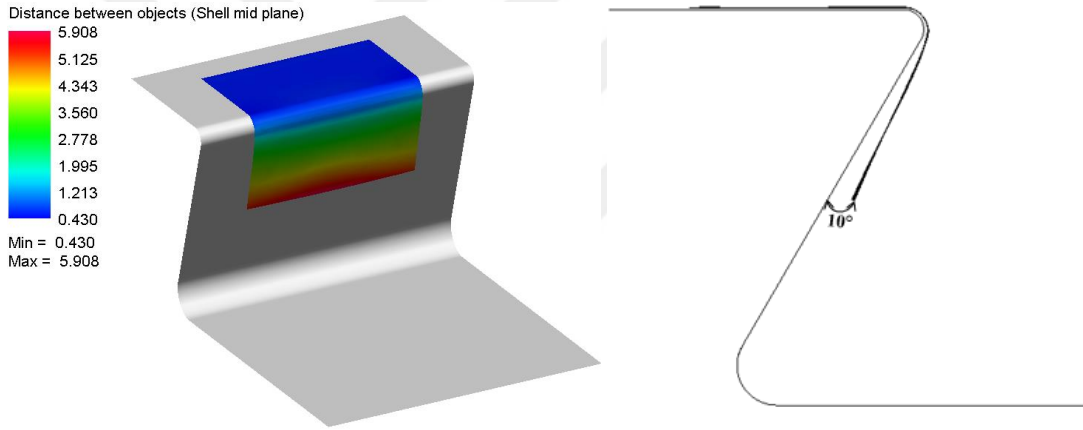


Şekil 5.28. Numune kalınlığı 1,27 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

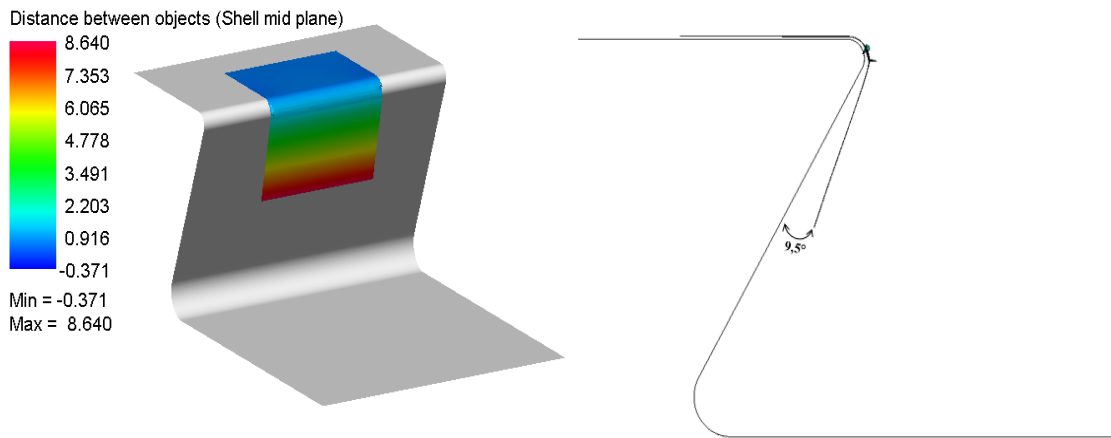
120° büküm açısına sahip 5 mm büküm radiuslu kalıptaki analiz sonuçları Şekil 5.29, 5.30 ve 5.31’de gösterilmiştir.



Şekil 5.29. Numune kalınlığı 0,635 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

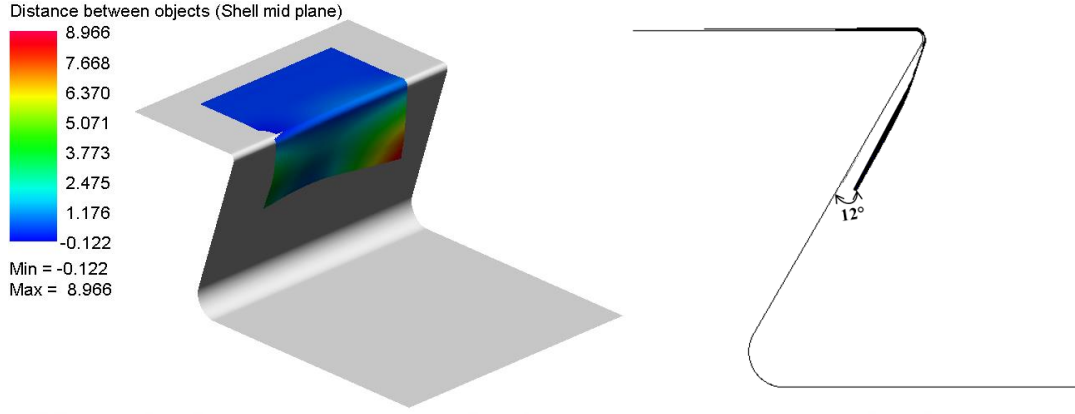


Şekil 5.30. Numune kalınlığı 1 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

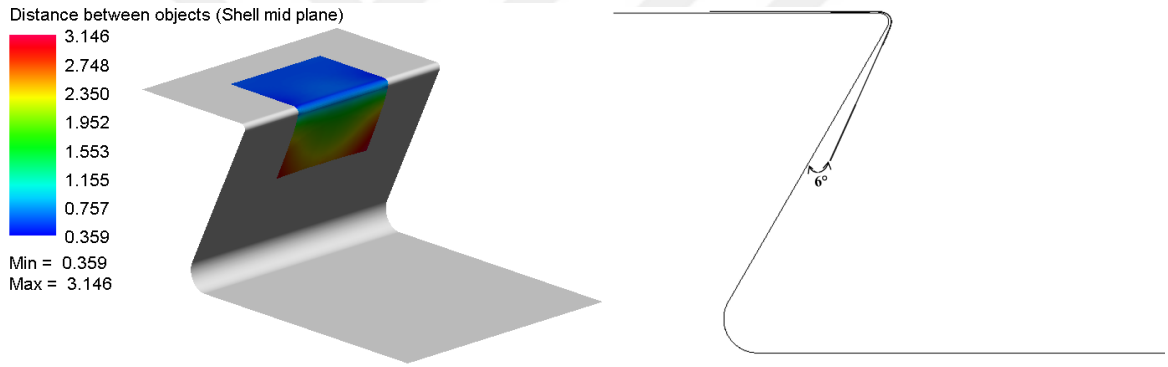


Şekil 5.31. Numune kalınlığı 1,27 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

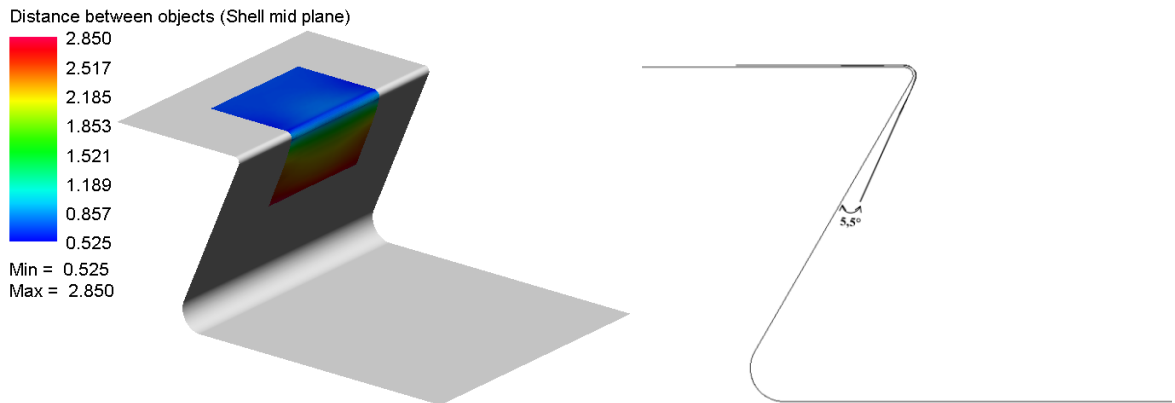
120° büküm açısına sahip 2,5 mm büküm radiuslu kalıptaki için analiz sonuçları Şekil 5.32, 5.33 ve 5.34’de gösterilmiştir.



Şekil 5.32. Numune kalınlığı 0,635 mm için geri yaylanma miktarları (mm)



Şekil 5.33. Numune kalınlığı 1 mm için geri yaylanma miktarları (mm)



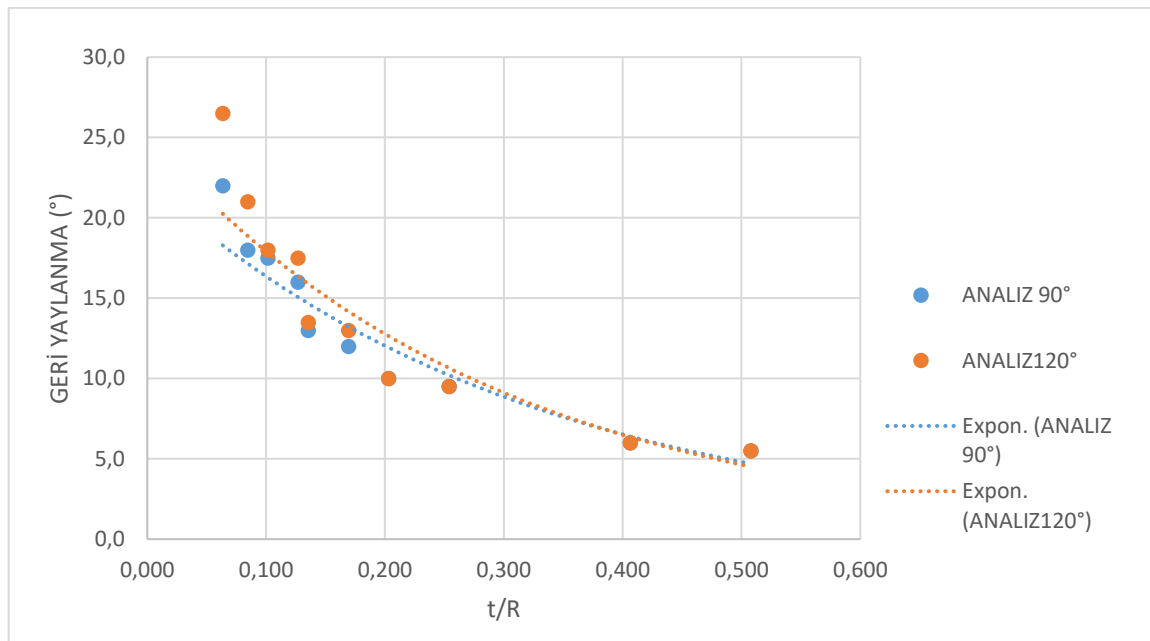
Şekil 5.34. Numune kalınlığı 1,27 mm için geri yaylanma miktarları (mm)

Sonlu eleman analizi sonuçları Tablo 5.2’de listelenmiştir.

Tablo 5.2. SAE sonucu geri yaylanma açıları

AISI-301 Çelik Malzeme Kalınlığı (mm)	Kalıp Büküm Yarıçapı (mm)	90° Kalıpta Geri Yaylanma Açısı (°)	120° Kalıpta Geri Yaylanma Açısı (°)
0,635	2,5	7,0	12,0
	5	11,0	16,0
	7,5	18,0	21,0
	10	22,0	26,5
1,016	2,5	6,0	6,0
	5	10,0	10,0
	7,5	13,0	13,5
	10	17,5	18,0
1,27	2,5	5,5	5,5
	5	9,5	9,5
	7,5	12,0	13,0
	10	16,0	17,5

Analiz sonucunda form verilen parçaların geri yaylanma değerleri kaydedilmiş, aşağıdaki gibi t/R – geri yaylanma grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 5.35. Analize sonucu t/R – geri yaylanma

Analiz sonucunda her iki veri setinde de açısai geri yaylanma miktarının t/R oranı arttıkça azaldığı gözlemlenmektedir. 120° bükme açılı analizlerinde geri yaylanma miktarının 90° 'ye göre biraz daha fazla olduğu hesaplanmıştır.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında AISI-301 paslanmaz çelik sac malzemeden 0,635 mm, 1,016 mm ve 1,27 mm kalınlıkta numuneler hazırlanmış, büküm yarıçapları 2,5 mm, 5 mm, 7,5 mm ve 10 mm ve büküm açısı 90° ve 120° olan AISI-4140 malzemeden üretilmiş kalıp üzerinde hidroformla şekillendirmeye tabi tutulmuşlardır. Benzer şartları oluşturulan sonlu elemanlar analizleri PAM-STAMP programında gerçekleştirilmiştir.

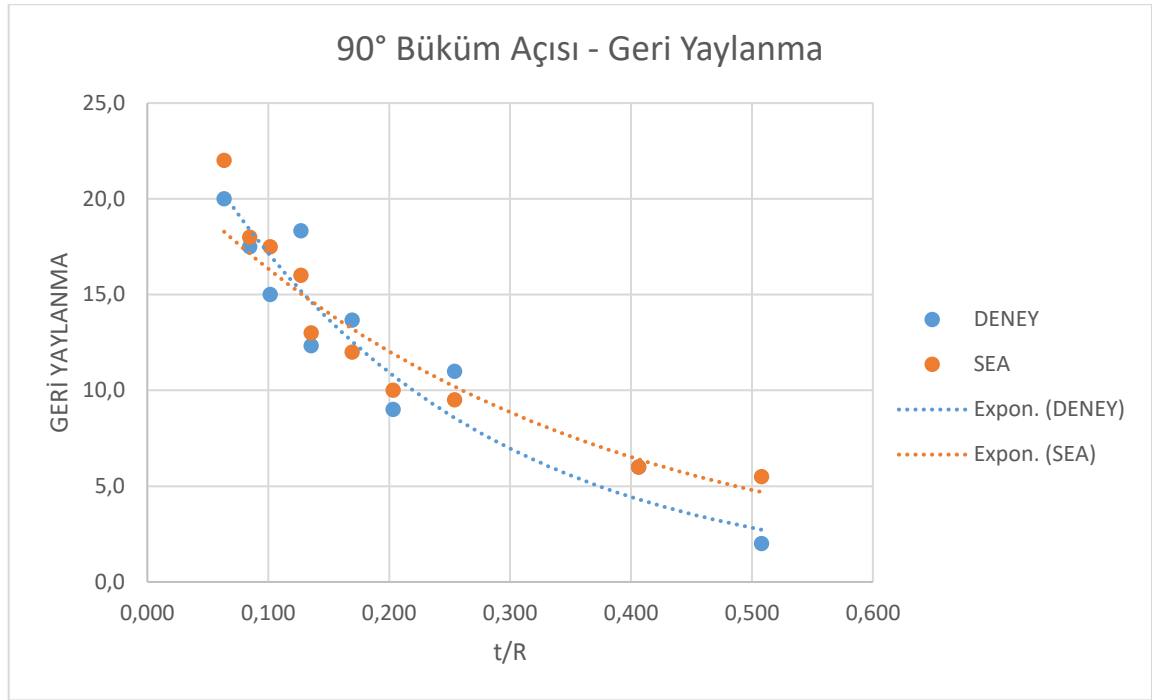
DeneySEL sonuçlar ve analiz sonuçları Tablo 6.1’de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. SAE ve deney sonuçları

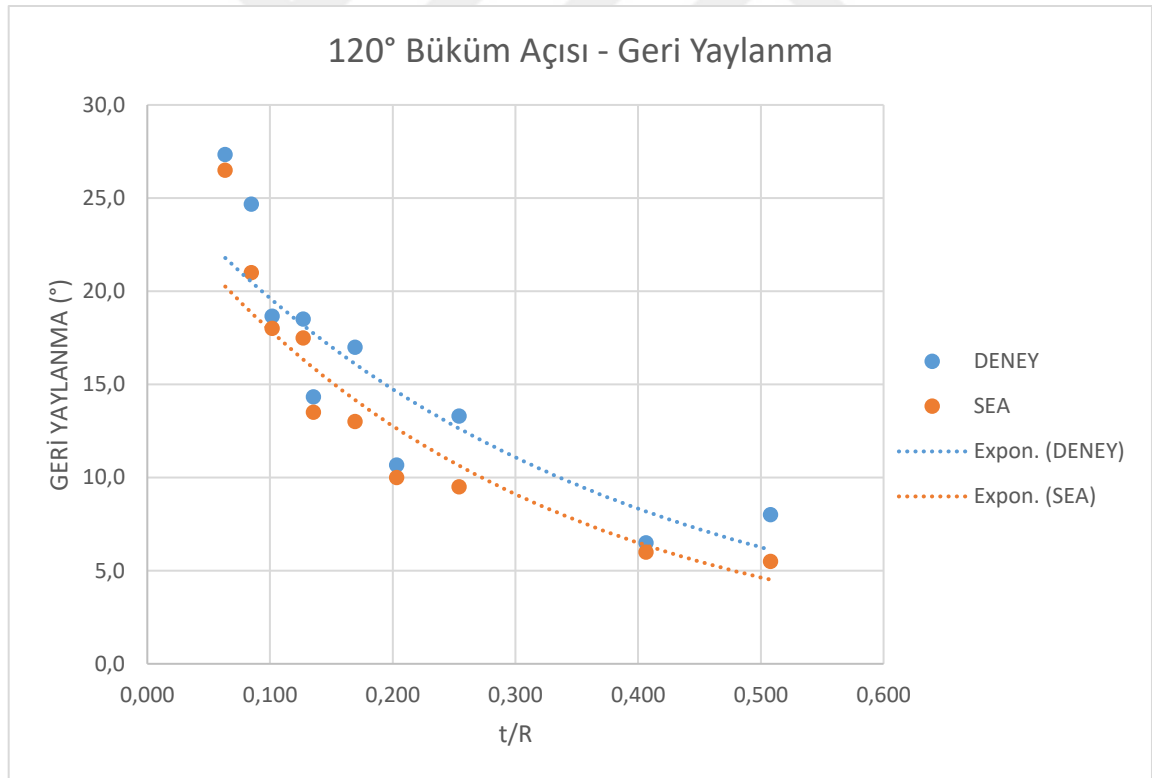
Malzeme Kalınlığı (mm)	Kalıp Büküm Yarıçapı (mm)	DENEY SONUÇLARI		SAE SONUÇLARI	
		90° Kalıpta Geri Yaylanma Açısı (°)	120° Kalıpta Geri Yaylanma Açısı (°)	90° Kalıptaki Ortalama Geri Yaylanma Açısı (°)	120° Kalıptaki Ortalama Geri Yaylanma Açısı (°)
0,635	2,5	5,0	13,5	7,0	12,0
	5	8,0	18,3	11,0	16,0
	7,5	17,5	24,7	18,0	21,0
	10	20,0	27,3	22,0	26,5
1,016	2,5	6,0	6,5	6,0	6,0
	5	9,0	10,7	10,0	10,0
	7,5	12,3	14,3	13,0	13,5
	10	15,0	18,7	17,5	18,0
1,27	2,5	2,0	8,0	5,5	5,5
	5	11,0	13,0	9,5	9,5
	7,5	13,7	17,0	12,0	13,0
	10	18,3	18,7	16,0	17,5

Elde edilen verilere göre AISI-301 paslanmaz çelik sac malzemelerinin hidropres form kalıplarında bükümlerinde oluşan geri yaylanma deney ve analiz sonuçları Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de görüldüğü gibi benzer trend izlemekte, t/R oranı azaldıkça geri esnemenin arttığı görülmüştür.

Bir diğer deyişle büküm radiusunu sabit tuttuğumuz koşulda, sac malzemenin kalınlığı arttıkça geri yaylanma miktarı artmaktadır.



Şekil 6.1. Deney ve analiz sonuçları t/R – Geri yaylanma karşılaştırması



Şekil 6.2.. Deney ve analiz sonuçları t/R – geri yaylanma karşılaştırması

AISI-301 çelik sac malzemenin sac kalınlığı ve büküm radyusu oranın 0,1'e yaklaştığı durumlarda ve geri yaylanma miktarının 20 derecelere kadar çıktığı görülmüştür.

En fazla geri yaylanma 0,635 mm kalınlıktaki sac malzemede ortaya çıkarken en düşük geri esneme miktarları 1,27 mm kalınlıktaki malzemede gözlenmiştir.

Daha kalın malzemelerde geri yaylanma miktarının azaldığı görülmüştür. Örneğin: 0,635 mm kalınlıkta, 90° kalıpta geri yaylanma değerleri daha yüksektir (5,0° ile 20,0° arasında). 1,27 mm kalınlıkta ise, geri yaylanma genellikle daha düşüktür (2,0° ile 18,3° arasında).

Kalıp büküm yarıçapı büyüdükçe (2,5 mm'den 10 mm'ye doğru), geri yaylanma miktarı artmaktadır. Bu durum, kalıp yarıçapı arttıkça malzeme deformasyonunun daha yumuşak bir şekilde gerçekleştiğini ve bu nedenle geri yaylanmanın arttığını göstermektedir.

Deney ve analize göre genel eğilim, t/R oranı arttıkça geri yaylanma açısı hem deneysel hem de SEA tahminlerinde sistematik olarak azalmaktadır. Bu, yüksek t/R oranlarının (ör. kalın malzemeler ve büyük büküm yarıçapları) elastik toparlanmayı azalttığını ve daha stabil şekillendirme sonuçları sağladığını gösterir.

Yapılmış olan benzer çalışmada, titanyum alaşımlarında (CP2 ve Ti6Al4V) geri esneme incelenmiş, kalınlık arttıkça geri esneme miktarının arttığı görülmüş, aynı trend gözlenmiştir [23].

Diğer bir çalışmada ise inconel-615 sac malzemesinde yine kalınlık ve büküm radyusu oranının azalmasıyla birlikte geri yaylanma miktarlarının arttığı görülmüştür [24].

Bu sonuçlara göre yüksek elastik modülüne sahip malzemelerin şekillendirilmesinde benzer geri yaylanma trendinin olduğu söylenebilir.

Minimum geri yaylanmaya sahip ürün çıktısı için, üretim sürecinde küçük büküm yarıçapları ve daha kalın malzemeler kullanılması tercih edilebilir.

AISI-301 sac malzemesi için Şekil 5.35'da gösterilen üstel eğrilerden geri yaylanma davranışını ifade eden matematiksel denklemler çıkartılabilir. Bu denklemler, meydana gelecek geri yaylanma tahminleri için kullanılabilir.

Parça tasarımlarında geri yaylanmayı minimize etmek için özellikle düşük t/R oranları tercih edilebilir. Mümkün olmadığı durumlarda ise malzemenin özelliklerine ve kalıp parametrelerine göre oluşacak geri yaylanmalar SEA modeli uygulanarak nden tahmin yapılabilir. Bu tahminler doğrultusunda kalıp yüzeyi üzerinde geri yaylanma miktarları kadar ofset verilerek kalıp yüzeyi geometrisi oluşturulabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Tolga D., Costas S., Recent Developments In Advanced Aircraft Aluminium Alloys, 2014 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.002>
- [2] Sun, C, and Ashfaq Adnan. *Mechanics of Aircraft Structures*. 3rd ed. Wiley, 2021
- [3] I. Karaağaç And A. Özdemir, "Investigation of the Effects of Hydroforming Method on Deep Drawability," 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Turkey, pp.1420-1430, 2009
- [4] M. Satyanarayana Gupta, D. Ramana Reddy, Design And Analysis Of Aircraft Sheet Metal For Spring Back Effect, *Materials Today: Proceedings*, Volume 4, Issue 8, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.171>
- [5] R. Muraca, J. Whittick (1972) *Materials Data Handbook Stainless Steel Type 301*, 2nd Edition
- [6] H. Nayır, "Sempozyum Bildirisi: Paslanmaz Çeliklerde Bölgesel Korozyon (Localised Corrosion On Stainless Steel)" 13. *Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, Nisan 2017, İzmir, Türkiye
- [7] Department of defense Handbook, Metallic materials and elements for aerospace vehicle structures, *MIL-HDBK-5J*, 31 January 2003
- [8] *Atlas of Stress-Strain Curves*, second edition, ASM International, 2002
- [9] T. Altan, E. Tekkaya, *Sheet Metal Forming Fundamentals*, ASM International, 2012
- [10] ASM Handbook, Volume 14B, *Metalworking: Sheet Forming*, 2006
- [11] Groover, M. P., *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems*, 4th ed., 2010

- [12] Civelek F. ve Özdemir A., “Sac metal malzemelerin şekillendirilebilirlik kriterlerinin değerlendirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 27(4): 1617-1631, 2024
- [13] D. Banabic, Sheet Metal Forming Processes, *Constitutive Modelling and Numerical Simulation*, Springer, 2010
- [14] T. Altan, E. Tekkaya, *Sheet Metal Forming Processes and Applications*, ASM International, 2012
- [15] L.H. Lang, Z.R. Wang, D.C. Kang, S.J. Yuan, S.H. Zhang, J. Danckert, K.B. Nielsen, “Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming”, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 151, Issues 1–3, 2004, Pages 165-177, ISSN 0924-0136, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.032>.
- [16] M. Koç. *Hydroforming for advanced manufacturing*, 1st ed. Woodhead Publishing Limited, Cambridge England, 2008
- [17] Bell, C., Corney, J., Zuelli, N. “A state of the art review of hydroforming technology”. *Int J Mater Form* 13, 789–828 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12289-019-01507-1>
- [18] <https://quintustechologies.com/knowledge-center/fluid-cell-type-qfc-0-7-x-1-8-800-1400-us/> (Accessed: Dec. 1, 2024)
- [19] Aydogan, C.S.; Hatipoglu, H.A.; Keles, O. Springback prediction of CP2 titanium sheets in hydroforming with membrane diaphragm process with finite element method. *MATEC Web Int. Conf. New Form. Technol. (ICNFT 2018)*. 2018
- [20] Z. Marciniak V.D, *Mechanics of Sheet Metal Forming*, 2002
- [21] L. Sayın, G. Basmacı, *International Journal of Technological Sciences* e-ISSN 1309-1220

- [22] S. Kılıç, F. Öztürk, S. Toros, *Makine Tasarım ve İmalat Dergisi*, Cilt 11, Sayı 1, Mayıs 2009
- [23] C.S. AYDOĞAN, “Ti Alaşımlarının Diyaframla Hidrolik Şekillendirilmesinde Geri Esneme Miktarlarının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Temmuz 2015
- [24] K. Beyazgül, “Inconel 625 (AMS 5599) Alaşımının Diyaframla Hidrolik Şekillendirilmesinde Geri Esneme Miktarlarının Sayısal Ve Deneysel İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Haziran 2019
- [25] Chowdhury, S. (2024). Springback trends with different process parameters and with the mechanical properties of three selected metals. <https://doi.org/10.31224/3810>
- [26] Mo, C.; Xu, Y.; Yuan, S. “Analysis of Thickness Variation in 2219 Aluminum Alloy 16. Ellipsoid Shell with Differential Thickness by Hydroforming”. *Metals* 2024, 14, 1140. <https://doi.org/10.3390/met14101140>
- [27] Movahedi, M.R., Gerdooei, M. “Analytical approach to investigate the effects of through-thickness stress on springback in bending of isotropic sheet metal”. *Int J Adv Manuf Technol* (2024). <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13626-4>
- [28] Sun, Z., Lang, L. “Effect of stress distribution on springback in hydroforming process.” *Int J Adv Manuf Technol* 93, 2773–2782 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0670-x>
- [29] Trzepieciński, T. “Recent Developments and Trends in Sheet Metal Forming”. *Metals* 2020, 10, 779. <https://doi.org/10.3390/met10060779>
- [30] CINAR, Zeki, et al. "Effect Of Springback On A6061 Sheet Metal Bending: a review". *Jurnal Kejuruteraan*, 2021, 33.1: 13-26.

- [31] Joseph, Crisbon Delfina, "Experimental Measurement and Finite Element Simulation of Springback in Stamping Aluminum Alloy Sheets for Auto-Body Panel Application" (2003). *Theses and Dissertations* 2146. <https://scholarsjunction.msstate.edu/td/2146>
- [32] Pham, Q. T., Song, J. H., Park, J. C., & Kim, Y. S. (2019). "Investigation of Springback Prediction for an Aluminum 7000 Sheet Subjected to Press Forming". In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 889, pp. 203–210). Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.889.203>
- [33] E8/E8M-13A, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, American Association State Highway and Transportation Officials Standard
- [34] *PAM-STAMP 2022 User Guide*, (2022). Accessed: Dec. 15, 2024. [Online]. Available: <https://myesi.esi-group.com/downloads/software-documentation/pam-stamp-2022.0-user-guide-zip>