



AA5754 ALAŞIMININ ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ İLE EĞİLME VE GERİ ESNEME DAVRANIŞININ ANALİZİ

Süleyman KILIÇ^{1*}, Mehmet Fatih DEMİRDÖĞEN²

¹ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, Türkiye

² Petlas Lastik Sanayi Ticaret A. Ş., Kırşehir, Türkiye

Anahtar Kelimeler

AA5754,
Geri Esneme,
Üç Nokta Eğme,
Zımba Yarıçapı,
Haddelme Yönü.

Öz

Bu çalışmada, AA5754 alüminyum alaşımının eğilme davranışı üç nokta eğme testi kullanılarak araştırılmıştır. Üç nokta eğme testi, malzemelerin elastik ve plastik deformasyon davranışlarını anlaşılması, sertlik ve mukavemet özelliklerini değerlendirilmesi amacıyla kullanılan bir test yöntemidir. Farklı zımba yarıçapları (3, 5, 7 mm), deformasyon hızları (2, 5, 10 mm/dak), zımba mesafeleri (30, 40, 50 mm) ve hadde yönleri (0° ve 90°) kullanılarak yapılan deneylerde, bu parametrelerin geri esneme üzerindeki etkileri incelenmiştir. İmalat mühendisliğinde kritik bir konu olan geri esneme, sac metal malzemelerin şekillendirilmesi sırasında zımba kuvvetinin kaldırılmasıyla malzemede meydana gelen açı değişimidir. Geri esneme ölçümleri, evrensel açı ölçer ve görüntü işleme teknikleri kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen deneysel verilere göre, zımba mesafesinin artırılması geri esnemenin artmasına neden olmuştur. Zımba yarıçapının haddelme yönü boyunca artırılması geri esnemeyi önemli ölçüde etkilemezken, numunelerin haddelme yönüne dik yönde zımba yarıçapının artırılması daha büyük geri esnemeye neden olmuştur. Zımba hızının geri esneme üzerindeki etkisi ise sınırlı düzeyde bulunmuştur. Minimum geri esneme, 3 mm zımba yarıçapı, 10 mm/dak deformasyon hızı ve hadde yönünde yapılan eğme işlemlerinde gözlemlenmiştir. Bu çalışma eğme işlemindeki parametrelerin geri esneme üzerindeki etkisini göstermektedir.

ANALYSIS OF BENDING AND SPRINGBACK BEHAVIOUR OF AA5754 ALLOY USING THE THREE-POINT BENDING TEST

Keywords

AA5754,
Springback,
Three-Point Bending,
Punch Radius,
Rolling Direction.

Abstract

In this study, the bending behavior of AA5754 aluminum alloy was investigated using the three-point bending test. The three-point bending test is a method used to understand the elastic and plastic deformation behaviors of materials and to evaluate their hardness and strength properties. Experiments were conducted with different punch radii (3, 5, 7 mm), deformation speeds (2, 5, 10 mm/min), punch distances (30, 40, 50 mm), and rolling directions (0° and 90°) to examine their effects on springback. In manufacturing engineering, springback is a critical issue and refers to the change in angle of the material when the punch force is removed during the forming of sheet metal materials. Springback measurements were performed using a universal protractor and image processing techniques. According to the experimental data obtained, increasing the punch distance led to an increase in springback. While increasing the punch radius along the rolling direction did not significantly affect springback, increasing the punch radius in the transverse direction resulted in greater springback. The effect of punch speed on springback was found to be limited. Minimum springback was observed in bending processes performed with a 3 mm punch radius, a deformation speed of 10 mm/min, and in the rolling direction. This study demonstrates the impact of various parameters on springback during the bending process.

Alıntı / Cite

Kılıç, S., Demirdöğen, M. F., (2025). AA5754 Alaşımının Üç nokta Eğme Testi ile Eğilme ve Geri Esneme Davranışının Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 144-154.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Süleyman Kılıç, 0000-0002-1681-9403
Mehmet Fatih Demirdöğen, 0000-0002-0545-3733

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	07.08.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	21.12.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	25.12.2024
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025

* İlgili Yazar / Corresponding author: suleymankilic@ahievran.edu.tr, +90-386-280-3812

ANALYSIS OF BENDING AND SPRINGBACK BEHAVIOUR OF AA5754 ALLOY USING THE THREE-POINT BENDING TEST

Suleyman KILIC^{1†}, Mehmet Fatih DEMIRDOGEN²

¹ Kırşehir Ahi Evran University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, Kırşehir, Türkiye

² Petlas Tire Industry and Trade Inc., Kırşehir, Türkiye

Highlights

- Investigation of springback in AA5754 alloy using three-point bending tests.
- Effect of punch radius, deformation speed, punch distances, and rolling direction on springback analyzed.
- Results indicate increased punch radius in the transverse direction leads to higher springback.
- Punch speed found to have a limited effect on springback behavior.

Graphical Abstract

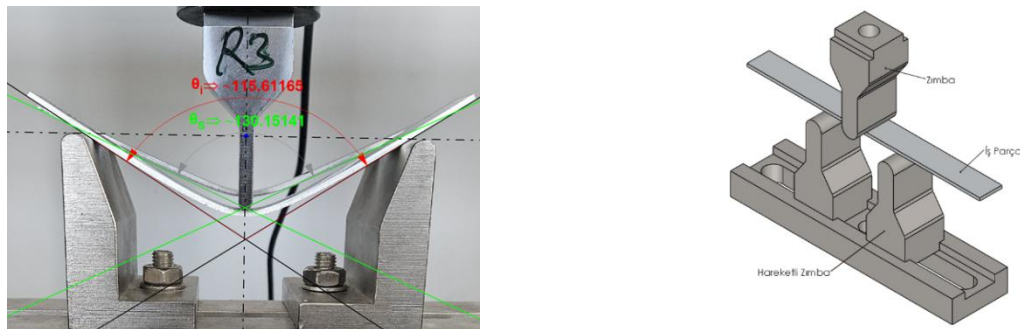


Figure a) Springback Measurement Using Image Processing Techniques, b) Schematic Three-Point Bending Test Setup

Purpose and Scope

The purpose of this paper is to investigate the bending behavior and springback characteristics of the AA5754-H111 aluminum alloy using the three-point bending test. The research aims to understand the influence of various parameters, including punch radius, deformation speed, and rolling direction, on springback, which is a critical factor in manufacturing engineering.

Design/methodology/approach

The objectives were achieved through a series of three-point bending experiments, utilizing different punch radii (3, 5, 7 mm), deformation speeds (2, 5, 10 mm/min), punch distances (30, 40, 50 mm), and orientations (rolling direction and transverse direction). The study employed a combination of experimental methods, including universal protractors and image processing techniques, to accurately measure springback. The theoretical scope includes the mechanical properties and deformation behaviors of aluminum alloys in forming processes.

Findings

The study found that increasing the punch radius along the transverse direction led to a significant increase in springback, while variations along the rolling direction had minimal impact. Additionally, the effect of punch speed on springback was found to be limited. These results highlight the importance of considering anisotropy in material behavior, as the rolling direction influences the mechanical response significantly.

Originality

The originality of this paper lies in its detailed examination of the effects of punch radius, deformation speed, punch distances, and rolling direction on springback in AA5754-H111 alloy. The research provides new insights into the material's anisotropic behavior during bending processes, offering valuable knowledge for both academic research and practical applications in manufacturing engineering.

[†] Corresponding author: suleymankilic@ahievran.edu.tr, +90-386-280-3812

1. Giriş (Introduction)

Alüminyum alaşımları, hafiflikleri, yüksek mukavemetleri, mükemmel korozyon dirençleri ve kaynaklanabilirliği sayesinde otomotiv, havacılık ve inşaat gibi pek çok endüstriyel alanda tercih edilmektedir (Paik vd., 2005; Yuri vd., 2001; Zhou vd., 2021; Georgantzia vd., 2021). Özellikle, AA5754-H111 alaşımı, iyi işlenebilirlik özellikleri ve orta seviye mukavemeti ile öne çıkmaktadır (Kamal vd., 2023). Bu alaşım, genellikle yapısal bileşenlerde ve şekillendirilmiş parçalarda kullanılmaktadır (Macwan vd., 2017). Dolayısıyla malzemenin mekanik davranışlarının detaylı bir şekilde anlaşılması büyük önem taşımaktadır.

Eğme işlemleri, metal şekillendirme endüstrisinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (Hosford ve Caddell, 2011; Boljanovic, 2004; Altan ve Tekkaya, 2012). Aynı zamanda, malzemenin mekanik özelliklerini incelemek içinde pratik bir yöntemdir (Geiger vd., 1991; Kilic, 2019; Kilic ve Ozturk, 2017). Özellikle üç nokta eğme testi, malzemenin esneklik ve plastik deformasyon limitlerini anlamak için tercih edilen bir yöntemdir. Bu test yöntemi, kompozit malzemelerin eğilme davranışlarını incelemek (Seyed Jafari vd., 2021; Kazemi vd., 2022; Kümmel vd., 2018; Xia vd., 2022), kaynakların verimliliğini değerlendirmek (Sudhakar ve Srinivas, 2021; Moni, 2020) ve katmanlı imalat ile üretilen parçaların dayanıklılığını ölçmek (Monkova vd., 2023) amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca, malzemenin yük altında nasıl davrandığını (Václavík vd., 2024), çatlakların nasıl yayıldığını (Ren vd., 2023; Jeong vd., 2024), yapışkan mukavemetini belirleme ve yüzey hasarları (Birro vd., 2021), sandviç kompozitlerin dayanımı ve incelenmesi (Harizi vd., 2021; Beigpour vd., 2021) gibi işlemlerde önemli bilgiler sağlamaktadır. Koçar ve arkadaşları (Koçar vd., 2023), malzeme bilimi alanında önemli bir test olan üç nokta eğme testi için bir yer değiştirme modelinin doğrulamasını incelemişlerdir. İnceledikleri modelin deneysel sonuçlarla yüksek uyum gösterdiğini söylemişlerdir. Modelin kırılma sürecini ve çatlak ilerlemesini doğru bir şekilde tahmin ettiği ve kırılma sonrası malzeme davranışının anlaşılmasına katkı sağladığı vurgulanmıştır. Liu ve arkadaşları (Liu vd., 2023), farklı hızlarda üç nokta eğme testleri ile malzemenin kırılma davranışını incelemişlerdir. Liu ve arkadaşları (Liu vd., 2023), yaptıkları başka bir çalışmada 30°C ile 150°C arasındaki sıcaklıklarda ve 1.5, 3 ve 5 mm/dak yükleme hızlarında üç nokta eğme deneyi ile kırılma davranışını incelemişlerdir.

Chen ve arkadaşları (Chen vd., 2023), yüksek yükleme hızlarında dinamik üç nokta eğme testlerinin teorisini geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri teoriyi, Hopkinson bar testi ve dijital görüntü korelasyonu (DIC) yöntemi ile doğrulamışlardır. Bu doğrulama sürecinde, malzemede oluşan normal ve kayma gerilmeleri ölçülerek teorik modellerle karşılaştırılmıştır. Yu ve arkadaşları (Yu vd., 2018), üç farklı tane boyutuna sahip granit malzemenin üç nokta eğme testi kullanılarak çekme dayanımı ve kırılma tokluğunun hesaplanmasını amaçlamışlardır. Daha küçük tane boyutuna sahip granit numunelerin daha yüksek çekme dayanımı ve kırılma tokluğu sergilediği vurgulanmıştır. Önerdikleri yöntemin mühendislik uygulamalarında granit ve benzeri malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılabilirliğini ifade etmişlerdir. Jindra ve arkadaşları (Jindra vd., 2021), AISI 304 paslanmaz çeliğinde üç nokta eğme testiyle ortaya çıkan davranışları deneysel ve sayısal simülasyonlarla incelemişlerdir. Çalışmalarında iki farklı AISI304 paslanmaz çelik kiriş kullanmışlardır. Bu iki kiriş, aynı malzeme sınıfında (EN 1.4301 / AISI 304) olmasına rağmen farklı partilerden almışlardır. Metal malzemelerin üretimi genellikle farklı üretim hatlarında gerçekleştirilmekte ve bu üretim grupları parti veya sevkiyat olarak tanımlanmaktadır. Her bir parti, belirli bir üretim dönemi boyunca üretilen malzemeleri içermekte ve kalite kontrol süreçlerinde izlenebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Yapılan çalışmayla malzeme özelliklerinin partiden partiye değişebileceğini göstermişlerdir. Plastik davranışın başlaması açısından küçük farklılıklar gözlemlenmiştir. Dindar (Berkant, 2021), 5754-H111 alaşımı plaka malzemesi olan V-kesikli alüminyumun nanokompozit yama ile onarılan malzemelerin dayanımını üç noktalı eğme yöntemiyle incelemiştir.

Eğme işlemi sonucu meydana gelen geri esnemenin incelenmesinde de bu yöntem pratik olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, zımba mesafesi, zımba yarıçapı, deformasyon hızı ve hadde yönü gibi faktörlerin malzemenin geri esneme davranışını önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir (Sarkar vd., 2001; Liu vd., 2017; Sert vd., 2017; Mohammadtabar vd., 2021; Toros vd., 2011). Bu faktörlerin her birinin malzemenin eğme sonrası davranışları üzerindeki etkisini belirlemek, daha doğru ve verimli imalat süreçlerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Inamdar ve arkadaşları (Inamdar vd., 2002), beş farklı malzemede eğme işleminde geri esneme etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Çalışmalarında, farklı eğme açıları, farklı kalıp açıklığı ve sac kalınlığını parametre olarak kullanmışlardır. Eğilme açısı arttıkça geri esnemede de bir artış olduğu ayrıca kalıp açıklığı arttıkça geri esnemenin azaldığını göstermişlerdir. İncelenen tüm malzemelerde geri esnemenin, kalıp açıklığı/sac kalınlığı oranına ve eğme açısına bağlı olduğunu vurgulamışlardır. AA5754 alaşımında geri esneme miktarının incelenmesi ve modellenmesi üzerine yapılan bir çalışmada (Tiryakioğlu, 2013), eğme açısı, malzeme kalınlığı, uç yarıçapı gibi parametrelerin geri esneme davranışında önemli ölçüde etkili olduğu gösterilmiştir. Wang ve arkadaşları (Wang vd., 2020), AA5754 alaşımında sıcak şekillendirme koşullarındaki geri esneme davranışını tahmin etmek için hem analitik hem de ampirik modeller geliştirmişlerdir. Geliştirilen modellerin %5 hata oranı ile tahmin yapabildiği söylenmiştir. Laurent ve arkadaşları (Laurent vd., 2010), AA5754 alaşımında geri esneme davranışını ayrılmış halka deneyi ve sayısal simülasyonlar kullanarak incelemişlerdir. Ayrık halka deneyi, derin çekilmiş bir bardaktan

kesilen halka şeklindeki bir numune, radyal bir düzlem boyunca bölünerek incelenir. Bu deney, malzemenin çekme, eğme ve diğer mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır. Abaqus yazılımı ile yapılan sayısal simülasyonlarla modellemişler ve elde edilen sonuçların deneysel sonuçlar uyumlu olduğunu vurgulamışlardır. Sargeant ve arkadaşları (Sargeant vd., 2023), AA6016-T4 alaşımında bükme işlemi sonrası geri esneme davranışını incelemişlerdir. Numunelere farklı ön gerinimler uygulanarak bükme işlemleri gerçekleştirilmiştir. İç yapıda meydana gelen dislokasyon yoğunluğunun geri esneme üzerinde önemli bir etken olduğu söylenmiştir. Ön gerininim artmasıyla geri esneme miktarının arttığı gösterilmiştir. Özellikle çift eksenli deformasyon uygulamasının geri esneme üzerinde daha büyük etkisi olduğu vurgulanmıştır. Sofuoğlu ve arkadaşları (Sofuoğlu vd., 2017), AA6082-T6 alüminyum tüplerin üç nokta eğme deneyi ile geri esneme davranışını incelemişlerdir. Ls-Dyna yazılımı kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasını yapmışlar, aradaki farkı 0,09° olarak elde etmişlerdir. Hareket mesafesi arttıkça geri esneme açısının arttığı vurgulanmıştır. Liu ve arkadaşları (Liu vd., 2018), iki alüminyum alaşımında geri esneme davranışını incelemişlerdir. Geri esneme davranışını haddelme yönüne 0°, 45° ve 90° açılarda incelemişlerdir. Çalışmalarında farklı bükme açıları (60°, 90°, 120°) ve zımba hızlarını (004, 0.4, 4 mm/s) araştırmışlardır. Bükme açısı arttıkça geri esneme açısının azaldığı, daha kalın malzemenin daha az geri esmediği, zımba hızının ise geri esneme üzerindeki etkisinin minimum olduğu gösterilmiştir. Zhang ve arkadaşları (Zhang vd., 2018), Q235 karbon çeliğinin geri esneme sürecini incelemişlerdir. Farklı adım uzunlukları (15 mm, 30 mm, 60 mm) kullanılarak yaptıkları bükme deneylerinde, maksimum yükleme kuvveti ve zımba derinliği aynı olduğu sürece adım uzunluğunun geri esneme üzerinde önemli bir etkisi olmadığı, ancak zımba derinliği arttıkça geri esneme miktarının arttığını gözlemlemişlerdir. Zımba pozisyonunun iki destek noktası arasındaki mesafeyi (L) etkilediğini, L büyüdükçe yükleme kuvvetinin arttığını vurgulamışlardır. Zımba pozisyonu destek noktalarına yaklaştıkça geri esneme miktarının azaldığını göstermişlerdir. Bu durumun da daha büyük L ile plastik deformasyon bölgesinin artmasıyla ve elastik deformasyonun azalmasıyla açıklanmışlardır. Zang ve arkadaşları (Zang vd., 2014), üç nokta eğme testi ile ön gerininim uygulanmış numunelerde Bauschinger etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında DP780 çeliğini kullanmışlar ve sonlu elemanlar simülasyonları ile doğrulamışlardır. Ön gerininim uygulanmasının geri esneme üzerinde etkili olduğu vurgulanmıştır.

Özellikle otomotiv endüstrisinde, yüksek bükme kalitesinin bir ürünün toplam maliyetini düşürmekte önemli bir faktör olduğu ifade edilmektedir (Chatti vd., 2004). Bükülme esnasında Elastisite (Young) modül değişmektedir. Elastisite modül değişimi de geri esneme üzerinde etkili bir parametredir. Bu nedenle elastik modülün değişimini dikkate alan simülasyonların, daha doğru geri esneme tahminleri sağladığı bilinmektedir (Chang vd., 2021). Zeng ve arkadaşları (Zeng vd., 2014), yeni bir üç nokta eğme testi yöntemi ile malzemelerin Elastisite modülünü belirlemeyi amaçlamışlardır. Yapılan deneylerde AA2024 alaşımını kullanmışlardır. Bu yeni yöntem ile ölçülen Elastisite modülü, sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Hata oranı %2,3 bulunmuştur. Daha yüksek sürtünme katsayısında daha yüksek Elastisite modülü değerleri elde etmişlerdir. Yoshihara ve Tsunematsu (Yoshihara ve Tsunematsu, 2006), üç nokta eğme testi kullanarak ahşap malzemelerin Elastisite modülünü ölçmek için tahmin yöntemlerinin uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Elastisite modülünü ölçmek için iki nokta yer değiştirme ölçümlerinin ve yük-gerilme ilişkisi kullanmanın etkili yöntemler olduğu, gerininim ölçer (strain gauge) kullanımının Elastisite modülünün ölçülmesinde standart bir yöntem olarak uygulanmasını önermişlerdir.

Bu çalışma, AA5754-H111 alaşımının üç nokta eğme testi ile değişken zımba mesafesi, zımba yarıçapı, zımba hızı ve hadde yönlerinde nasıl davrandığını araştırmaktadır. Çalışmanın amacı, bu değişkenlerin alaşımın geri esneme özellikleri üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmek ve bu bilgiler ışığında, alaşımın endüstriyel uygulamalar için optimizasyonuna katkıda bulunmaktır. Bunun yanı sıra, çalışma, geri esneme ölçümlerinde görüntü işleme tekniklerinin kullanılması ve farklı parametre kombinasyonlarının etkilerinin kapsamlı bir şekilde incelenmesiyle literatürdeki benzer çalışmalardan ayrılmaktadır. Bu kapsamlı analiz çalışması, sac metal şekillendirme süreçlerinde geri esneme davranışını daha iyi anlamaya yönelik bilgiler sunmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

AA5754-H111, özellikle denizcilik ve otomotiv endüstrilerinde tercih edilen bir alüminyum-magnezyum alaşımıdır. Hafifliği, şekillendirilebilirliği ve korozyon direnci nedeniyle endüstriyel uygulamalar için vazgeçilmezdir. Deneylerde 2,5 mm kalınlığında AA5754-H111 alaşımı kullanılmıştır. Numuneler, 1 m x 2 m boyutlarındaki sac levhalardan giyotin makas ile kesilmiş ve deneyler için uygun hale getirilmiştir. Deneyler, Shimadzu marka 100 kN kapasiteli çekme testi cihazında gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme testleri için özel olarak tasarlanmış eğme takımları kullanılmıştır. Deney parametreleri, cihazın kontrol paneli üzerinden hassas bir şekilde ayarlanmıştır. Alaşımın kimyasal bileşimi Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Kimyasal Bileşim (Chemical Composition)

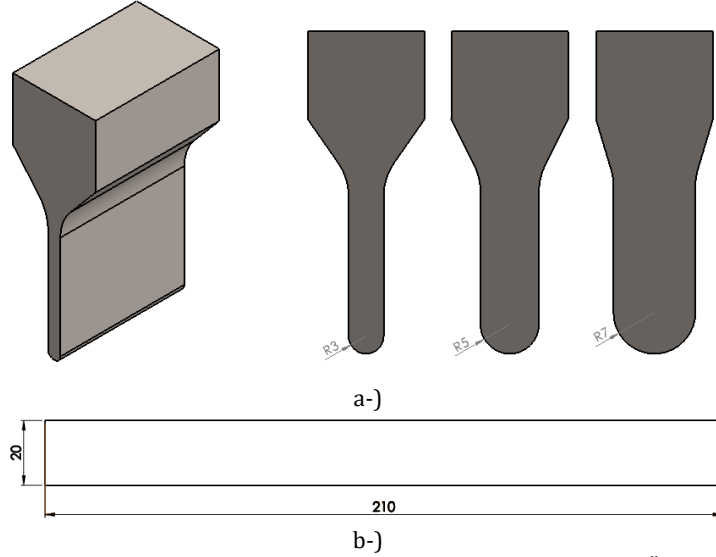
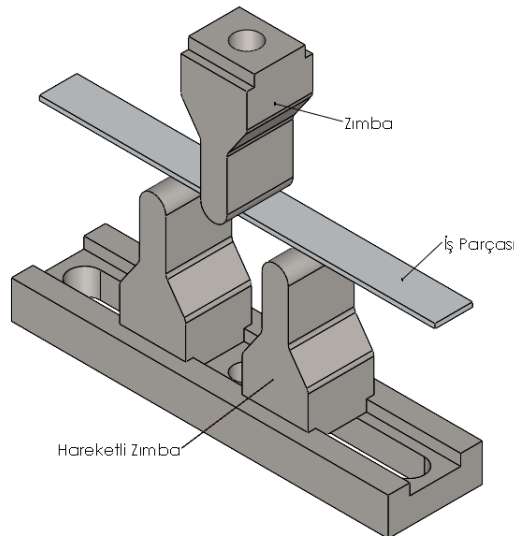
Malzeme	Fe	Si	Cu	Cr	Mn	Mg	Zn	Zn+Ti	Diğer	Al
AA5754	0,4	0,4	0,1	0,3	0,5	2,6-3,6	0,2	0,15	0,15	Kalan

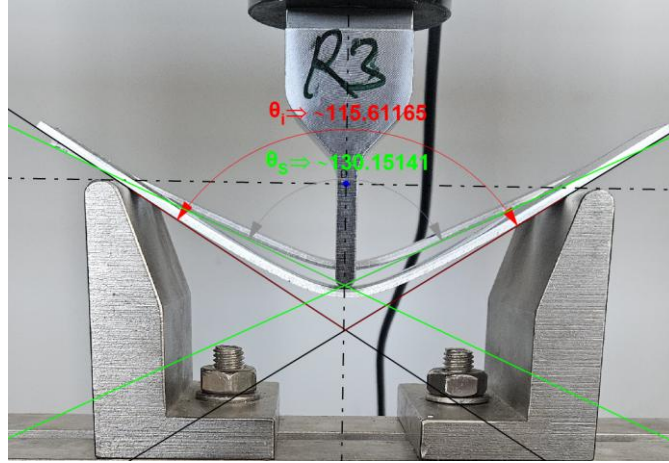
Bu çalışmada, farklı zımba yarıçapları (3, 5, 7 mm), zımba mesafeleri (10, 20, 30 mm) ve zımba hızları (2, 5, 10 mm/dak) kullanılarak gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyleri üzerinden malzemenin eğilme ve geri esneme davranışı analiz edilmiştir. Özellikle hadde yönünün (0° ve 90°) etkisi üzerinde durulmuştur. Bu parametre, malzemenin şekillendirme işlemi sırasındaki tepkisini belirlemede kritik bir faktördür. Deneylerde kullanılan parametreler Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Deneylerde Kullanılan Zımba Yarıçapı, Deformasyon Hızı ve Zımba Mesafesi (Punch Radius, Deformation Speed, and Punch Distances Used in The Experiments)

Zımba Yarıçapı (mm)	Deformasyon Hızı (mm/dak)	Zımba Mesafesi (mm)	Hadde Yönü
3	2, 5, 10	10, 20, 30	$0-90^\circ$
5	2, 5, 10	10, 20, 30	$0-90^\circ$
7	2, 5, 10	10, 20, 30	$0-90^\circ$

Deneysel çalışma, Şekil 1.'de şematik olarak gösterilen farklı yarıçaplara sahip eğme takımları ve numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler, Şekil 2'de şematik olarak gösterilen üç nokta eğme düzeneği yardımıyla eğilmiştir. Geri esneme değerleri deneysel olarak elde edilmiş, deneyler üçer kez tekrarlanmıştır. Evrensel açı ölçer ve Şekil 3.'de örneği görülen görüntü işleme teknikleri (Kılıç ve Demirdöğen, 2024) yardımıyla geri esneme ölçümleri yapılmıştır.

**Şekil 1.** a-) Farklı Zımba Yarıçapları (Different Punch Radii), b-) Numune Ölçüleri (Sample Dimensions)**Şekil 2.** Şematik Üç Nokta Eğme Testi Düzeneği (Schematic Three-Point Bending Test Setup)



Şekil 3. Görüntü İşleme Teknikleri ile Geri Esneme Ölçümü (Springback Measurement Using Image Processing Techniques)

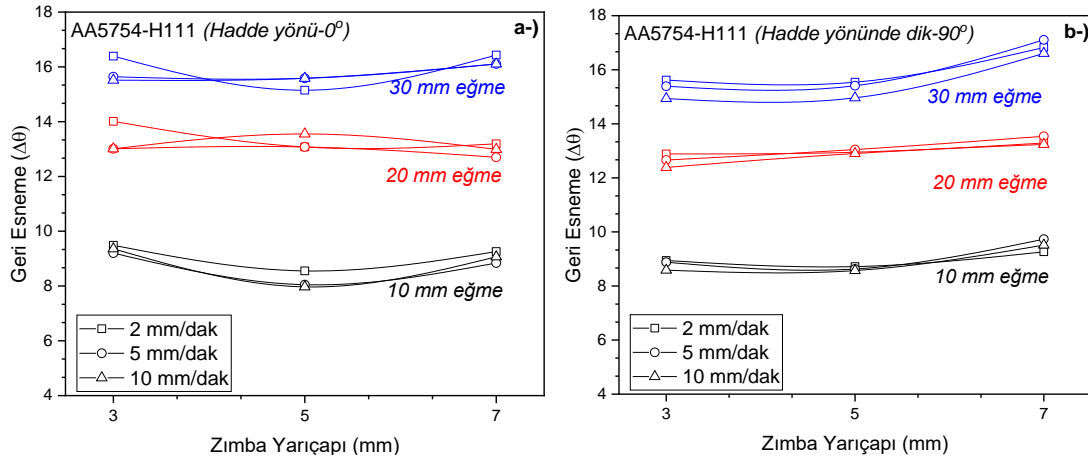
AA5754-H111 alaşımı için literatürde elde edilen mekanik özellikler Tablo 3'te sunulmuştur (Taktak vd., 2017). Bu veriler, hadde yönü boyunca (0°) ve hadde yönüne dik (90°) doğrultulardaki mekanik davranışı temsil etmektedir.

Tablo 3. AA5754-H111 Mekanik Özellikleri (Mechanical Properties of AA5754-H111) (Taktak vd., 2017).

Mekanik Özellik	0° (Hadde Yönü-RD)	90° (Hadde Yönüne Dik-TD)
Akma Mukavemeti (MPa)	100	99
Çekme Mukavemeti (MPa)	270	265
Uzama (%)	15,28	14,89

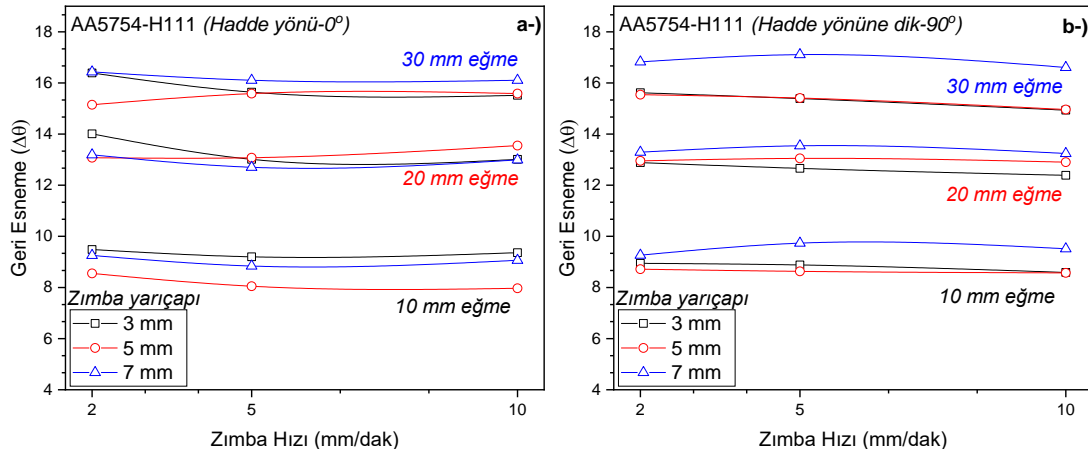
3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar, sac metal şekillendirme süreçlerinde geri esnemenin tahmin edilmesine yönelik önemli bilgiler sunmaktadır. Şekil 4, zımba yarıçapı ve eğme miktarının geri esneme üzerindeki etkilerini görsel olarak sergilemektedir. Hadde yönünde, zımba yarıçapının artırılması geri esneme üzerinde belirgin bir değişiklik yaratmazken, hadde yönüne dik numunelerde zımba yarıçapının artışı geri esneme miktarını artırmıştır. Örneğin, 10 mm eğme miktarında, 3 mm zımba yarıçapında geri esneme açısı $8,9^\circ$, 7 mm zımba yarıçapında ise $9,2^\circ$ olarak ölçülmüştür. Bu durum, yaklaşık %3,6'lık bir artışı göstermektedir. 20 mm eğme miktarında, 3 mm zımba yarıçapında geri esneme açısı $12,3^\circ$, 7 mm zımba yarıçapında ise $13,2^\circ$ olarak belirlenmiştir. Bu durumda geri esneme açısında yaklaşık %7,3'lük bir artış gözlenmiştir. 30 mm eğme miktarında, 3 mm zımba yarıçapında geri esneme açısı $15,6^\circ$, 7 mm zımba yarıçapında ise $16,8^\circ$ 'ye yükselmiştir. Bu durum, geri esneme miktarında yaklaşık %7,7'lik bir artış olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, hadde yönüne dik numunelerde zımba yarıçapının artırılmasının geri esneme miktarını önemli ölçüde artırdığını açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca, eğme miktarının artışıyla birlikte geri esneme açısında gözle görülür bir yükselme meydana gelmiştir. Bu durum, hadde yönüne dik numunelerde zımba yarıçapı etkisinin daha belirgin hale gelmesiyle birlikte, malzemenin geometrik ve elastik şekil değişim davranışında farklılık oluştuğunu göstermektedir. Mekanik özelliklerde (çekme ve akma mukavemeti) küçük farklar bulunmakla birlikte, bu farklar elastik geri dönüş (geri esneme) üzerinde hafif bir etki yaratmış olabilir. Bu bulgular, literatürdeki önceki çalışmalarla da desteklenmektedir (Li vd., 2024; Gao vd., 2023; Zhao vd., 2023; Goel vd., 2023; Trzepieciński ve Lemu, 2020; Li vd., 2021).



Şekil 4. AA5754 Alaşımında Deformasyon Hızı ve Eğme Miktarının Geri Esnemeye Etkisi, a-) Hadde Yönü, b-) Hadde Yönüne Dik (The Effect of Deformation Speed and Bending Amount on Springback in AA5754 Alloy: a) Rolling Direction, b) Transverse Direction)

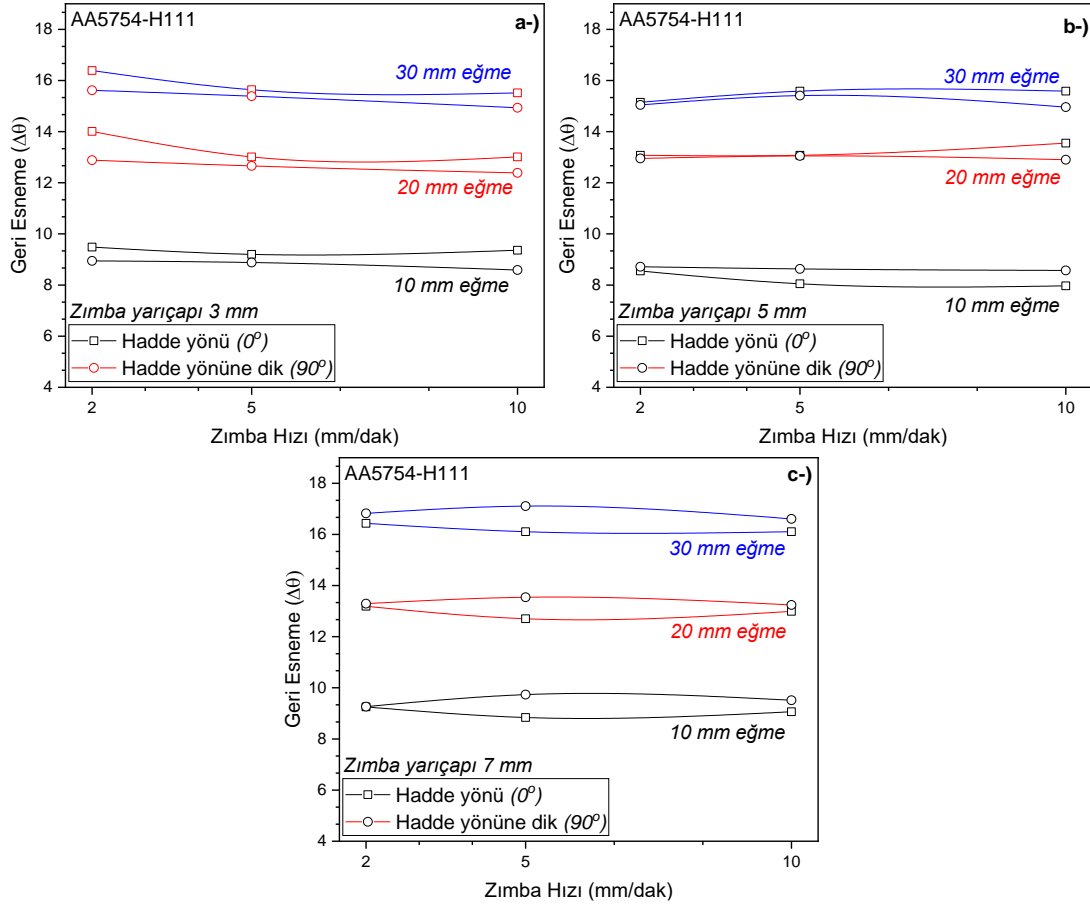
Bu çalışmada kullanılan 2, 5 ve 10 mm/dak zımba hızları, kontrollü laboratuvar koşullarında geri esneme davranışını incelemek için belirlenmiş düşük hızlardır. Endüstriyel uygulamalarda daha yüksek hızlar tercih edilmektedir. Bu çalışmada düşük hızların geri esneme üzerindeki etkisi detaylı olarak analiz edilmiştir. Şekil 5, zımba hızının geri esneme üzerindeki etkisini göstermektedir. Düşük zımba hızlarında, geri esneme değerlerinde belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir. Hadde yönünde (Şekil 5a), zımba hızının artışıyla geri esneme değerleri neredeyse sabit kalmaktadır. Hadde yönüne dik numunelerde (Şekil 5b) ise zımba hızının artırılmasıyla geri esneme değerlerinde hafif bir azalış eğilimi gözlenmiştir. Ancak bu değişim sınırlı düzeyde olup ve büyük bir etki yaratmamaktadır. Bu durum, zımba hızının plastik deformasyon bölgesine olan katkısının düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde, zımba hızının geri esneme üzerinde genellikle küçük bir etkisi olduğu belirtilmiştir (Bruni vd., 2006; Nagasaka vd., 2023). Ancak, bazı çalışmalar zımba hızının, malzemenin türüne ve işlem koşullarına bağlı olarak geri esneme üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini ortaya koymaktadır (Almeida vd., 2023). Örneğin, SPCC çeliğinde zımba hızı arttıkça geri esneme miktarı azalırken, DP780 çeliğinde ise zımba hızı arttıkça geri esneme miktarı artmaktadır (Choi ve Huh, 2014). Bu sonuçlar, zımba hızının geri esneme üzerinde önemli ve malzemenin özelliklerine göre değişken bir etkisi olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. AA5754 Alaşımında Zımba Yarıçapı ve Eğme Miktarının Geri Esnemeye Etkisi, a-) Hadde Yönü, b-) Hadde Yönüne Dik Numune (The Effect of Punch Radius and Bending Amount on Springback in AA5754 Alloy: a) Rolling Direction, b) Transverse Direction)

Şekil 6, eğme işlemi farklı zımba yarıçaplarının geri esnemeye etkisini göstermektedir. Eğme işlemi kullanılan zımba yarıçapı ve hadde yönü, malzemenin geri esneme özelliklerini belirleyen önemli faktörler arasındadır. Yapılan deneylerde, 3 mm zımba yarıçapı kullanılan numuneler, hadde yönünde daha fazla geri esneme göstermiştir. Bu durum, belirli bir zımba yarıçapında malzemenin hadde yönündeki deformasyonunun daha fazla esneme eğilimine neden olduğunu işaret etmektedir. Diğer yandan, 5 mm zımba yarıçapında genel bir eğilim gözlemlenmezken, 7 mm yarıçapında hadde yönünde daha az geri esneme değerleri elde edilmiştir. Bu gözlemler, eğme işlemi kullanılan zımba yarıçapının ve hadde yönünün, malzemenin geri esneme özelliklerini kritik şekilde etkilediğini vurgulamaktadır. Daha küçük zımba yarıçapları ve belirli bir hadde yönü, malzemenin

daha fazla esnemesine neden olurken, farklı zımba yarıçapları ve yönlendirmeleri, geri esneme davranışında çeşitlilik yaratabilmektedir. Kristal yapıdaki yönlendirilme, malzemenin mekanik özelliklerini etkileyerek farklı davranışlar ortaya çıkarır. Bu durum, eğme işlemlerinde geri esneme özelliklerinin belirlenmesinde önemlidir. Malzemenin hadde yönüne göre değişen kristal yapısı, farklı yönlerde farklı mekanik özelliklere neden olmakta ve özellikle geri esneme özelliklerinde belirleyici olmaktadır. Bu bağlamda, eğme işlemlerinde hadde yönünün dikkate alınması, tasarım sürecinde mekanik özelliklerin doğru anlaşılmasını sağlamak ve istenen şeklin elde edilmesine yardımcı olmak açısından kritik öneme sahiptir. Literatür yapılan çalışmalarda da haddeleme yönünün geri esnemeyi etkilediği gösterilmiştir (Trzepieciński ve Lemu, 2020).



Şekil 6. AA5754 Alaşımında Hadde Yönünün Geri Esnemeye Etkisi, a-) 3 mm Zımba Yarıçapı, b-) 5 mm Zımba Yarıçapı c-) 7 mm Zımba Yarıçapı (The Effect of Rolling Direction on Springback in AA5754 Alloy: a) 3 mm Punch Radius, b) 5 mm Punch Radius c) 7 mm Punch Radius)

Literatürdeki birçok çalışma, zımba yarıçapının artırılması geri esneme miktarını artırmaktadır (Vorkov vd., 2017; Suyuti vd., 2019; Özdemir, 2020; Dessie ve Lukacs, 2023). Bu çalışmada, AA5754 alaşımında, hadde yönünde zımba yarıçapının artırılmasının geri esnemeyi belirgin bir şekilde etkilemediği gözlemlenmiştir. Ancak, hadde yönüne dik numunelerde zımba yarıçapının artması, geri esnemenin artmasına neden olmuştur. Anizotropi, eğme sırasında malzemenin akış davranışını ve sünekliğini etkileyen önemli bir faktördür ve geri esneme üzerinde etkilidir (Setiawan vd., 2023; Hajiahmadi vd., 2023). Bu çalışma, hadde yönünün ve zımba yarıçapının, malzemenin mekanik davranışları üzerindeki etkisini vurgulamaktadır ve malzemenin anizotropik özelliklerinin bu etkileşimde kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, farklı deney parametreleri kullanılarak geri esnemenin etkileyen faktörler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bulgular şu şekildedir:

- Eğme Miktarının Etkisi: Eğme miktarının artması, toplam birim şekil değiştirme değerini artırarak geri esneme miktarında önemli bir artışa neden olmuştur. Örneğin, 2 mm/dak deformasyon hızı ve 3 mm zımba yarıçapında yapılan testlerde, 10 mm bükme miktarında geri esneme açısı $9,4^\circ$, 30 mm bükme miktarında ise $16,4^\circ$ olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, eğme miktarının artışıyla birlikte geri esneme miktarının gözle görülür şekilde arttığını açıkça ortaya koymaktadır.

- Anizotropi: Hadde yönü (0°) ve hadde yönüne dik (90°) numuneler arasında önemli farklılıklar gözlemlenmiştir. Hadde yönünde zımba yarıçapının artırılması geri esneme üzerinde sınırlı bir etkiye sahipken, hadde yönüne dik numunelerde geri esneme artışı daha belirgin hale gelmiştir. Örneğin, hadde yönünde, 30 mm bükme miktarında 3 mm zımba yarıçapında geri esneme açısı 16,3°, 7 mm zımba yarıçapında ise 16,4° olarak ölçülmüş ve bu durum %0,61'lik bir artışı göstermiştir. Aynı koşullarda, hadde yönüne dik numunelerde 3 mm zımba yarıçapında geri esneme açısı 15,6°, 7 mm zımba yarıçapında ise 16,8° olarak kaydedilmiştir. Bu durumda, hadde yönüne dik numunelerde geri esneme açısında yaklaşık %7,69'luk bir artış meydana gelmiştir.
- Zımba Yarıçapının Etkisi: Zımba yarıçapının artırılması, özellikle hadde yönüne dik numunelerde geri esneme miktarını artırmıştır. Örneğin, 10 mm bükme miktarında 3 mm zımba yarıçapında geri esneme açısı 8,9°, 7 mm zımba yarıçapında ise 9,2° olarak ölçülmüştür. Bu durum, yaklaşık %3,6'lık bir artışa işaret etmektedir. Zımba yarıçapının artırılmasıyla malzeme üzerinde daha düşük gerilme yoğunluğu oluşmakta ve bu durum malzemenin elastik geri dönüş davranışını değiştirmektedir.
- Zımba Hızının Etkisi: Zımba hızının geri esneme üzerindeki etkisi sınırlı kalmıştır. Örneğin, hadde yönündeki numunelerde, 2 mm/dak hızda geri esneme açısı 9,4°, 10 mm/dak hızda ise 9,3° olarak belirlenmiştir. Artış oranı oldukça düşük olup, bu sonuçlar zımba hızının geri esneme üzerindeki etkisinin diğer parametrelere kıyasla daha sınırlı olduğunu göstermektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. (No conflict of interest was declared by the authors.)

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince desteklenmiştir. Proje Numarası: MMF.A4.23.008 (This work was supported by Ahi Evran University Scientific Research Projects Coordination Unit. Project Number: MMF.A4.23.008)

Kaynaklar (References)

- Almeida, C. O. L., Santos, O. J. P. d., Panziera, R. C., Dutra, M. K., Pereira, M. and Pereira, M. d. S. 2023. Analysis of the springback effect of laser welded DP600 high-strength steel thin sheets, *Journal of Laser Applications*, 35 (4), 042045.
- Altan, T. and Tekkaya, A. E. 2012. Sheet metal forming: processes and applications, ASM international.
- Beigpour, R., Shokrollahi, H. and Khalili, S. M. R. 2021. Experimental and numerical analysis of a biodegradable hybrid composite under tensile and three-point bending tests, *Composite Structures*, 273 (0), 114255.
- Berkant, D. 2021. Three-point bending properties of V-notched aluminum repaired with a nanocomposite patch, *Emerging Materials Research*, 10 (3), 300-306.
- Birro, T. V., Aufray, M., Paroissien, E. and Lachaud, F. 2021. Assessment of interface failure behaviour for brittle adhesive using the three-point bending test, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 110 (0), 102891.
- Boljanovic, V. 2004. Sheet metal forming processes and die design, Industrial Press Inc.
- Bruni, C., Forcellese, A., Gabrielli, F. and Simoncini, M. 2006. Air bending of AZ31 magnesium alloy in warm and hot forming conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, 177 (1-3), 373-376.
- Chang, Y., Wang, N., Wang, B. T., Li, X. D., Wang, C. Y., Zhao, K. M. and Dong, H. 2021. Prediction of bending springback of the medium-Mn steel considering elastic modulus attenuation, *Journal of Manufacturing Processes*, 67 (0), 345-355.
- Chatti, S., Dirksen, U. and Kleiner, M. 2004. Optimization of the design and manufacturing process of bent profiles, *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 15 (6), 437-444.
- Chen, T., Jiang, Q., Xue, J., Harvey, C. M., Zhang, X., Silberschmidt, V. V., Liu, Y., Zhang, K., Wang, S. and Wei, B. 2023. Dynamic three-point bending tests under high loading rates, *Thin-Walled Structures*, 188 (0), 110836.
- Choi, M. K. and Huh, H. 2014. Effect of punch speed on amount of springback in U-bending process of auto-body steel sheets, *Procedia Engineering*, 81 963-968.
- Dessie, J. E. and Lukacs, Z. 2023. Determination of influential springback parameters in U-bending test, *Pollack Periodica*, 18 (2), 17-22.
- Gao, S., SUN, Y., LI, Q., YING, L., HAO, Z. and ZHANG, B. 2023. Multi-point 3D Hot Stretch-Bending Process of Titanium Alloy Profiles and Their Microstructure Evolution, *China Mechanical Engineering*, 34 (24), 2986.
- Geiger, M., Engel, U. and Vom Ende, A. 1991. Investigations on the sheet bending process with elastic tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 27 (1-3), 265-277.
- Georgantzia, E., Gkantou, M. and Kamaris, G. S. 2021. Aluminium alloys as structural material: A review of research, *Engineering Structures*, 227 (0), 111372.
- Goel, A., Vengatesh, T. P., Jerald, J. and Satheeshkumar, V. 2023. Influence of spot welding in adhesive bonded steel sheets on formability and springback, *Materials Today: Proceedings*, 90 (1), 156-163.

- Hajiahmadi, S., Naeini, H. M., Talebi-Ghadikolaee, H., Safdarian, R. and Zeinolabedin-Beygi, A. 2023. Effect of anisotropy on spring-back of pre-punched profiles in cold roll forming process: an experimental and numerical investigation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129 (9), 3965-3978.
- Harizi, W., Anjoul, J., Acosta Santamaría, V. A., Aboura, Z. and Briand, V. 2021. Mechanical behavior of carbon-reinforced thermoplastic sandwich composites with several core types during three-point bending tests, *Composite Structures*, 262 (0), 113590.
- Hosford, W. F. and Caddell, R. M. 2011. *Metal forming: mechanics and metallurgy*, Cambridge university press.
- Inamdar, M. V., Date, P. P. and Sabnis, S. V. 2002. On the effects of geometric parameters on springback in sheets of five materials subjected to air vee bending, *Journal of Materials Processing Technology*, 123 (3), 459-463.
- Jeong, K., Jeong, Y., Lee, J., Chung, G., Kim, G.-h. and Yoon, J. 2024. Experimental correlation between bending crack evolution and load-drop criterion in tight-radius three-point bending test with GPa-grade steels, *International Journal of Solids and Structures*, 301 (0), 112949.
- Jindra, D., Kala, Z., Kala, J. and Seitzl, S. 2021. Experimental and Numerical simulation of a Three Point Bending Test of a Stainless Steel Beam, *Transportation Research Procedia*, 55 1114-1121.
- Kamal, A. H., Ghazaly, N., Abdellah, M. Y., Seleem, A.-E. H. A. and Abdel-Jaber, G. T. 2023. Influence Parameters on the Essential Work of Fracture of 5754-H111 Aluminum Alloy Plate: Comparative Study, *SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications*, 4 (2), 243-259.
- Kazemi, F., Hashemi, R. and Niknam, S. A. 2022. Formability and fractography of AA5754/polyethylene/AA5754 sandwich composites, *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 50 (4), 1253-1267.
- Kilic, S. 2019. Experimental and numerical investigation of the effect of different temperature and deformation speeds on mechanical properties and springback behaviour in Al-Zn-Mg-Cu alloy, *Mechanics*, 25 (5), 406-412.
- Kilic, S. and Ozturk, F. 2017. Evaluation of Formability Under Different Deformation Modes for TWIP900 Steel, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 139 (3),
- Kılıç, S. and Demirdöğen, M. F. 2024. Görüntü işleme yöntemi ile geri esnemenin otomatik ölçümü: Deneysel bir yaklaşım, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13 (3), 785-791.
- Koçar, I., Sulovsky, T., Plovanić, M. and Božić, Ž. 2023. Verification of a displacement model for three-point bending test, *Procedia Structural Integrity*, 46 (0), 143-148.
- Kümmel, F., Diepold, B., Prakash, A., Höppel, H. W. and Göken, M. 2018. Enhanced monotonic and cyclic mechanical properties of ultrafine-grained laminated metal composites with strong and stiff interlayers, *International Journal of Fatigue*, 116 (0), 379-387.
- Laurent, H., Grèze, R., Oliveira, M. C., Menezes, L. F., Manach, P. Y. and Alves, J. L. 2010. Numerical study of springback using the split-ring test for an AA5754 aluminum alloy, *Finite Elements in Analysis and Design*, 46 (9), 751-759.
- Li, G., He, Z., Ma, J., Yang, H. and Li, H. 2021. Springback Analysis for Warm Bending of Titanium Tube Based on Coupled Thermal-Mechanical Simulation, *Materials*, 14 (17), 5044.
- Li, X., Wang, R., Jiang, H., Zhang, K., Lou, S., Su, C. and Sun, J. 2024. Multipass roll forming of variable-curvature elliptical panels using the angular function based on UOSDM, *Thin-Walled Structures*, (0), 111759.
- Liu, Y., Ma, Z., Liu, X., Wang, Z., Zhang, Z. and Liu, X. 2023. Ductile-to-brittle transition behavior of Fe-6.5 wt%Si alloy with three-point bending testing, *Materials Characterization*, 200 (0), 112861.
- Liu, Y., Ma, Z., Liu, X. and Zhang, Z. 2023. Effect of grain size and grain boundary on ductile to brittle transition behavior of Fe-6.5wt.%Si alloy under miniaturized three-point bending tests, *Materials Letters*, 353 (0), 135288.
- Liu, Y., Wang, L., Zhu, B., Wang, Y. and Zhang, Y. 2018. Identification of two aluminum alloys and springback behaviors in cold bending, *Procedia Manufacturing*, 15 (0), 701-708.
- Liu, Z.-w., Li, L.-x., Jie, Y., Li, S.-k., Wang, Z.-h. and Guan, W. 2017. Influence of heat treatment conditions on bending characteristics of 6063 aluminum alloy sheets, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27 (7), 1498-1506.
- Macwan, A., Mirza, F., Bhole, S. and Chen, D. L. Year. Similar and dissimilar ultrasonic spot welding of 5754 aluminum alloy for automotive applications, *Materials Science Forum*, 561-568.
- Mohammadtabar, N., Bakhshi-Jooybari, M., Gorji, H., Jamaati, R. and Szpunar, J. A. 2021. Effect of electric current pulse type on springback, microstructure, texture, and mechanical properties during V-bending of AA2024 aluminum alloy, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 143 (1), 011004.
- Moni, V. 2020. Mechanical properties of friction stir welded 5083-h321 and 6082-t651 dissimilar aluminium alloys. *Cape Peninsula University of Technology*,
- Monkova, K., Monka, P. P., Žaludek, M., Beňo, P., Hricová, R. and Šmeringaiová, A. 2023. Experimental Study of the Bending Behaviour of the Neovius Porous Structure Made Additively from Aluminium Alloy, *Aerospace*, 10 (4), 361.
- Nagasaka, A., Hojo, T., Kobayashi, J. and Tabata, C. Year. Warm V-Bending and Hydrogen Embrittlement Properties of Ultrahigh-Strength TRIP-Aided Bainitic Ferrite Steel Sheets, *International Conference on the Technology of Plasticity*, 436-444.
- Özdemir, M. 2020. Optimization of spring back in air v bending processing using Taguchi and RSM method, *Mechanics*, 26 (1), 73-81.
- Paik, J. K., van der Veen, S., Duran, A. and Collette, M. 2005. Ultimate compressive strength design methods of aluminum welded stiffened panel structures for aerospace, marine and land-based applications: A benchmark study, *Thin-Walled Structures*, 43 (10), 1550-1566.
- Ren, H., Li, T., Ning, J. and Song, S. 2023. Bending damage and fractal characteristics of steel fiber-reinforced concrete under three-point bending test, *Construction and Building Materials*, 409 (0), 134053.
- Sargeant, D., Sarkar, M. Z., Sharma, R., Knezevic, M., Fullwood, D. T. and Miles, M. P. 2023. Effect of pre-strain on springback behavior after bending in AA 6016-T4: Experiments and crystal plasticity modeling, *International Journal of Solids and Structures*, 283 (0), 112485.
- Sarkar, J., Kutty, T., Conlon, K., Wilkinson, D., Embury, J. and Lloyd, D. 2001. Tensile and bending properties of AA5754 aluminum alloys, *Materials Science and Engineering: A*, 316 (1-2), 52-59.

- Sert, A., Gürgen, S., Çelik, O. N. and Kuşhan, M. C. 2017. Effect of heat treatment on the bending behavior of aluminum alloy tubes, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31 (0), 5273-5278.
- Setiawan, H., Nopriyanti, R. and Selvi Novita, S. Year. Analysis of the Effect of AISI 1005 Grain Structure and Cutting Angle on Springback Using the V-Bending Method, *Proceedings of the 5th International Conference on Applied Science and Technology on Engineering Science* (567-572).
- Seyed Jafari, P., Hashemi, R., Kazemi, F. and Pourmorad Kaleybar, S. 2021. An experimental investigation of mechanical properties, forming limit curves, and bending behavior of aluminum-polymer sandwich composites, *Materials Research Express*, 8 (8), 086516.
- Sofuoğlu, M. A., Gürgen, S., Çakır, F. H. and Orak, S. 2017. Springback Behavior of AA6082T6 Tubes in Three-point Bending Operation, *Procedia Engineering*, 182 (0), 658-664.
- Sudhakar, U. and Srinivas, J. 2021. Chapter Three - Sustainable friction stir welding of metals. In: KUMAR, K., ZINDANI, D. & DAVIM, J. P. (eds.) *Sustainable Manufacturing and Design*. Woodhead Publishing.
- Suyuti, M. A., Iswar, M. and Nur, R. 2019. Effect of Punch Parameters on Springback for Mild Carbon Steel in A V-Shape Bending Process, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 541 (1), 012015.
- Taktak, W., Taktak, R., Haddar, N. and Elleuch, R. 2017. Study of the influence of cold working on mechanical behavior and ductile fracture of 5754 aluminum alloy: experimental and numerical simulations, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 55 (3), 923-935.
- Tiryakioğlu, M. F. 2013. AA 2024 ve AL 5754 sac metal malzemelerde bükme esnasında oluşan geri esneme miktarının deneysel verilerle matematiksel olarak modellenmesi.
- Toros, S., Kilic, S. and Ozturk, F. 2011. The Effects of Material Thickness and Deformation Speed on Springback Behavior of DP600 Steel, *Advanced Materials Research*, 264 (0), 636-645.
- Trzepieciński, T. and Lemu, H. G. 2020. Improving Prediction of Springback in Sheet Metal Forming Using Multilayer Perceptron-Based Genetic Algorithm, *Materials*, 13 (14), 3129.
- Václavík, J., Dopierala, L. and Chvojan, J. 2024. Investigations of the Hybrid Beam Behavior during the Three-point Bending Test, *Procedia Structural Integrity*, 54 (0), 294-299.
- Vorkov, V., Aerens, R., Vandepitte, D. and Dufloy, J. R. 2017. Experimental investigation of large radius air bending, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92 (0), 3553-3569.
- Wang, A., Zhong, K., El Fakir, O., Sun, C., Liu, J. and Wang, L.-L. 2020. Springback Analysis of AA5754 under Warm Stamping Conditions, *Engineering Science & Technology*, 1 (1), 1-53.
- Xia, F., Durandet, Y., Tan, P. and Ruan, D. 2022. Three-point bending performance of sandwich panels with various types of cores, *Thin-Walled Structures*, 179 (0), 109723.
- Yoshihara, H. and Tsunematsu, S. 2006. Feasibility of estimation methods for measuring Young's modulus of wood by three-point bending test, *Materials and structures*, 39 (0), 29-36.
- Yu, M., Wei, C., Niu, L., Li, S. and Yu, Y. 2018. Calculation for tensile strength and fracture toughness of granite with three kinds of grain sizes using three-point-bending test, *PLOS ONE*, 13 (3), e0180880.
- Yuri, T., Ogata, T., Saito, M. and Hirayama, Y. 2001. Effect of welding structure on high-cycle and low-cycle fatigue properties for MIG welded A5083 aluminum alloys at cryogenic temperatures, *Cryogenics*, 41 (7), 475-483.
- Zang, S.-l., Lee, M.-G., Sun, L. and Kim, J. H. 2014. Measurement of the Bauschinger behavior of sheet metals by three-point bending springback test with pre-strained strips, *International Journal of Plasticity*, 59 (0), 84-107.
- Zeng, X., Wen, S., Li, M. and Xie, G. 2014. Estimating Young's Modulus of Materials by a New Three-Point Bending Method, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014 (1), 189423.
- Zhang, F., Ruan, J., Zhang, J., He, K. and Du, R. 2018. Experimental study of springback behavior in incremental bending process, *Procedia Manufacturing*, 15 (0), 1290-1297.
- Zhao, D., Du, P. and Liu, J. 2023. Design on multi-station progressive die for automobile reinforcement plate, *Forging & Stamping Technology*, 48 (8), 219-223.
- Zhou, B., Liu, B. and Zhang, S. 2021. The Advancement of 7XXX Series Aluminum Alloys for Aircraft Structures: A Review, *Metals*, 11 (5), 718.