

Diyaframla Hidrolik Şekillendirmede Paslanmaz AISI 301 Çeliklerin Geri Esneme Miktarlarının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi

Ertuğ EREN¹ , Mohammad RAFIGHI^{1*} 

¹Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma Makalesi
Başvuru: 25/03/2025
Düzeltilme: 06/07/2025
Kabul: 23/10/2025

Anahtar Kelimeler

AISI 301 Çelik
Hidroforming İşlemi
Geri Esneme
Sac Metal

Article Info

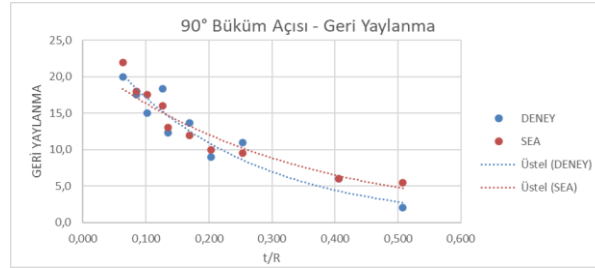
Research article
Received: 25/03/2025
Revision: 26/07/2025
Accepted: 23/10/2025

Keywords

AISI 301 Steel
Hydroforming Process
Sheet Metal
Springback

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada AISI-301 paslanmaz çelik sac malzemenin hidroforming işlemi sonrasındaki geri yaylanması incelenmiştir. Geri yaylanmayı etkileyen faktörler kalınlık, büküm açısı ve büküm yarıçapı girdi kabul edilmiştir. Hem deneylerde hem de sonlu eleman analizlerinde sac kalınlığı ve büküm yarıçapı oranının 0,1'e yaklaştığı durumlarda geri yaylanma miktarının 20 derecelere kadar çıktığı görülmüştür. / In this study, the springback behavior of AISI-301 stainless steel sheet material after hydroforming was investigated. Sheet thickness, bending angle, and bending radius were considered as input factors affecting springback. Both experimental results and finite element analyses showed that when the ratio of sheet thickness to bending radius approached 0.1, the amount of springback increased up to 20 degrees.



Şekil A: Deney ve Analiz sonuçları t/R – Geri Yaylanma karşılaştırması / Figure A: Test and Analysis results t/R – Springback comparison

Önemli noktalar (Highlights)

- Hidroforming işlemi / Hydroforming process
- Geri esneme / Springback
- AISI-301 Çelik / AISI-301 Steel
- Sac metal / Sheet metal

Amaç (Aim): Bu çalışmada, paslanmaz AISI-301 çelik sac malzemenin hidroforming ile şekillendirilmesi sonrasında meydana gelen geri yaylanma davranışının hem deneysel hem de analitik olarak incelenerek geri yaylanma miktarlarının tahmini ve bunları etkileyen optimum proses parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. / In this study, it was aimed to investigate the springback behavior that occurs after forming the AISI-301 stainless steel sheet material by hydroforming both experimentally and analytically, to estimate the amount of springback, and to determine the optimum process parameters.

Özgünlük (Originality): Bu çalışma, geri yaylanmanın incelenmesini yapılan önceki çalışmalardan farklı olarak AISI-301 paslanmaz sac malzemenin hidroforming yöntemiyle şekillendirmedeki geri yaylanma davranışını incelemektedir. / This study examines the springback behavior of AISI-301 stainless steel sheet formed by the hydroforming method, differing from previous studies that have investigated springback.

Bulgular (Results): Deneysel sonuçlar ile sonlu eleman analizleri birbirlerine yakın ve aynı trendi izlemiştir. Genel eğilim, t/R oranı arttıkça geri yaylanma açısı hem deneysel hem de sonlu eleman analizlerinde sistematik olarak azalmıştır. / The experimental results and the finite element analyses were close to each other and followed the same trend. The general tendency was that as the t/R ratio increased, the springback angle systematically decreased in both the experimental results and the finite element analyses.

Sonuç (Conclusion): Sonuçlar, malzeme özellikleriyle birlikte t/R oranının geri yaylanmayı etkilediğini ve geri yaylanmayı minimize etmek için özellikle yüksek t/R oranları tercih edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. / The results indicate that the t/R ratio, together with the material properties, affects springback, and that higher t/R ratios should be preferred in order to minimize springback.



Diyaframla Hidrolik Şekillendirmede Paslanmaz AISI 301 Çeliklerin Geri Esneme Miktarlarının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi

Ertuğ EREN¹ , Mohammad RAFIGHI^{1*}

¹Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma Makalesi
Başvuru: 25/03/2025
Düzeltilme: 06/07/2025
Kabul: 23/10/2025

Anahtar Kelimeler

AISI 301 Çelik
Hidroforming İşlemi
Geri Esnemet
Sac Metal

Öz

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 yarıçapını 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 yarıçapı oranının 0,1'e yaklaştığı durumlarda geri yaylanma miktarının 20 derecelere kadar çıktığı hesaplanmıştır.

Numerical and Experimental Investigation of Springback of AISI 301 Steels by Hydroforming with Membrane Diaphragm

Article Info

Research article
Received: 25/03/2025
Revision: 26/07/2025
Accepted: 23/10/2025

Keywords

AISI 301 Steel
Hydroforming Process
Sheet Metal
Springback

Abstract

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 metal 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 result in undesirable deviations in the part. 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 radii 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, finite element analyses of the forming process with these variables were conducted using PAM-STAMP. Both FEA and experiments have shown that for AISI 301 stainless steel sheet material, when the sheet thickness-to-bending radius ratio reaches 0.1, springback can reach up to 20 degrees, with activation energies of Mo and Fe at 25.62 kJ/mol and 19.51 kJ/mol, respectively.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

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].

Korozyon ve yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle ise paslanmaz çelik alaşımları sıklıkla tercih edilmektedir. Bu alaşımlardan biri de AISI 301 paslanmaz çeliğidir.

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 [3].

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, yüksek korozyon direnci sebebiyle ise havalandırma ve iklimlendirme, güç santralleri, petro-kimya tesisleri, gıda endüstrisi, kâğıt hamuru endüstrisi, su hatları, denizcilik endüstrisi gibi birçok sektörde kullanılmaktadır [3, 4].

Bu malzeme ısıtılma ile sertleştirilemez, ancak soğuk şekillendirme yoluyla hızla sertleşir. Oda sıcaklığında 275 ksi (1896 Mpa) gibi yüksek çekme mukavemetlerine ulaşmak mümkündür. Genellikle tavlanmış veya soğuk haddelenmiş halde kullanılır [3]. Sac metal olarak şekillendirme süreçleri genellikle çok az veya hiç hurda üretmez, ayrıca genellikle presin bir veya birkaç strokunda nihai parça geometrisini hızlı bir şekilde üretir [5].

Günümüzde sac metallerin şekillendirme yöntemleri konusunda oldukça çalışma bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi de flexform olarak da adlandırılan hidrolik şekillendirmedir. Özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde birçok avantajı olması sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Hidrolik şekillendirme karmaşık şekiller ve düzensiz konturlu parçaların kalıp

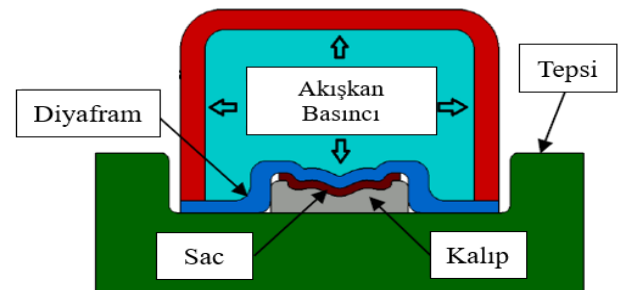
üzerinde üretilmesi için ideal yöntemdir. Düşük kalıp maliyetleri ve kısa kurulum süresi gibi birçok avantaj sunması sebebiyle tercih edilmektedir [6].

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, genellikle sac hidroforming ve tube hidroforming olarak iki ana kategoriye ayrılır [7, 8].

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 [9].

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 [10].

Hidroforming proseslerinde kullanılan form bloklar genellikle geleneksel bir kalıptaki zimbaya benzese de dişi kalıp şeklinde de olabilir. Kauçuk, hidrolik sıvıya benzer bir etki yaratarak, şekillendirme bloğunun etrafında preslenirken iş 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 1. Diyaframla hidroform şekillendirme (Hydroforming with diaphragm) [11]

Bu proses şu şekilde açıklanabilir:

Şekillendirilecek metal iş parçası, hazırlanmış kalıbın yüzeyine yerleştirilir. Bu kalıp, nihai ürünün geometrisini belirler. 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 başladığında, membranın 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.

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.

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 [12, 13].

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.

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.

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 [14].

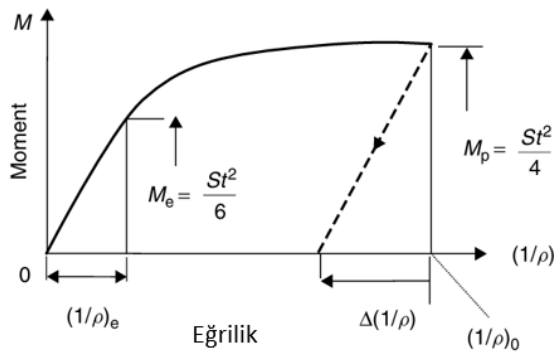
Son yıllarda, sahip oldukları düşük ağırlık-mukavemet oranları nedeniyle otomobil bileşenlerinde yüksek mukavemetli çelik ve alüminyumun kullanılma eğilimi yaygınlaşmıştır. Bunun sonucu olarak, geri esneme sapmaları, daha yüksek akma dayanımı-modül oranına sahip bu

malzemeler nedeniyle daha şiddetli hale gelmiştir [10].

Tam plastik momente kadar bükülmüş bir sac için, boşaltma eğrisi, şekil 2’de gösterildiği gibi elastik yükleme çizgisine paralel olacaktır. Benzer üçgenlere dikkat edildiğinde, momentte -Mp’lık bir değişim için şu sonucu görebiliriz [15]:

$$\frac{\Delta\left(\frac{1}{\rho}\right)}{\left(\frac{1}{\rho}\right)_e} = \frac{\Delta M}{M_e} = \frac{-M_p}{M_e} \quad (1.1)$$

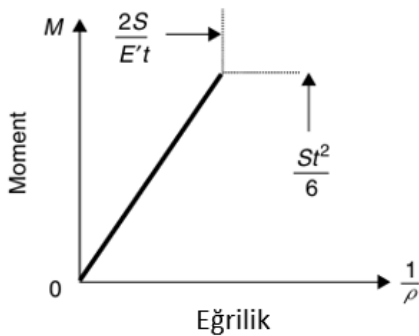
Burada M_p plastik moment, M_e elastik moment, $1/\rho$ ise eğrilik ifade etmektedir.



Şekil 2. Moment-eğrilik diyagramı(Moment-curvature diagram)

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

$$\frac{M_p}{M_e} = \frac{3}{2} \quad (1.2)$$



Şekil 3. Elastik bükmede moment eğrilik diyagramı(Moment curvature diagram in elastic bending)

Burada momentteki eğim

$$\left(\frac{1}{\rho}\right)_e = \frac{2S}{E't} \quad (1.3)$$

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

Yukarıdaki denklem 1.2 ile birleştirilerek:

$$\Delta\left(\frac{1}{\rho}\right) = -\frac{3}{2}\Delta\left(\frac{1}{\rho}\right)_e = -\frac{S}{E't} \quad (1.4)$$

Eğer saçtaki yük kaldırılırsa eğrilikteki oransal değişim şu şekilde olur:

$$\frac{\Delta(1/\rho)}{(1/\rho)_0} = -3\frac{S}{E't}\theta \quad (1.5)$$

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:

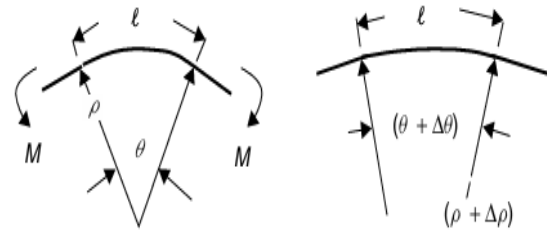
$$l = \rho\theta \quad (1.6)$$

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

$$\theta = l\frac{1}{\rho} \quad (1.7)$$

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

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{\Delta(1/\rho)}{\frac{1}{\rho}} \quad (1.8)$$



Şekil 4. Gerilme uygulanmaksızın bükülmüş bir sacın yükün kaldırılması (Lifting the load on a bent hair without applying tension)

Eşitlik 1.8’den büküm açısındaki değişim şu şekilde bulunur;

$$\Delta\theta \approx -3\frac{S}{E't}\theta \quad (1.9)$$

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

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 [11].

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 [16].

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 [17].

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 [18].

Beyazgül Inconel 625 (AMS 5599) alaşımının diyaframla hidrolik şekillendirilmesinde geri esneme miktarlarının sayısal ve deneysel incelemiş t/R azaldıkça geri esnemenin arttığını belirtmiştir [19].

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 [20].

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 [21].

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 [22].

Trzepieciniski 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 [23].

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 [24].

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 radyusunun 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 belirtmiştir [25].

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 [26].

Bu çalışmada, paslanmaz AISI 301 çelik sac malzemenin farklı büküm yarıçapları ve büküm açılarında hidrolik şekillendirilmesi sırasında meydana gelen geri yaylanma davranışı hem deneysel hem analitik olarak incelendi. Ayrıca, deneysel ve sayısal analizler yardımıyla geri yaylanmanın öngörülmesi ve kontrol edilmesine yönelik stratejiler geliştirilmesi hedeflendi. Analitik yöntem olarak Pam-Stamp sonlu eleman analiz programı tercih edildi. Bu bağlamda, iki farklı büküm açısına ve dört farklı büküm radyusuna 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 amaçlandı. Bu çıktıların sonucunda tasarlanacak kalıplardaki geri yaylanma

miktarlarının daha doğru tahmin edilmesi ve daha doğru parça üretiminin sağlanması planlandı.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Deneyde Kullanılan Malzeme ve Özellikleri (Materials Used in the Experiment and Their Properties)

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 kestirildi. Çekme testi için 4 adet numune, şekillendirme deneyleri için toplam 48 adet parça kestirildi.

2.2. Çekme Testi (Tensile Test)

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 [27].

Deneylerde kullanılacak malzemenin plastik bölgedeki davranışının tespiti için ASTM E8'in belirttiği ölçülerde test numunesi kestirilip ASTM E8'e göre çekme testi yapıldı [27].

2.3. Deney Kalıbı Tasarımı (Experimental Pattern Design)

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 edildi. Kalıp üzerindeki 2 mm, 5 mm, 7 mm ve 10 mm büküm radiusu ile 90° ve 120° büküm açıları deney için kullanılmıştır.

2.4 Test Numunesi (Test Sample)

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

Her bir numune kalıba 2 adet pinle sabitlenecek şekilde hazırlandı.

2.5 Deney (Experiment)

Büküm için hazırlanan numuneler kalıp üzerine planlanan büküm radiuslarına ve açılara konumlanacak şekilde pinlerle sabitlenmiştir. Kalıp üzerinde aynı anda birçok parçayı konumlandırabilmemiz sebebiyle ve yeterince numune kestirildiği için deneyler full scale yapıldı.

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. Diyaframı basınçlandırma için yağ kullanılmaktadır.

Tezgâh kademeli olarak maksimum 140 Mpa basınca ulaşabilmektedir.

Deney kapsamında numuneler maksimum 650 bar ile şekillendirilmiştir.

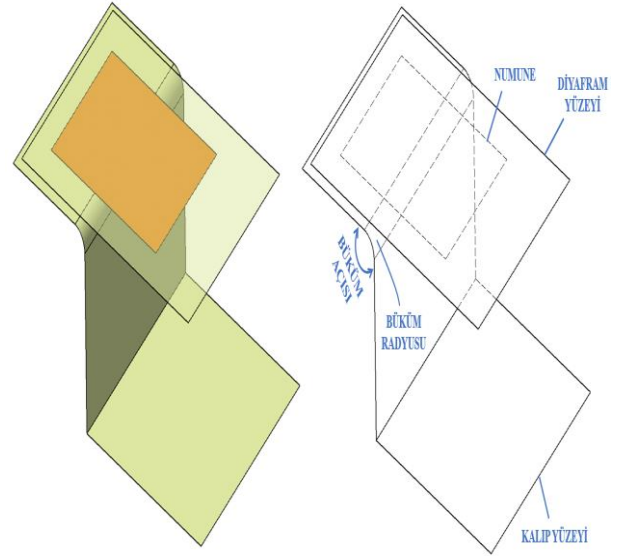
2.6 Ölçüm (Measurement)

Form işlemi sonrası parçaların açıları Mitutoyo 187-907 marka açıölçerle ölçülüp kaydedildi.

3. SAYISAL YÖNTEM (NUMERICAL METHOD)

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

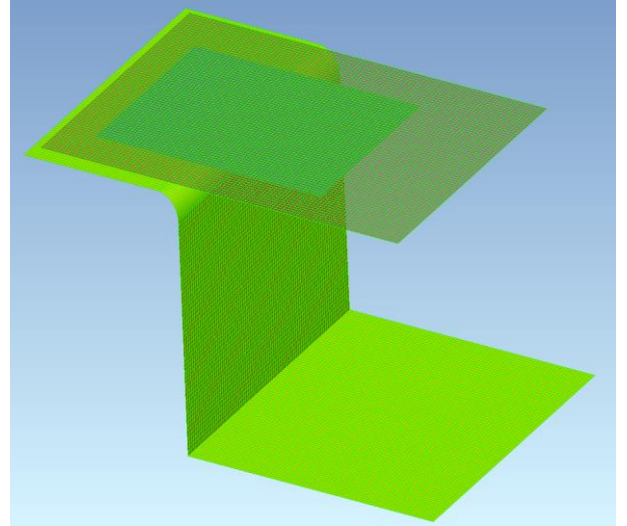
Analiz süresini kısaltmak için, farklı parametrelerdeki numune ve kalıp yüzeyleri için bütün bir analiz yapmak yerine, tek numuneyi kapsayacak şekilde modelleme yapılmıştır.



Şekil 5. Analiz için tasarlanan yüzeyler (Surfaces designed for analysis)

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 6. Mesh ağı (Mesh network)

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

hesaplama da 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 radius üzerinde kaymasını doğru bir şekilde temsil etmek için, sac elemanlarının boyutu, o radius 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.

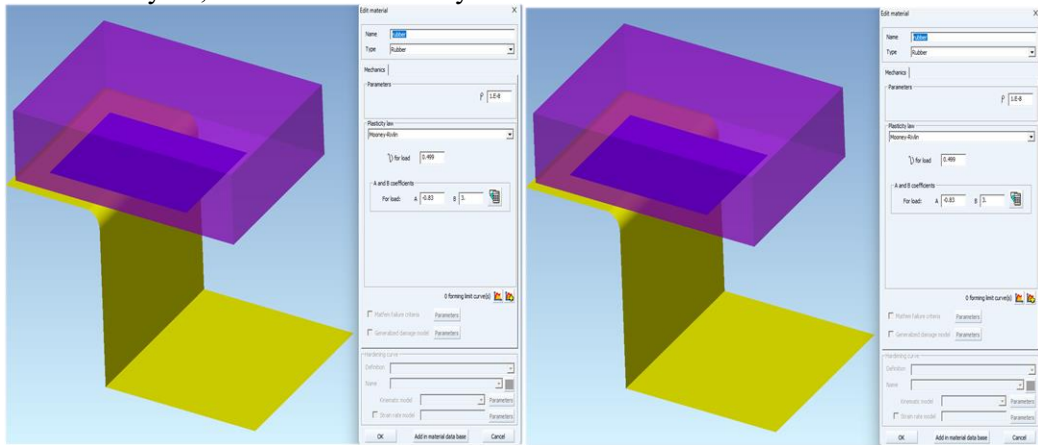
Eğer geri yaylanma hesabı yapılması gerekiyorsa, sac elemanlarının boyutu, sacın nötr lifinde kayma

radyüsünden geçtiği sırada benimseyeceği eğrilik yarıçapının %25'inden daha küçük olmalıdır. Bu, radius eğrilik yarıçapı ile sac kalınlığının yarısının toplamının %25'ini ifade eder [28].

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

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 [11].

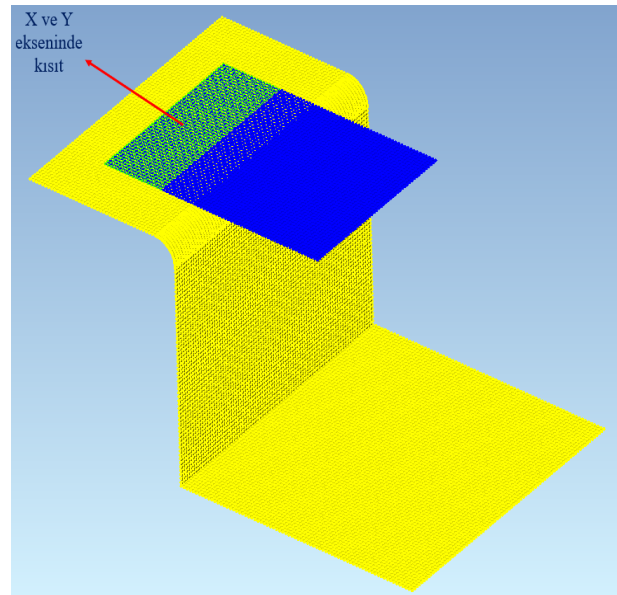
Kauçuk 40 mm kalınlığında 5 katmandan oluşacak şekilde modellendi.



Şekil 7. Diyaframın PAM-STAMP ortamında modellenmesi (Modeling the diaphragm in the PAM-STAMP environment)

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

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



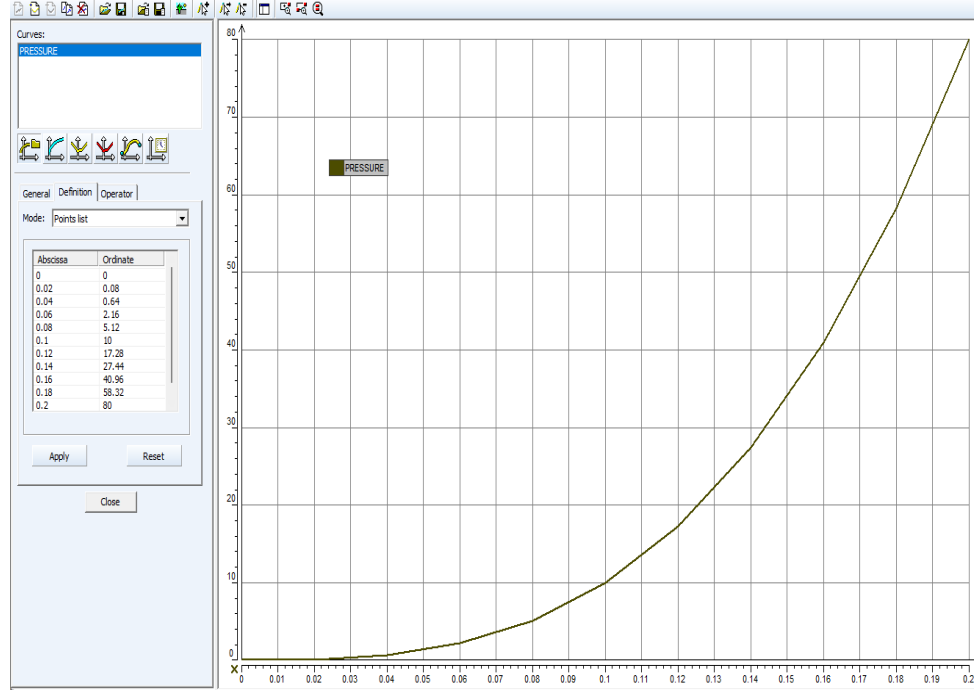
Şekil 8. İş parçasının sınır koşulları (Boundary conditions of the workpiece)

Kalıbın her ekseninde hareketi kısıtlandı.

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

Basınç girdisi kauçuğun üst yüzeyinden -Z yönünde, zaman-basınç eğrisi ve grafiği 0,02

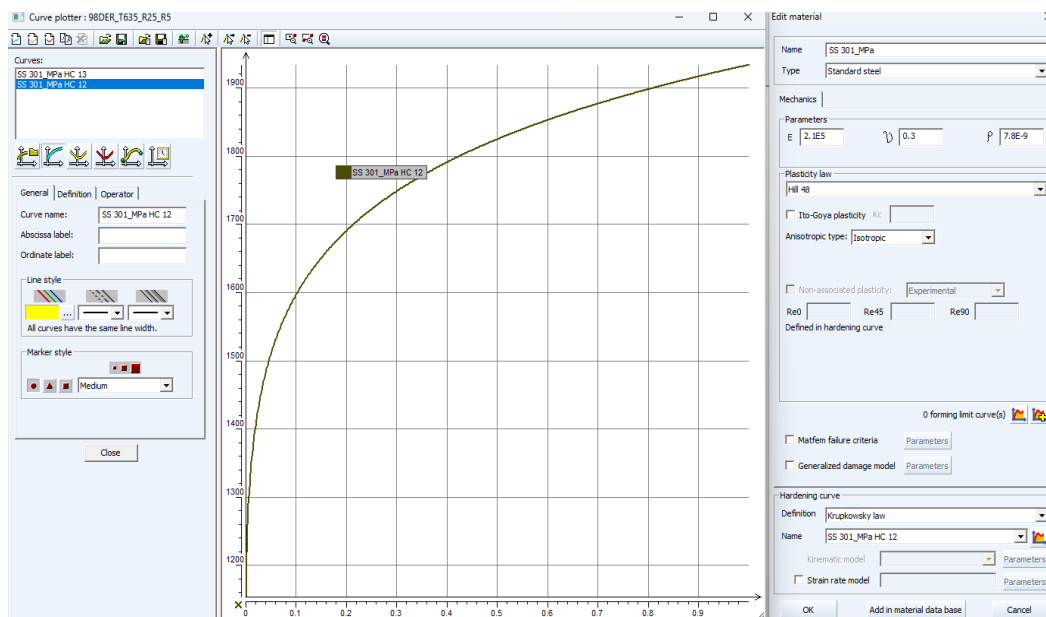
saniyelik bir zaman diliminde 40 adımdan oluşturulmuştur. Yani analizde basınç 0,2 saniyede 80 Mpa'a kadar çıkacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 9. Zaman-basınç eğrisi ve grafiği (Time-pressure curve and graph)

İş parçasının malzeme kartının oluşturulmasında bölüm 4.1'de bahsedilen çekme testinden sağlanan verilerden yararlanılmıştır.

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

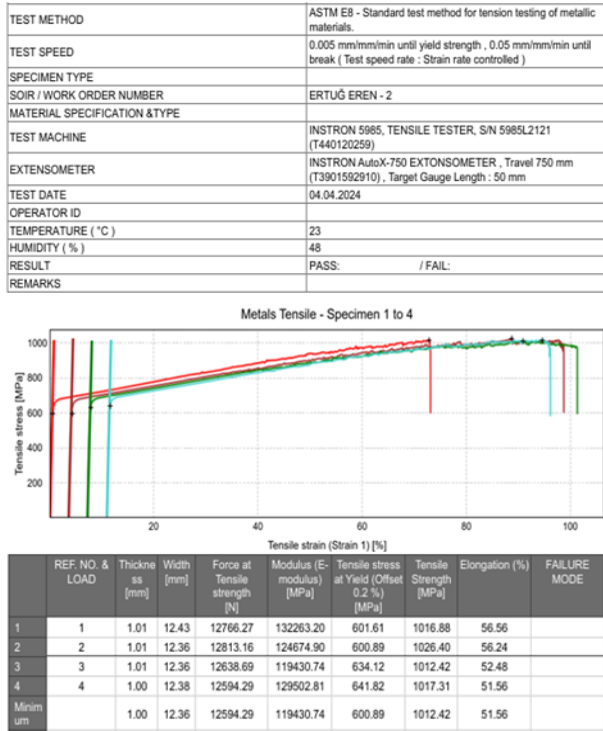


Şekil 10. AISI 301 çeliğe ait parametrelerin girilmesi (Entering parameters for AISI 301 steel)

4. BULGULAR (FINDINGS)

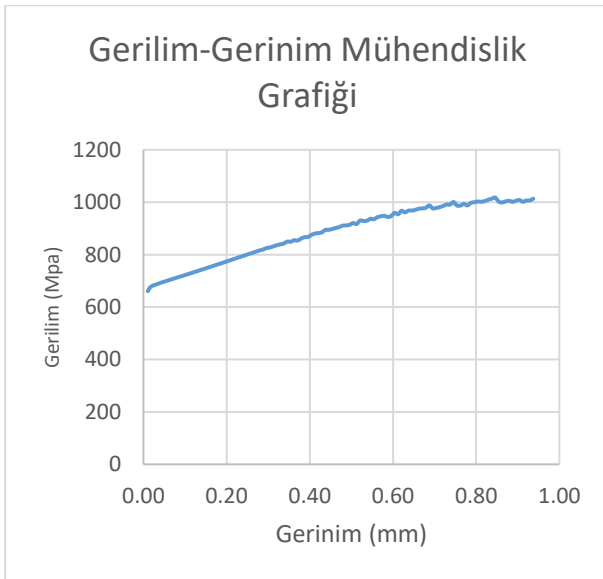
4.1. Çekme Testi Sonuçları (Tensile Test Results)

Çekme testi sonuçları Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 11. Çekme testi sonuçları (Tensile test results)

Çekme testleri sonucunda elde edilen kuvvet-uzama değerleri numunenin ilk boy ve kesit alanlarına bölünerek mühendislik gerilim-gerinim grafikleri elde edildi [18].



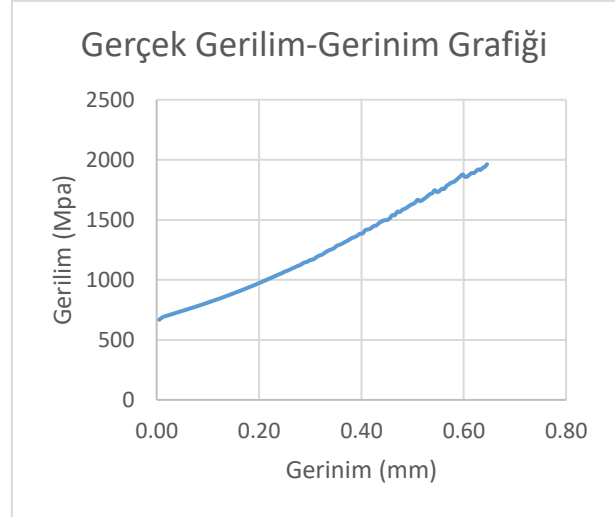
Şekil 12. AISI 301 çelik çekmedeki mühendislik gerilim-gerinim grafiği (Engineering stress-strain graph of AISI 301 steel in tension)

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 edildi [18].

$$\varepsilon_g = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (4.1)$$

$$\sigma_g = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (4.2)$$

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



Şekil 13. AISI 301 çelik çekmedeki gerçek gerilim-gerinim grafiği (True stress-strain graph in tension of AISI 301 steel)

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:

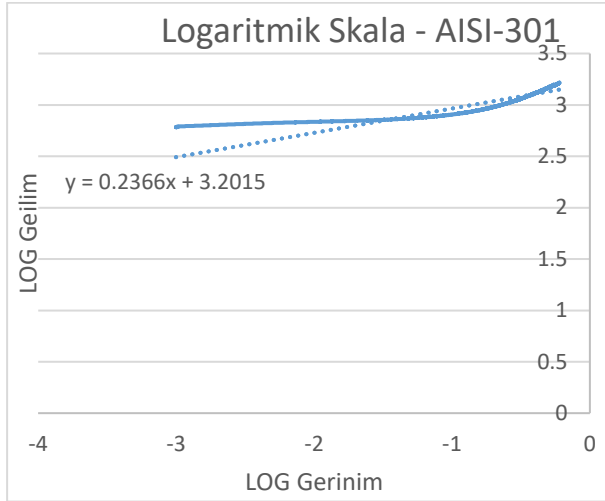
$$\sigma_g = K \times \varepsilon^n \quad (4.3)$$

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 4.3’e göre Holloman bağıntısının logaritması alındığında bir doğru denklemi olan eşitlik 4.4 elde edilir.

$$\ln \sigma_g = \ln K + n \ln \varepsilon \quad (4.4)$$



Şekil 13. AISI 301 çelik çekmedeki gerçek gerilme-gerinim grafiği (True stress-strain graph in tension of AISI 301 steel)

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:

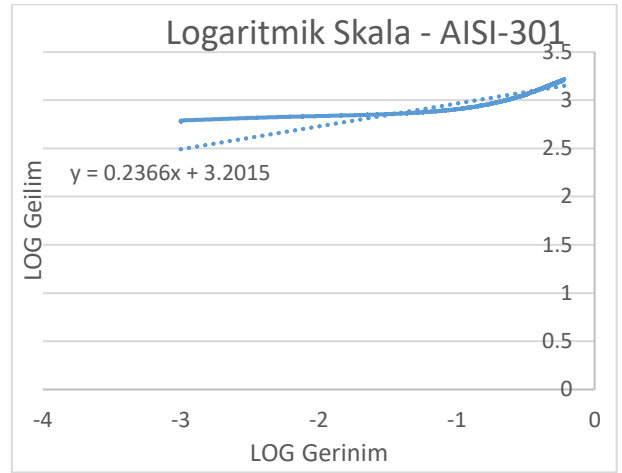
$$\sigma_g = K \times \varepsilon^n \quad (4.5)$$

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 Hollomon bağıntısının logaritması alındığında bir doğru denklemi olan eşitlik 5.4 elde edilir.

$$\ln \sigma_g = \ln K + n \ln \varepsilon \quad (4.6)$$



Şekil 14. Logaritmik skalada çekme diyagramı (Tensile diagram on logarithmic scale)

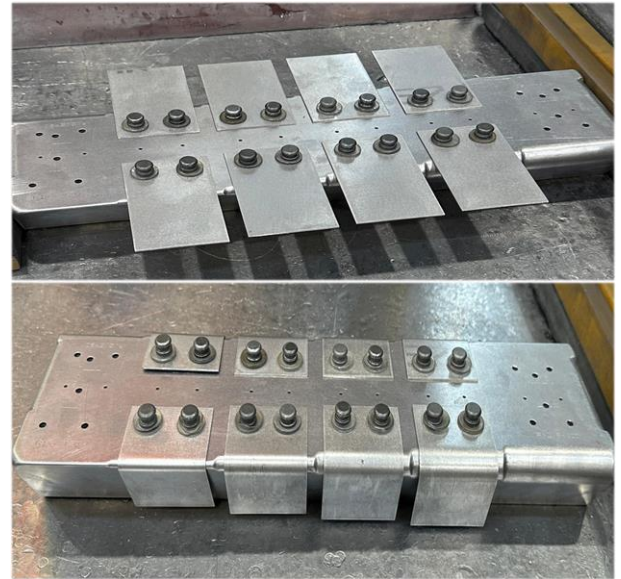
AISI 301 çelik malzemesi için yapılan çekme testleri sonucunda elde edilen grafiklerin logaritmik değerleri alınıp eğimleri bulunursa;

n: 0,236

K: 1594,4 MPa

4.2 Deney Sonuçları (Experimental Results)

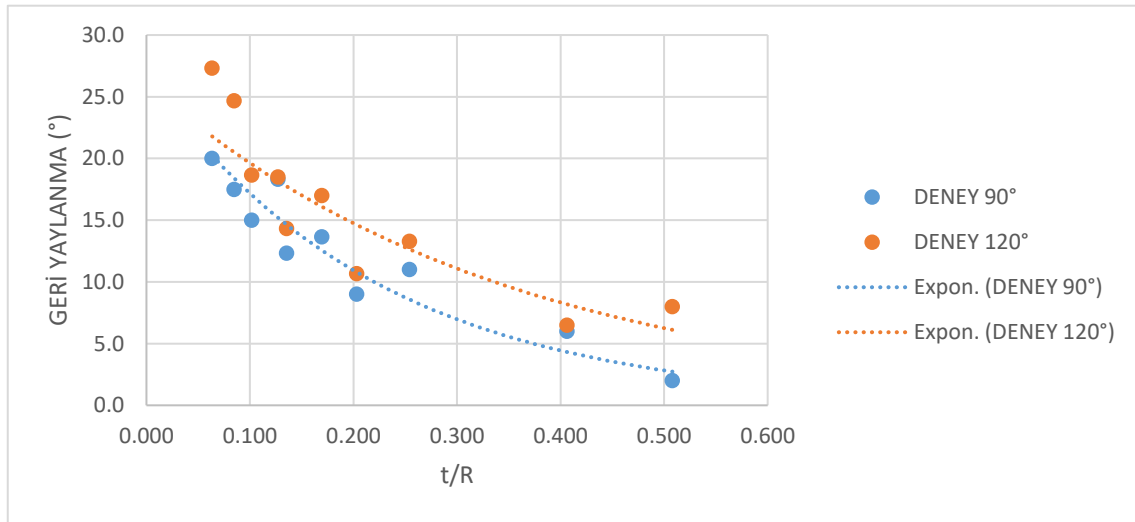
Basım sonrası kalıp üzerindeki iş parçalarının görüntüsü Şekil 15'de verilmiştir. AISI 301 çelik malzemesi için 2,5, 5, 7,5 ve 10 mm büküm radiusunda, 90 ° ve 120 ° kalıp açılarında yapılan deneylerden sonuçlar elde edildi. Açılölçer ile ölçülen iş parçaların açıları ve ortalama geri yaylanmalar Tablo 1'de listelendi.



Şekil 15. Form işlemi öncesi ve sonrası numuneler (Samples before and after the form process)

Tablo 1. Ölçüm sonuçları (Measurement results)

NUMUNE KALINLIĞI (mm)	0,635				1,016				1,270			
BÜKÜM RADIUSU (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 16.** AISI-301 çeliğin t/R cinsinden geri yaylanmaları (Springback of AISI-301 steel in t/R)

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°) görülmüştür. 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 16 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;

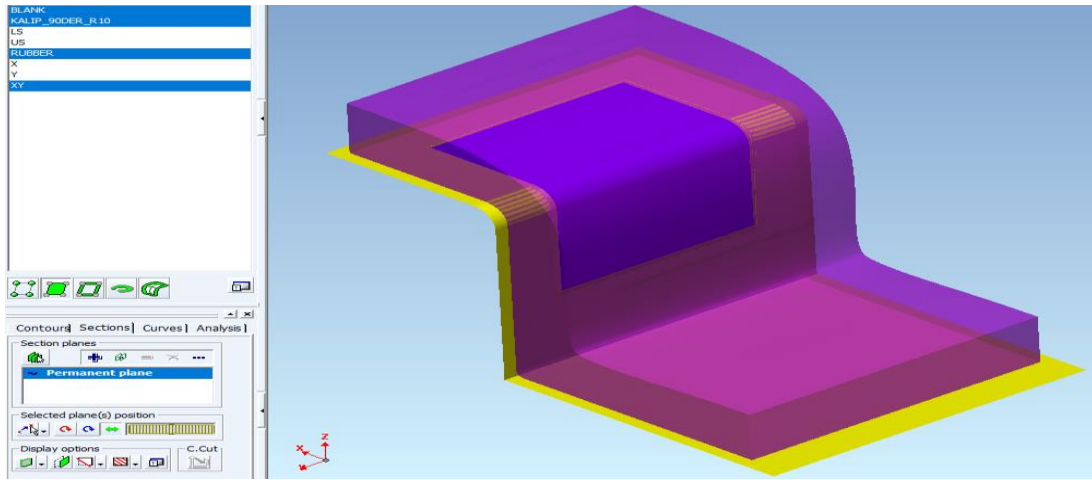
Büküm yarıçapı 90° olan deney için $R^2 = 0,891$

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.

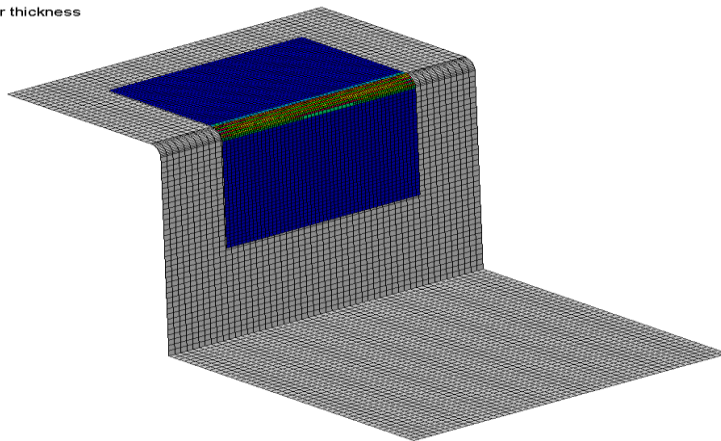
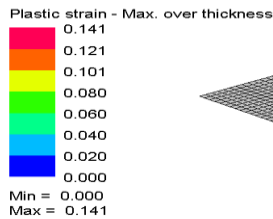
4.3. Analiz Sonuçları (Analysis Results)



Şekil 17. Lastik-diyafram ile form sonrası görüntüsü(Post-form image with rubber-diaphragm)

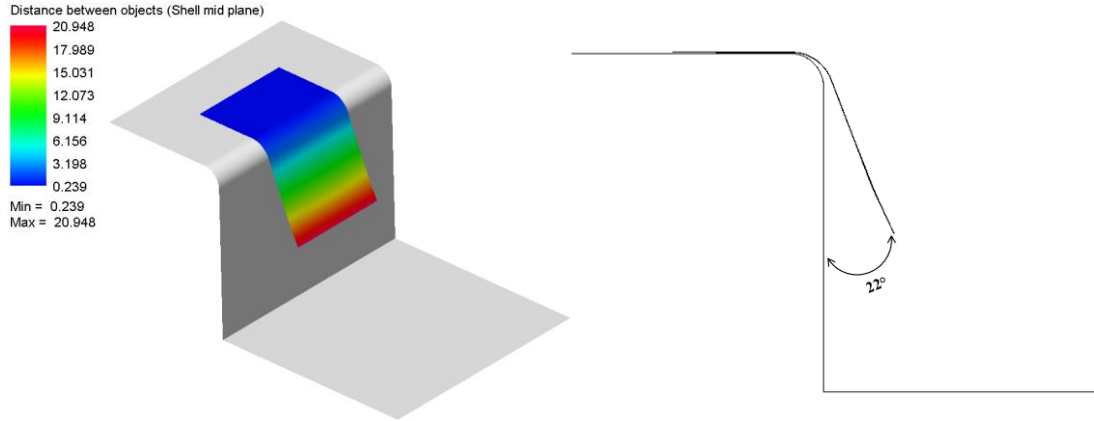
Form işlemi sonrası plastik gerinimleri gösteren modülde kabuk elemanın üst, zar ve alt lifleri arasında maksimum plastik deformasyon dağılımı Şekil 18'de görülmektedir. Form verildikten sonra

numuneler üzerindeki plastik gerinimlerin büküm yerinde düzgün dağılıma sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 18. Analizde şekillendirme sonucunda numune üstündeki gerinim (Strain on the sample as a result of shaping in the analysis)

Örnek olarak 90° büküm açısına sahip ve 10 mm büküm radyuslu kalıptaki analiz sonuçları Şekil 19'da gösterilmiştir.



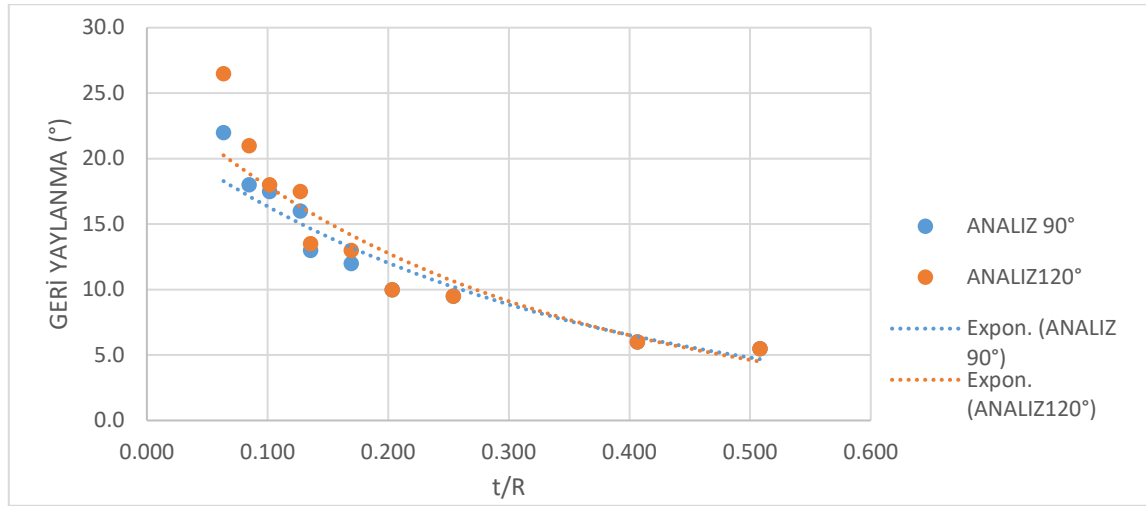
Şekil 19. Numune kalınlığı 0,635 mm için geri yaylanma miktarları (Springback amounts for sample thickness 0.635 mm)

Sonlu eleman analizi sonuçları Tablo 2’de listelenmiştir.

Tablo 2. SAE sonucu geri yaylanma açıları (SAE springback angles)

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 20. Analiz sonucu t/R – geri yaylanma (Analysis result t/R – springback)

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

Deney sonuçları ve analiz sonuçları Tablo 3'de gösterilmiştir.

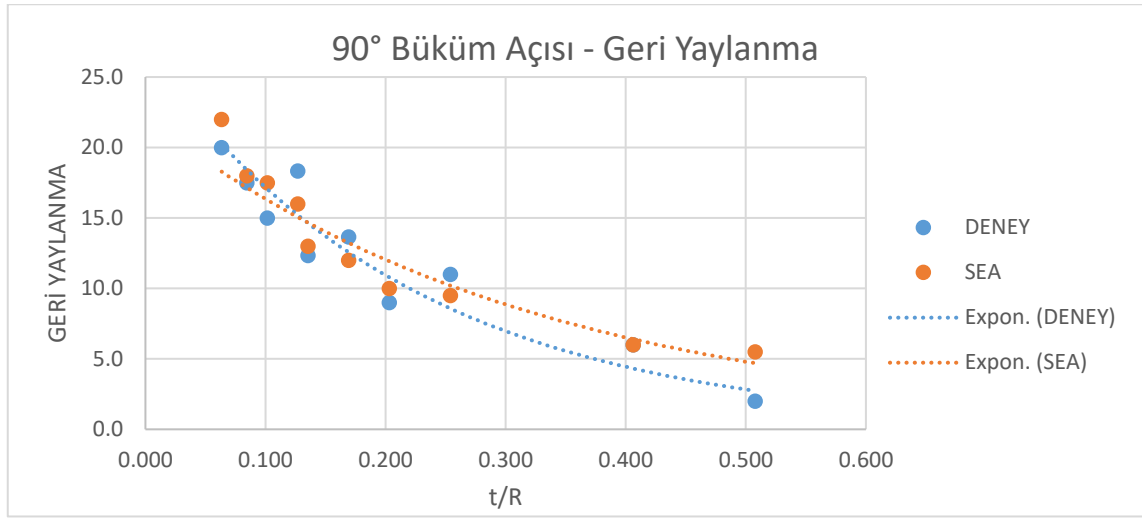
Tablo 3. SEA ve deney sonuçları (SEA and experimental results)

Malzeme Kalınlığı (mm)	Kalıp Büküm Yarıçapı (mm)	DENEY SONUÇLARI		SAE SONUÇLARI		Deney-SEA Fark (°)	
		90° Kalıpta Geri Yaylanma Açısı (°)	120° Kalıpta Geri Yaylanma Açısı (°)	90° Kalıptaki Ortalama Geri Yaylanma Açısı (°)	120° Kalıptaki Ortalama Geri Yaylanma Açısı (°)	90° Büküm Açısında	120° Büküm Açısında
0,635	2,5	5	13,5	7	12	-2,0	1,5
	5	8	18,3	11	16	-3,0	2,3
	7,5	17,5	24,7	18	21	-0,5	3,7
	10	20	27,3	22	26,5	-2,0	0,8
1,016	2,5	6	6,5	6	6	0,0	0,5
	5	9	10,7	10	10	-1,0	0,7
	7,5	12,3	14,3	13	13,5	-0,7	0,8
	10	15	18,7	17,5	18	-2,5	0,7
1,27	2,5	2	8	5,5	5,5	-3,5	2,5
	5	11	13	9,5	9,5	1,5	3,5
	7,5	13,7	17	12	13	1,7	4,0
	10	18,3	18,7	16	17,5	2,3	1,2

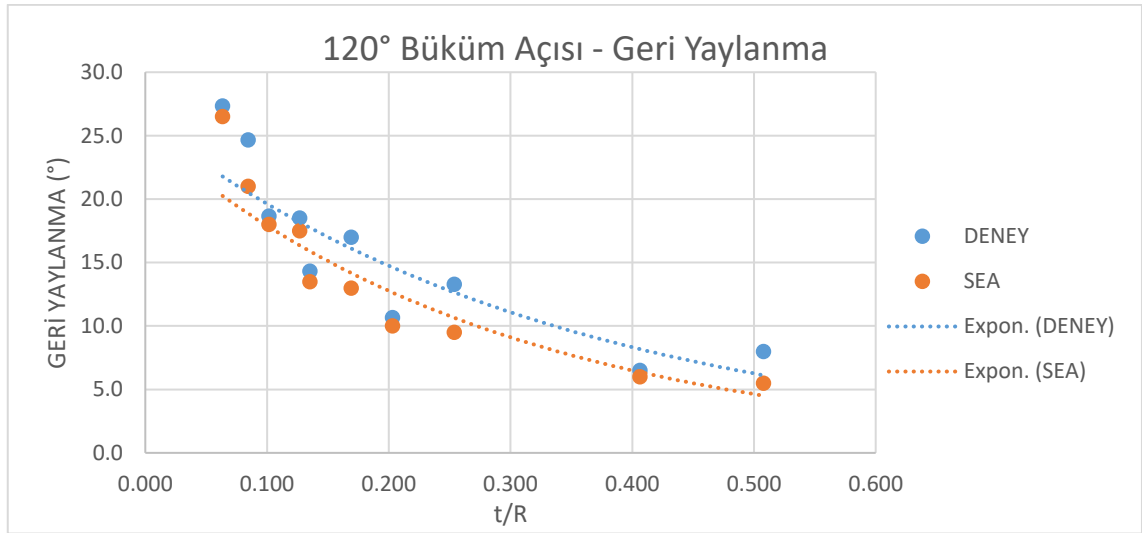
Deney ve sayısal geri yaylanma sonuçları arasındaki farkın, diyaframla şekillendirme sırasında parçaların şekillendirme hızındaki uyumsuzluk ile sürtünme ve basınç farklılıklarından kaynaklanabileceği varsayılmıştır.

Deney ve SEA Şekil 21 ve Şekil 22'de görüldüğü gibi benzer trend izlemekte, t/R oranı azaldıkça geri esnemenin arttığı görülmüştür.

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



Şekil 21. Deney ve analiz sonuçları t/R – Geri Yaylanma karşılaştırması (Experiment and analysis results t/R – Springback comparison)



Şekil 22. Deney ve analiz sonuçları t/R – Geri Yaylanma karşılaştırması (Experiment and analysis results t/R – Springback comparison)

Malzemenin sac kalınlığı ve büküm yarıçapı oranının 0,1'e yaklaştığı durumlarda ise 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 gözlemlendi.

Daha kalın malzemelerde geri yaylanma miktarının azaldığı görüldü. 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 gözlemlendi [11].

Diğer bir çalışmada ise inconel-615 sac malzemesinde yine kalınlık ve büküm yarıçapı

oranın azalmasıyla birlikte geri yaylanma miktarlarının arttığı görülmüştür [19].

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

5. SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışma kapsamında AISI 301 paslanmaz çelik sac malzemenin diyaframla şekillendirilmesinde geri yaylanma davranışı sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu yönde yapılmış çalışmalardan elde edilen bilgiler doğrultusunda çalışmada değişkenler olarak sac kalınlığı, kalıptaki büküm radyusu ve büküm açısı değerleri ele alınmıştır.

Sonlu eleman analizlerinde gerekli ve uygun girdiler tasarlanmış ve PAM-STAMP programında kullanılmıştır.

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 20’de gösterilen üstel eğrilerden geri yaylanma davranışını ifade eden matematiksel denklemler çıkartılabilir. Bu denklemler, farklı kalınlıklar ve açılarda meydana gelecek geri yaylanma tahminleri için kullanılabilir.

Çalışma, parça üzerindeki geri yaylanmayı minimize etmek için düşük t/R oranları tercih edilmesi gerektiğini, bunun mümkün olmadığı durumlarda ise malzemenin ve kalıp özelliklerine göre meydana gelecek geri yaylanmaların SEA modeli uygulanarak tahmin yapılabileceğini göstermiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde değerli katkıları ve rehberliği ile bana yol gösteren danışmanım Doç. Dr. Muhammed ARAS’a (Mohammad Rafiqhi) sonsuz teşekkür ederim.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

Bu makalenin yazarı, çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul onayı ve/veya yasal özel izin gerektirmediğini beyan eder.

The author of this article declares that the materials and methods used in their work do not require ethics committee approval and/or legal special permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Ertuğ EREN: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results, and performed the writing process.

Mohammad Rafiqhi: Çalışmanın tamamını yönetmiş, deney düzeneğini oluşturmuş ve makalenin nihai yazımında destek olmuştur.

He supervised the entire study, designed the experimental setup, and assisted with the final writing of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [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] R.Muraca, J.Whittick (1972) Materials Data Handbook Stainless Steel Type 301, 2nd Edition
- [4] Nayir, Hakan. (2023). Sempozyum Bildirisi: Paslanmaz Çeliklerde Bölgesel Korozyon (Localised Corrosion On Stainless Steel).
- [5] T. Altan, E. Tekkaya, Sheet Metal Forming Fundamentals, 2012
- [6] Karaağaç, İ., & Özdemir, A. Sıvı basıncı ile sac şekillendirme (Sbş) yönteminin derin çekilebilirlik üzerine etkilerinin incelenmesi the investigation of sheet hydroforming process effect on deep drawability.
- [7] Groover, M. P., Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4th ed., 2010
- [8] 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>.
- [9] Civelek F. ve Özdemir A., “Sac metal malzemelerin şekillendirilebilirlik kriterlerinin değerlendirilmesi”, Politeknik Dergisi, 27(4): 1617-1631, 2024

- [10] Koç M (2008) Hydroforming for advanced manufacturing, 1st edn. Woodhead Publishing Limited, Cambridge England
- [11] Aydoğan, C.S.; Hatipoğlu, 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
- [12] 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>
- [13] Atlas of Stress-Strain Curves, second edition, ASM International, 2002
- [14] ASM Handbook, Volume 14B, Metalworking: Sheet Forming, 2006
- [15] Z. Marciniak V.D, Mechanics of Sheet Metal Forming, 2002
- [16] L. Sayın, G. Basmacı, International Journal of Technological Sciences e-ISSN 1309-1220
- [17] S.Kılıç, F. Öztürk, S. Toros, Makine Tasarım ve İmalat Dergisi, Cilt 11, Sayı 1, Mayıs 2009
- [18] C.S. AYDOĞAN, Ti Alaşımlarının Diyaframla Hidrolik Şekillendirilmesinde Geri Esneme Miktarlarının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Temmuz 2015
- [19] K. Beyazgül, Inconel 625 (AMS 5599) Alaşımının Diyaframla Hidrolik Şekillendirilmesinde Geri Esneme Miktarlarının Sayısal Ve Deneysel İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Haziran 2019
- [20] 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>
- [21] 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>
- [22] 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>
- [23] Trzepieciński, T. Recent Developments and Trends in Sheet Metal Forming. Metals 2020, 10, 779. <https://doi.org/10.3390/met10060779>
- [24] CINAR, Zeki, et al. Effect Of Springback On A6061 Sheet Metal Bending: a review. Jurnal Kejuruteraan, 2021, 33.1: 13-26.
- [25] Joseph, Crisbon Delfina, "Experimental Measurement and Finite Element Simulation of Springback in Stamping Aluminum Alloy Sheets for Auto-Body Panel Application" (2003) <https://scholarsjunction.msstate.edu/td/2146>
- [26] 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/am.m.889.203>
- [27] E8/E8M-13a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, American Association State Highway and Transportation Officials Standard
- [28] PAM-STAMP 2022 User Guide, 2022