

AA2024 Alaşımının V-Bükme İşlemi Sonrasında Geri Esneme Davranışlarının İncelenmesi

Hakan GÜRÜN^a, Onur ÇAVUŞOĞLU^a, Ulaş ÇAYDAŞ^b, Cebeli ÖZEK^b, Mahmut ÇELİK^b

^a Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü Ankara/Türkiye

^b Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü 23119 Elazığ/Türkiye
ucaydas@firat.edu.tr,

(Geliş/Received: 20.04.2017; Kabul/Accepted: 08.02.2018)

Özet

Bükme işlemi sac metal kalıpcılığında önemli bir yere sahiptir. Bükülen ürünün istenen ölçülerde ve açılarda olması son derece önemlidir. Bükülecek parçalarda istenilen açıyı elde edebilmek için, kullanılan malzemenin geri ve ileri esneme davranışlarının iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, AA 2024 malzemenin bükme işleminde geri esneme davranışlarının tespiti için deney ve analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 60°, 90° ve 120° bükme işlemi gerçekleştirilmiştir. Her açıdaki zımba için 3 ayrı bükme yarıçapı kullanılmıştır. Bükülen deney parçaları optik profilometre ile ölçülerek geri esneme miktarları tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: AA2024, V bükme, Geri esneme.

Investigation of Springback Behaviour of AA2024 Alloy After V-Bending

Abstract

Bending is an important operation in sheet metal molding process. The bent products have to satisfy the desired dimensions and angular tolerances after process. In order to obtain the necessary angles for the bent parts, the spring back behavior of the materials has to be well known. Experimental and analysis studies have been performed to determine the springback behavior of the AA 2024 alloy in bending process, in this study. 60°, 90° and 120° angular dies were designed for this purpose. Three different bending punch radii were used for each angular punch. The springback values were measured using an optical profilometer.

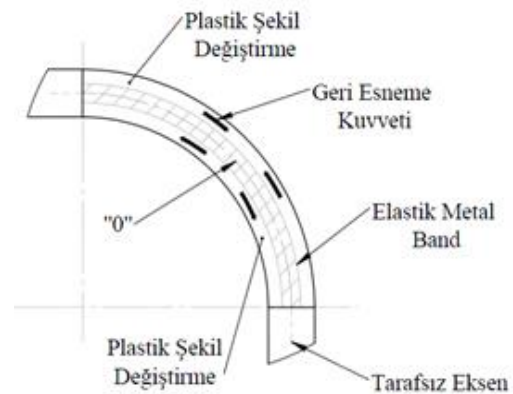
Keywords: AA2024, V bending, Springback.

1.Giriş

Alüminyum malzemeler, endüstride geniş bir yere sahiptir. Özellikle hafif ve korozyona karşı direncinin yüksek olmasından dolayı, otomotiv, havacılık sanayi, beyaz eşya vb. birçok alanda yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Malzemenin bu özelliklerine karşın üretim esnasında birçok problemlerle karşılaşmaktadır. Bunlardan birisi de sac malzemenin bükülmesi esnasında oluşan geri esnemedir. Malzemeleri bükme işlemi sırasında uygulanan kuvvet kaldırıldığında, malzemenin eski haline dönmeye çalıştığından istenilen ürün geometrisi elde edilememektedir. Bu da üretimde zaman ve maliyeti olumsuz yönde etkilemektedir [1,2].

Bükme, malzemenin üzerine bir kuvvet uygulamak suretiyle gerçekleşmektedir. Bükme işlemi pres tezgahlarında gerçekleştirildiğinden, bükme kuvvetine pres kuvveti de denilmektedir.

Bükme kalıplarında uygulanan pres kuvveti diğer kalıplara göre uygulama süresi bakımından farklılıklar göstermektedir.



Şekil 1. Bükme işleminde gerilmeler [3].

Bükme işleminde, plastik şekil değişikliğinin sağlanması ve parçanın son şeklini alması gerektiğinden pres kuvveti plastik şekil değişimi tamamlanana kadar uygulanır. Malzeme bükülmeye maruz kaldığında, dış yüzeylerde çekme, iç yüzeylerde basma gerilmeleri meydana gelir. Böylece, çekme etkisinin olduğu dış yüzeylerde uzama, basma etkisinin olduğu iç yüzeylerde ise kısalma şeklinde şekil değişimleri oluşur (Şekil 1) [3].

Bükme işleminde geri esneme miktarı malzemenin mekanik özelliklerine, kalınlığına, bükme yarıçapına, bükme açısına, zımba kalıp boşluğuna, baskı esnasında zımbanın kalıpta bekleme süresine ve ortam sıcaklığı gibi etkenlere bağlıdır. Bu nedenle istenilen özellikte ürünün üretilmesi için uygun üretim şartlarının sağlanması gerekmektedir. Bu konuda literatürde birçok çalışmalar yapılmıştır. Ötü ve Demirci, AA 5754 ve Al 1050 sac malzemeleri üzerinde farklı bükme mototları kullanarak geri esneme miktarlarının tespiti üzerinde çalışmışlardır [4]. Tekaslan ve arkadaşları, geri esnemenin tespit edilebilmesi için, modüle bir V bükme kalıbı tasarlayarak, çok yaygın olarak kullanılan bakır sac malzemelerin farklı bükme açılarındaki geri esneme miktarlarını tespit etmişler ve bu özelliklere bağlı olarak geri esneme grafikleri elde etmişlerdir [5]. Tekiner, serbest bükme kalıplarında geri esnemenin deneysel olarak tespiti üzerine çalışmalar yapmıştır. Geri esnemenin tespiti için V bükme kalıbı imal edilmiştir. Dört farklı kalınlık, sekiz bükme açısı ve her açıda üç farklı bükme radyüsü değeri kullanılarak bükme deneyleri gerçekleştirilmiştir [6]. Altan ve arkadaşları, esnek form verme işlemlerinde geri esnemenin azaltılabilmesi için en uygun değerleri bulmaya çalışmışlardır. Bilgisayar destekli sayısal analiz ve matematiksel modellemelerle, karşılaşılan bu sorunların çözümü için bazı çalışmalar yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve sonlu elemanlar yöntemi ile geri esneme tahminlerinde bulunmuşlardır [7-8]. Tiryaki ve arkadaşları yapmış oldukları deneysel çalışmada, sac metal malzemeleri bükme işleminde geri esneme açısının yapay sinir ağları ile tahmini için, sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS programı ile bir simülatör geliştirmişlerdir [9]. Wagoner ve Gan sacların geri esnemesinde kalıp tasarımının önemi üzerinde durmuşlardır. Ürünlere son şeklinin

verilmesinde kullanılan sac şekillendirme metodunu geliştirmişlerdir. Kalıp tasarımında sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, geri esnemenin tespitinde "Displacement Adjustment Method (DA)" ve "Karafillis and Boyce (K&B)" metodlarını kullanmışlardır. Bu iki metodu kullanarak DA metodunun daha etkin ve hızlı olduğunu tespit etmişlerdir [10]. Nilsson ve arkadaşları, serbest V bükme kalıplarında geri esnemenin, sonlu elemanlar yöntemi ile tahmininin yapılmasına yönelik çalışmalar yapmıştır [11]. Carden ve arkadaşları, üç farklı otomotiv sacı kullanarak çeşitli bükme deneyleri yapmışlardır. Bu deneyler esnasında kalıp boşluğu/radyüs oranını, sürtünme katsayısını ve kontrollü gerilme kuvvetlerini dikkate almışlardır. Geri esnemenin analitik modellemesi için de bazı grafikler oluşturmuşlar ve literatüre kazandırmışlardır [12]. Mullan, geri esnemenin sayısal algoritma metodu ile tespit edilmesi üzerine bir çalışma yapmıştır. İki çeşit bükme teorisi kullanmış ve bunları yaptığı deneysel çalışmalarla destekleyerek birbirleriyle kıyaslamıştır [13]. Lin ve arkadaşları, sac metallerin geri esnemesinde analitik bazı çözümler geliştirmişlerdir. Sac metaller üç ayrı parçaya bölmüşler ve sabit zımba ile elastik kalıp arasında baskıya maruz bırakmışlardır. Üretim esnasında geri esnemenin en önemli etkilerinden birinin kalıp ile iş parçası arasında oluşan sürtünmenin olduğunu gözlemlemiştir. Elastik kalıp sayesinde malzemede sürtünme etkisi azaltılmış ve sabit zımba şekli verilmesi kolaylaşmıştır [14]. Moon ve arkadaşları, alüminyum sac malzemelerdeki geri esneme miktarını azaltmak için zımba ve kalıp sıcaklığının geri esnemeye olan etkilerini araştırmışlardır [15]. Chan ve arkadaşları V bükme kalıplarında sac metal şekillendirme işleminde, geri esnemenin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi üzerinde çalışmışlardır. Farklı zımba parametreleri olan zımba açısı ve zımba yarıçapının geri esneme üzerindeki etkileri araştırılmışlardır [16]. Onate ve arkadaşları, sacların bükme işleminde sonlu elemanlar yöntemlerini kullanarak geri esneme tahmini üzerinde bazı incelemelerde bulunmuşlardır [17]. Lia ve arkadaşları, sonlu elemanlar yöntemi ile 2 ve 3 boyutlu geri esneme analizleri üzerine çalışmışlardır. Sac parçalara şekil verme işleminden sonra simülasyonlara tabi tutularak

karşılaştırmışlardır [18]. Inamdar ve arkadaşları, bükme işleminde geri esneme tahmini için sac metaller ile deneysel çalışmalar yapmış ve yapay sinir ağları yöntemini de kullanarak geri esneme tahminlerinde bulunmuştur [19]. Chatti ve arkadaşları, malzeme modellemesinde sayısal geri esneme tahminlerinde bulunmuşlardır. Modellemelerinde Bauchinger etkisi yöntemini kullanarak L ve U bükme işlemleri yapmış, deneysel geri esneme açıları ölçülerek sayısal tahminlerde bulunmuşlardır [20]. Gau ve arkadaşları, Bauschinger etkisi yönteminin geri esneme tahmini üzerindeki etkileri üzerinde çalışmalarda bulunmuşlardır [21]. Toros ve arkadaşları çalışmalarında, otomotiv sektöründe yaygın bir biçimde kullanılan alüminyum magnezyum alaşımlarından 5754-O alaşımının 60° lik V bükme kalıbındaki geri esneme davranışlarını incelemişlerdir. Malzemelere ön gerilmeler uygulanarak önce akma noktaları değiştirilmiş ve daha sonra bu erilmelerin geri esnemeye olan etkisi değerlendirilmiştir [22].

Yapılan çalışmalarda sac metal kalıpcılığında karşılaşılan geri esneme problemleri üzerinde durulmuştur. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen bilgiler kullanılarak çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiş ve bunlardan faydalanılmıştır. Matematiksel modellemenin amacı ise, uygun kalıp parametreleri, bükme açısı, bükme radyüsü, sac malzeme kalınlığı kullanılarak geri esnemenin önüne geçilmesidir. Yapılan bu çalışmada ise, kullanımı otomotiv ve havacılık alanlarında giderek yaygınlaşan AA 2024 sac malzemenin geri esneme davranışlarının incelenmesi, ürün kalitesinin ve boyutsal kararlılığının geliştirilmesi amaçlanmıştır.

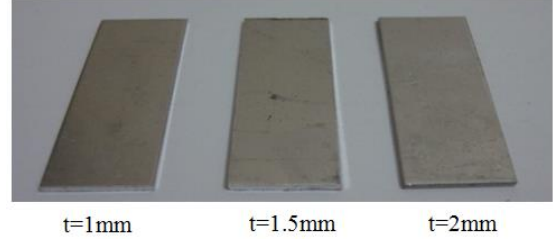
2. Materyal ve Metot

2.1. Deneysel malzemesi

Deneysel otomotiv ve havacılık sektöründe sıklıkla kullanılan AA 2024 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Deneysel numunelerinin kalınlıkları 1mm, 1.5mm ve 2 mm, ebatları ise 70x15 mm olarak hazırlanmıştır.

Numuneler, giyotin tezgahında hadde yönüne dik kesilerek hazırlanmıştır (Şekil 2). Ayrıca 2 mm malzeme kalınlığı için hadde yönüne paralel numuneleri de hazırlanmıştır. Kesme sonrasında malzeme kenarlarında oluşan

çapaklar eğe yardımı ile temizlenmiştir. Numunelere herhangi bir ısı işlem uygulanmadan bükme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel kullanılan malzemenin kimyasal ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Deneysel çalışmada kullanılan numuneler

Tablo 1. AA 2024’ün kimyasal bileşimi (%)

Al	Cr	Cu	Fe	Mn	Si	Ti	Zn	Mg
90.7 - 94.7	<0,1	3,8 - 4,9	<0,5	0.3 - 0.9	<0,5	<0,15	<0,25	1,2-1,8

Tablo 2. AA 2024’ün mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	Birim	Değer
Çekme Dayanımı	Mpa	483
Akma Dayanımı	Mpa	345
Uzama	%	18
Elastikyet Modülü	Gpa	73,1
Poission Oranı	-	0,33
Özgül Ağırlığı	g/cm ³	2,78

2.2. Metot

Malzeme özellikleri ve işlem parametreleri geri esnemenin tahminini zorlaştıran etkenlerdendir. Malzemelerin farklı bükme parametrelerinde şekillendirilebilirliğini tespit etmek amacıyla, sac malzeme kalınlığı, bükme açısı ve zımba yarıçapları belirli sınırlar içerisinde değiştirilmiştir. V bükme deneylerinde kullanılan parametreler ve faktör seviyeleri Tablo 3’de verilmiştir. Tablo 3’de görülen koşullara göre toplam 27 (3³) deney yapılmıştır. Bükme deneyleri sonrasında numunelerde meydana gelen geri esneme miktarları, 1 dakika hassasiyetindeki Mitutoyo marka optik profilometre yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 3).

Tablo 3. Deneysel koşullar

V Bükme Parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Zimba radyüsü (mm)	1	2	4
Sac kalınlığı (mm)	1	1.5	2
Bükme açısı (°)	60	90	120

**Şekil 3.** Deneysel ortamda kullanılan optik profilometre

2.3. Bükme kalıbının tasarımı ve imalatı

V bükme kalıbında gerekli kuvveti hesaplamak için araştırmacılar birçok farklı eşitlikler ortaya koymuştur. Bu çalışmada, bükme kuvveti aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır [5].

$$P_b = \frac{C \cdot x \cdot \sigma_b \cdot x \cdot S^2 \cdot x \cdot b}{W} \quad (1)$$

Bu eşitlikte; P_b , bükme kuvvetini (kg), S , sac kalınlığını (mm), σ_b , malzemenin çekme dayanımını (kg / mm²), b , parça genişliği (mm) ifade etmektedir. Eşitlikte yer alan C ; W/T' ye bağlı bir katsayı olup;

$$c = 1 + \frac{4 \cdot x \cdot S}{W} \quad (2)$$

şeklinde hesaplanmıştır.

Zimba yarıçapı;

$$r_i1 = K(r_i2 + (0,5 \cdot x \cdot S) - (0,5 \cdot x \cdot S)) \quad (3)$$

Formülü yardımıyla hesaplanmıştır. Burada; r_i1 = zimbaya verilmesi gerekli radyüsü (mm), r_i2 , bükme radyüsünü (mm), S , sac kalınlığı (mm) ve K malzemenin mukavemet değerleri ile ilişkili bir katsayıyı göstermektedir. Bu katsayı;

$$K = 1 - [a \left(\frac{\sigma_s \cdot \sigma_b}{2} \right) + b \left(\frac{\sigma_s \cdot \sigma_b}{2} \right) \left(\frac{r_i2}{S} \right)^2] \quad (4)$$

şeklinde hesaplanır. Burada; σ_b , malzemenin çekme mukavemetini, σ_s ise malzemenin akma sınır dayanımını göstermektedir.

$$\sigma_s = [0,6 \cdot x \cdot \sigma_b] \quad (5)$$

şeklinde hesaplanır. a ve b katsayıları ise sırasıyla 0.001 ve 0.000015 şeklinde seçilmiştir. Diğer

yandan alt kalıp radyüsü (R), kalıp açısı ($\Delta\alpha$) ve kalıp açıklık (W) değerleri aşağıdaki eşitlikler yardımıyla belirlenmiştir.

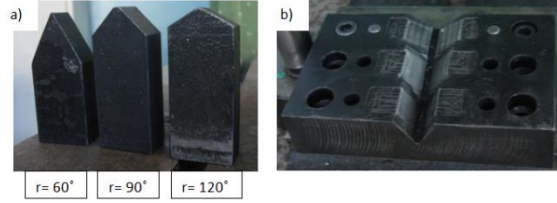
$$R = r_i1 + S \quad (6)$$

$$\Delta\alpha = (180 - \alpha_0) \left(\frac{r_i2}{r_i1} - 1 \right) (\alpha_0) \quad (7)$$

Burada; α_0 = bükme açısı

$$W = \frac{r_i1}{0,15 - 0,25} \quad (8)$$

Deneysel ortamda kullanılan bükme kalıbının farklı yarıçaplara sahip erkek zımbaları ve matrisi (dişi kalıp) AISI 1050 çeliğinden, JohnFord O-M CNC dik işleme merkezli freze tezgahında imal edilmiştir. İmalatı yapılan zimba ve dişi kalıp Şekil 4'de verilmiştir. Kullanılan zimba ve dişi kalıp ısıl işleme sertleştirilmiştir. Kalıbın komple montaj hali Şekil 5'de görülmektedir.

**Şekil 4.** Kullanılan zımbalar (a) ve dişi plaka (b)**Şekil 5.** Kalıp montajı

3. Deneysel Sonuçları ve Değerlendirme

60°, 90° ve 120°'lik kalıplar kullanılarak yapılan deneyler sonrasında numunelerden ölçülen geri esneme değerleri sırasıyla Tablo 4-6'da verilmiştir.

Tablo 4. 60° için elde edilen değerler

Hadde yönü	Kalınlık	R=1 mm	R=2 mm	R=4 mm
Hadde yönüne dik	1 mm	X	X	10,5
Hadde yönüne dik	1,5 mm	X	X	8,5
Hadde yönüne dik	2 mm	X	X	6,6
Hadde yönüne paralel	2 mm	X	X	7,5

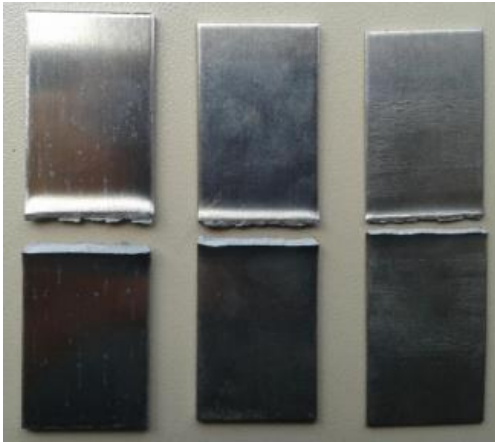
Tablo 5. 90° için elde edilen değerler

Hadde yönü	Kalınlık	R=1 mm	R=2 mm	R=4 mm
Hadde yönüne dik	1 mm	X	X	9
Hadde yönüne dik	1,5 mm	X	X	5,8
Hadde yönüne dik	2 mm	X	X	4,9
Hadde yönüne paralel	2 mm	X	X	7

Tablo 6. 120° için elde edilen değerler

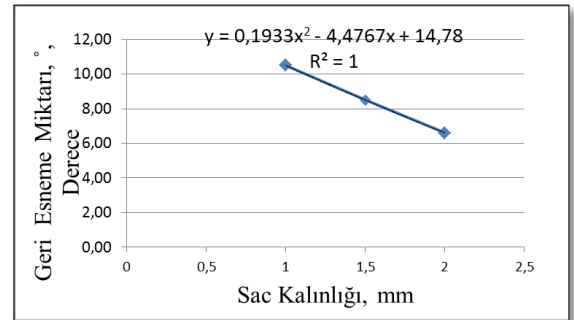
Hadde yönü	Kalınlık	R=1 mm	R=2 mm	R=4 mm
Hadde yönüne dik	1 mm	3,8	6,2	7,8
Hadde yönüne dik	1,5 mm	2,7	5,3	7
Hadde yönüne dik	2 mm	1	2,7	6,3
Hadde yönüne paralel	2 mm	3,1	4,5	7,5

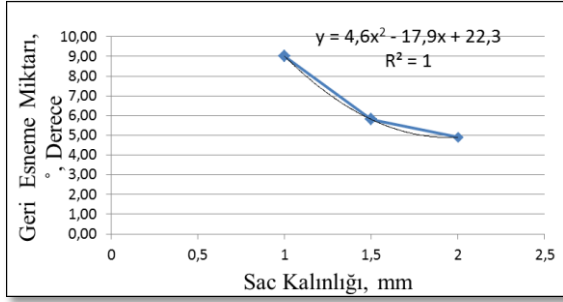
Tablolardan da görüldüğü gibi, AA 2024 alaşımının 60° ve 90°lik bükme deneylerinde 1 mm ve 2 mm uç radyüslü zımba kullanıldığında, oluşan çekme gerilmelerinden dolayı malzemeler bükme eksenlerinden kırılmışlardır. Kırılan numunelere ait fotoğraflar Şekil 6'da verilmiştir. Bükme yarıçapının düşük olduğu durumlarda, malzemenin bükme kenarında gerilmeler daha dar bir alanda yoğunlaşarak çatlaklara sebep olmakta ve parçanın kopmasına neden olmaktadır. Her üç açı değerinde de 4 mm uç radyüslü zımbalarla gerçekleştirilen deneylerde bükme işlemi sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

**Şekil 6.** Kırılan numunelerin görüntüsü

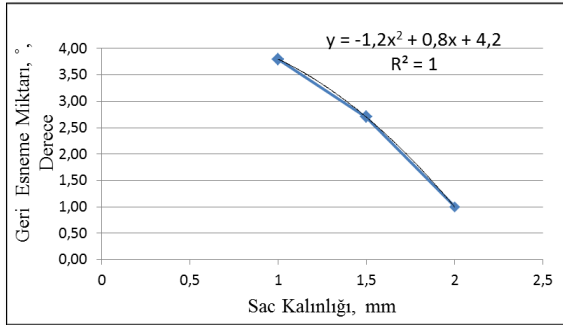
Bükme açısı 120° olduğunda tüm zımbalarla yapılan deneyler başarılı olmuştur. Elde edilen değerler kıyaslandığında malzeme kalınlığının, zımba uç radyüsünün ve bükme açısının geri esnemeye etkisinin oldukça fazla olduğu gözlemlenmiştir. Malzeme kalınlığının artmasıyla sabit kuvvet etkisiyle elastik şekil değiştirme miktarı ve dolayısıyla geri esneme değerleri de azalmaktadır. Ancak aynı sac kalınlığında hadde yönüne dik yapılan deneylerde geri esnemenin arttığı görülmüştür.

Hadde yönüne dik numunelerde meydana gelen geri esneme miktarlarının, hadde yönüne paralel numunelerden daha az olduğu tespit edilmiştir. Hadde yönünün geri esneme üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Bilindiği gibi, malzemenin tane yapısı küresel yapıdan hadde yönü doğrultusunda yönlendirilmiş ve uzamış tane yapısı şeklinde değişmektedir. Hadde yönündeki kuvvetler altında malzemenin şekil değiştirme davranışları dik doğrultuya nazaran daha kolay olmaktadır. Plastik deformasyondaki bu artış, geri esneme miktarında da orantılı bir artışın meydana gelmesine yol açmaktadır. Diğer yandan, zımba uç radyüs değeri arttıkça geri esnemede artış olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7 – 11'deki grafikler incelendiğinde, malzeme kalınlığının artmasıyla geri esnemenin azaldığı görülmektedir. Oluşturulan polinom eğri grafiklerinde, bükülen malzemelerin geri esneme miktarları görülmektedir. Bu eğri denklemlerinde istenilen değerler yerine koyularak da farklı bükme değerlerinde yapılacak olan deneylerin tahmini de yapılabilmektedir.

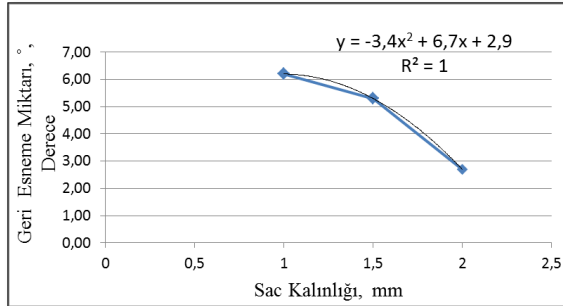
**Şekil 7.** 60° ve R= 4 mm için geri esneme grafiği



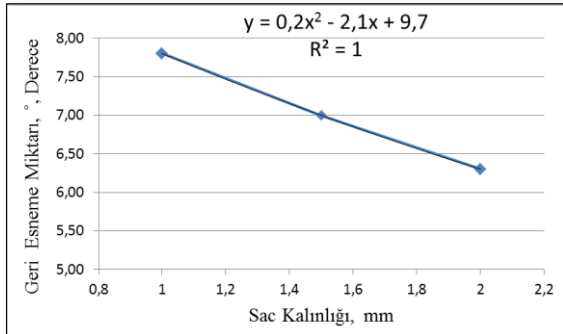
Şekil 8. 90° ve R= 4 mm için geri esneme grafiği



Şekil 9. 120° ve R= 1 mm için geri esneme grafiği



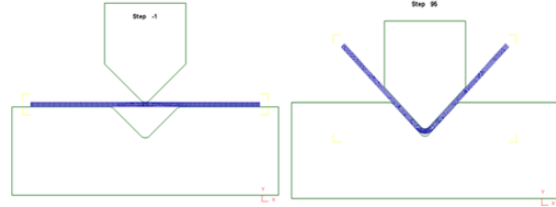
Şekil 10. 120° ve R= 2 mm için geri esneme grafiği



Şekil 11. 120° ve R= 4 mm için geri esneme grafiği

4. Simülasyon Sonuçları

Numunelerin eğilme bölgelerindeki gerilme dağılımlarını belirlemek amacıyla Deform 2D paket programı kullanılmıştır. Şekil 12'de simülasyon işleminin başlangıç ve bitiş durumlarında numune ile zımba arasındaki durum görülmektedir. Sayısal analizlerde AA 2024 malzemesi kullanılmış ve malzeme boyutları numune ölçüleri ile aynı seçilmiştir. Zımba ve matris malzemeleri rijit eleman olarak kabul edilmiştir. Zımba hızı 50 mm/sn olarak belirlenmiştir. Bükme açısının 60° ve 90° olduğu durumlarda numuneler kırıldığından, burada sadece 120° bükme açısı değerlerinde yapılan analiz sonuçları verilmiştir.

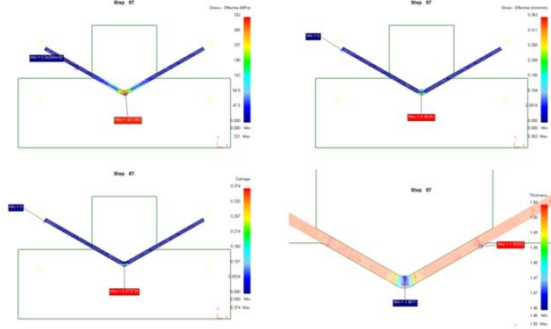


Şekil 12. Simülasyon işlemi

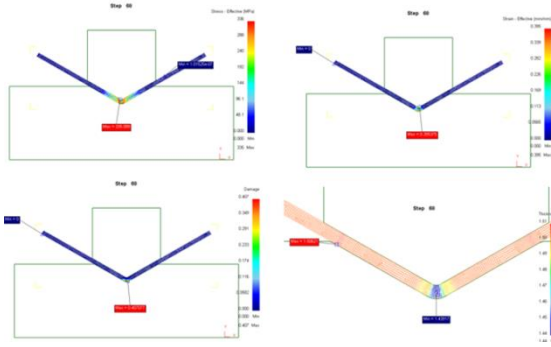
Şekil 13 – 15'te V bükme işleminde bükme açısının 120°, malzeme kalınlığının 1.5 mm ve zımba yarıçapının sırasıyla 1 mm, 2 mm ve 4 mm olduğu durumlarda, gerçekleştirilen analiz sonuçları verilmiştir. Sonuçlarda gerilme, gerinme ve sac kalınlığındaki değişimler görülmektedir.

Zımba yarıçapının 1 mm olduğu numunede, maksimum 335 MPa gerilme altında 0.395 mm bir şekil değişimi meydana gelmiştir. Bükme bölgesinde zımba ile matris arasında malzeme kalınlığı 1.43917 mm olmaktadır. Matris yarıçapı üzerinde ise bu değer 1.50621 mm'dir. Dolayısıyla sac kalınlığında, 0.06080 mm'lik bir incelme meydana gelmiştir. Benzer şekilde zımba yarıçaplarının 2 mm ve 4 mm olduğu numunelerde ise maksimum gerilmeler sırasıyla 321.051 MPa ve 307.219 MPa; şekil değiştirme miktarları ise sırasıyla 0.36341 mm ve 0.231755 mm olmaktadır. Sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, sabit malzeme kalınlığı (1.5 mm) ve bükme açısı değerlerinde (120°); zımba yarıçapının artmasıyla nominal gerilmelerin ve dolayısıyla şekil değiştirme oranlarının azaldığı görülmektedir. Bu durum, artan zımba yarıçapıyla birlikte birim alana etki eden zımba bükme kuvvetlerinin daha

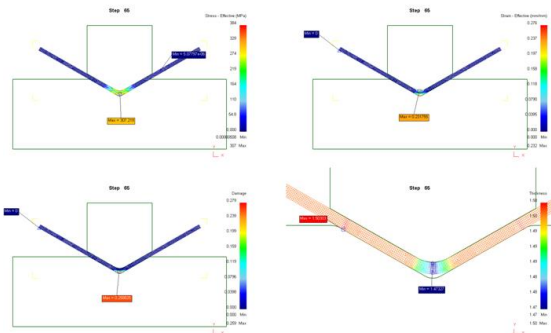
geniş bir alana homojen bir şekilde yayılması ve gerilmelerin yoğunlaşmadan ziyade alana dağılmasıyla ilişkilendirilebilir. Buna bağlı olarak plastik deformasyon ve şekil değiştirme oranları azalmaktadır.



Şekil 13. R=1mm için simülasyon sonucu



Şekil 14. R=2mm için simülasyon sonucu



Şekil 15. R=4mm için simülasyon sonucu

5. Sonuçlar

AA 2024 alüminyum alaşım sac malzemenin V bükme işlemi sonuçları değerlendirildiğinde, malzemenin sac kalınlığı, zımba açısı ve zımba uç yarıçapının geri esnemeyi önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Sac kalınlığının artması ile geri esneme miktarında azalmalar meydana

gelmiştir. Malzemenin hadde yönünün geri esnemeyi etkilediği görülmüş, hadde yönüne dik yapılan bükme işleminde geri esnemenin daha az olduğu tespit edilmiştir. Bükme açısının artması, geri esnemeyi azaltmaktadır. Kullanılan bükme açıları geri esnemeyi doğrudan etkilemiş, 60° ve 90°'lik zımbalarla yapılan deneylerde bükme işlemlerinde kırılma meydana gelmiş, 120° ise istenilen bükme işlemi gerçekleştirilmiştir. Zımba uç yarıçapı geri esnemeyi önemli derecede etkilemiş ve uç yarıçapı arttıkça geri esneme artışı görülmüştür.

6. Kaynaklar

1. Li KP, Carden WP, Wagoner R.H., (2002). Simulation of springback", *International Journal of Mechanical Sciences*, **44**: 103-122.
2. Carden W.D., Geng L.M., Matlock D.K., Wagoner R.H., (2002). Measurement of springback, *International Journal of Mechanical Sciences*, **44**: 79-101.
3. Ataşımşek, S., (1979). Sac Kalıpları", *M.E.B.*, Bursa, 232-337.
4. Ötü, R., Demirci, H.İ., (2012)60°'lik V bükme kalıbında AA 5754 ve AL 1050 Sac Malzemelerin Farklı Bükme Metotları Kullanılarak Geri Esneme Miktarlarının Tespiti, *International Iron & Steel Symposium*, Karabük, 1006-1013
5. Tekaslan, Ö., Gerger N., Şeker., U., (2008). V Bükme Kalıplarında Bakır Sac Malzemelerin Geri Esneme Miktarlarının Tespiti", *Gazi Üniversitesi Müh. Mim.Fak.Der.*, **23**: 201-238.
6. Tekiner, Z., (2004). An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies", *Journal of Materials Processing Technology*, **145**: 109-117
7. Altan, T., Ngaile, G., Palaniswamy, H., (2004). Optimization of blank dimensions to reduce springback in the flexforming process", *Journal of Materials Processing Technology*,: 28-34.
8. Altan, T., Livatyali, H., Kinzel, L., (2003). Computer aided die design of straight flanging using approximate numerical analysis", *Journal of Materials Processing Technology*, **142**: 532-543
9. Tiryaki, A., Şahin, Ş., Kazan, R., Fırat, M., (2006). Sac Metalleri Bükme İşleminde Geri Esneme Açısının Yapay Sinir Ağları İle Kestirimi, *11 th. Conference for computer-Aided Engineering and System Modeling, Metal Forming*, 8-16.
10. Gan, W., Wagoner, R.H., (2004). Die design method for sheet springback, *International Journal of Mechanical Sciences*, **46**: 1097-1113
11. Nilsson, A., Melin, L., Magnusson, C., (1997). Finite-element simulation of V-die bending: a

compariso experimental results, *Journal of Materials Processing Technology*, **65**: 52-58

12. Carden, W.D., Genga, L.M., Matlock, D.K., Wagoner, R.H., (2002). Measurement of springback, *International Journal of Mechanical Sciences*, **44**: 79-101.

13. Mullan, H.B., (2004). Improved prediction of springback on final formed components, *Journal of Materials Processing Technology*, **153-154**: 464-471.

14. Lin, Z., Zhang, L.C., (1997). An analytical solution to springback of sheet metals stamped by a rigid punch and an elastic die, *Journal of Materials Processing Technology*, **63**: 49-54.

15. Moon, Y.H., Kang, S.S., Cho, J.R., Kim, T.G., (2003). Effect of tool temperature on the reduction of the springback of aluminum sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, **132**: 356-368.

16. Chan, W.M., Chew, H.I., Lee, H.P., Cheok, B.T., (2004). Finite element analysis of spring-back of V-bending sheet metal forming processes, *Journal of Materials Processing Technology*, **148**: 15-24.

17. Onate, E., Rojek, J., (1997). Prediction of elastic springback defects in sheet stamping processes using

finite element methods", *Advanced Methods in Material Processing Defects*, 349-359.

18. Lia, K.P., Carden, W.P., Wagoner, R.H., (2002). Simulation of springback, *International Journal of Mechanical Sciences*, **44**: 103-122.

19. Inamdar, M.V., Date, U.B., Desai, U.B., (2000). Studies on the prediction of springback in air vee bending of metallic sheets using an artificial neural network, *Journal of Materials Processing Technology*, **108**: 45-54.

20. Chatti, S., Hermi, N., (2011). The effect of non-linear recovery on springback prediction, *Computers and Structures*, **89**: 1367-1377.

21. Gau, T., Kinzel, L., (2001). An experimental investigation of the influence of the Bauschinger effect on springback predictions", *Journal of Materials Processing Technology*, **108**: 369-375.

22. Toros S., Ece E.R., Öztürk F., Alkan M., (2009). 5754-O Al-Mg Alaşımında Ön Gerilmenin Geri Esnemeye Etkisinin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1-9.