



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Çoklu Bükme Operasyonlarında Şekillendirme Parametrelerinin Geri Yaylanma Üzerine Etkisi

 Murat AYDIN^{a,*},  Esra KALENDER^a,  Mertcan YAKAR^a

^a Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Karabük, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: murataydin@karabuk.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1269339

Öz

Metal şekillendirme operasyonlarında karşılaşılan en önemli problemlerden biri geri yaylanmadır. Şekillendirme uygulamalarında malzeme özellikleri, kalınlık, kalıp tasarımı, proses parametreleri gibi birçok faktörün geri yaylanmanın oluşması üzerinde etkisi bulunmaktadır. Bu çalışmada, kapalı kalıp içerisinde çoklu bükme operasyonuna tabi tutulan 1 mm kalınlıktaki DKP sac malzemenin geri yaylanması üzerinde yağlayıcı, bekleme süresi ve şekillendirme basıncının etkisi incelenmiştir. Şekil verilen sac malzeme üzerinden geri yaylanma açıları, kalınlık dağılımı, majör ve minör birim şekil değişimleri ölçülmüştür. Sonuç olarak, yağlayıcı kullanımının %43-%47 oranında, bekleme süresinin artırılmasının %30-%40 oranında ve şekillendirme basıncının artırılmasının %16-%28 oranında geri yaylanma miktarını azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca, yağlayıcı kullanımı ile sürtünmenin azaltılarak nihai üründe daha düşük incelme elde edildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yağlayıcı, Geri yaylanma, Bükme

Effect of Forming Parameters on Springback in Multi-Bending Operations

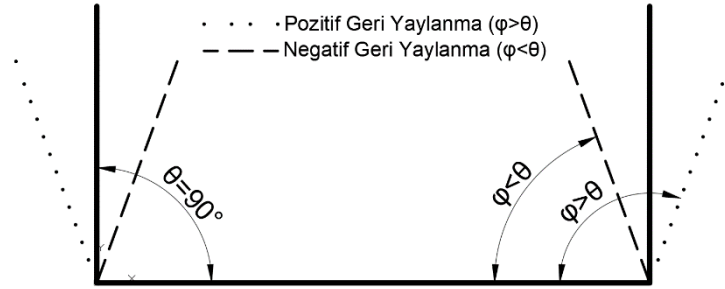
ABSTRACT

Springback is one of the primary phenomena faced in forming metallic sheet materials. Several factors affect the occurrence of springback, such as material properties, thickness, tool design, and process parameters. In this study, the effects of holding time, lubricant, and forming pressure on the springback of DKP sheet material with a 1 mm thickness, which was formed by multi-bending operations in a closed die, were investigated. The springback angles and thickness distributions were measured from the formed parts. In addition, major and minor strains were calculated using grid marking on the surface of sheets. As a result, it was determined that the springback was reduced by about 43%-47% using lubricant, 30%-40% due to an increase in holding time, and 16%-28% thanks to increasing in forming pressure. Besides, less thinning of the final product was achieved by applying lubricant media because of the decrease in friction coefficient.

Keywords: Lubricant, Springback, Bending

I. GİRİŞ

İmalat işlemlerinde, şekillendirme sonrasında nihai geometrinin önceden tahmin edilmesi üretim verimliliği ve maliyet açısından önemlidir. Elastik toparlanmanın meydana getirdiği olumsuz etkiyi ortadan kaldırmak için uygun kalıp ekipmanları tasarımının yapılması gereklidir. Elastik toparlanmanın oluşturduğu olumsuz etki geri yaylanma olarak adlandırılmaktadır [1]. Geri yaylanma imalat endüstrisinde ölçü tamlığını ve üretim verimini doğrudan etkileyen önemli problemlerden biridir. Özellikle alüminyum, magnezyum ve titanyum alaşımların kullanıldığı endüstriyel uygulamalarda, otomotiv, havacılık, uçak ve uzay sanayisi endüstrilerinde sıklıkla karşılaşılmaktadır. Geri yaylanma deformasyon sonrasında iç gerilmenin homojen olmayan dağılımından ötürü meydana gelmektedir [2]. Deformasyon sonrasında kalıntı gerilmelerdeki değişimin, özellikle artış gösteren artık çekme gerilmesi ve azalış gösteren artık basma gerilmesinin malzeme üzerinde geri yaylanmayı azalttığı görülmektedir [3], [4]. Geri yaylanma, özellikle bükme operasyonlarında karşılaşılmaktadır. Geri yaylanma, deformasyon sonrasında kuvvetin ortadan kalkmasıyla malzemenin bir miktar geri esneyerek arzu edilen geometriden uzaklaşmasıdır. Malzemede meydana gelen geri yaylanma, istenilen ölçülerin değişmesine ve üretim kalitesine olumsuz etki etmektedir [5]. Şekillendirme işlemi sonucunda zımba tarafından uygulanan kuvvetin ortadan kalkması ve sac malzemede oluşan gerilmeler sebebiyle, geri yaylanma pozitif veya negatif olabilmektedir [6]. Şekil 1'de pozitif ve negatif geri yaylanma durumları gösterilmiştir.



Şekil 1. Pozitif ve negatif geri yaylanma durumları [6].

İmalat endüstrisinde geri yaylanmanın engellenmesi veya minimize edilmesi için farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden biri sonlu elemanlar metodu kullanılarak tasarım aşamasında geri yaylanmanın tahmin edilmesi ve bu yönde kalıp tasarımının yapılmasıdır [7]. Diğer yandan, sac malzemenin mekanik özelliklerinin, özellikle elastikiyet modülü ve pekleşmenin geri yaylanma üzerinde etkisi olduğu, kullanılacak olan malzemeye uygun kalıp tasarımının yapılmasının gerektiği bildirilmiştir [8]. Buna ek olarak, geri yaylanmanın telafi için en yaygın kullanılan yöntemlerden birisi aşırı bükme işlemidir. Geri yaylanma miktarının önceden tahmin edilmesi ve buna göre bükme açısından daha yüksek bükme işlemine tabi tutulması olarak tanımlanmaktadır [9]. Ayrıca manyetik itme kuvvetinin yardımı ile geri yaylanmanın kontrol altında tutulduğu belirtilmektedir. Zımba içerisine uygun yalıtım kullanılarak montaj edilen manyetik sarımlı parça, manyetik itme kuvveti oluşturmakta ve özellikle alüminyum parçaların şekillendirme performansını artırırken, geri yaylanmanın kontrol altında tutulduğu belirtilmektedir. Bu yöntemin, uygulaması zor, kalın parçalar için uygun olmadığı ve maliyeti dezavantajları arasında sayılmaktadır [10]. Ayrıca, şekillendirme sırasında malzeme sıcaklığının artırılmasının, özellikle U ve V bükme kalıplarında, şekillendirme kuvvetinin azalması, kalıp içerisinde soğumaya tabi tutularak geri yaylanma miktarının azalmasına olumlu katkı yaptığı görülmektedir [11]. Diğer yandan, şekil verilen malzemenin kalıp içerisinde bekletilmesi (ütüleme süresi) geri yaylanmanın azaltılması için uygulanan yöntemler arasındadır. Bekleme süresinin 10 saniye artmasıyla sac malzemenin türüne bağlı olarak geri yaylanmada ortalama %14,8 ile % 9,7 arasında azalma olduğu belirtilmektedir [12].

Literatürde yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, geri yaylanmanın önlenmesi ve minimize edilmesi için V ve U bükme gibi açık kalıp sistemli şekillendirmelerin yapıldığı, çoklu bükme işleminin kapalı

kalıp altında şekillendirmesine yönelik çalışmaların sınırlı sayıda olduğu, şekillendirme esnasında yağlayıcı ve bekleme süresinin kullanıldığı şekillendirme çalışmaları sınırlı sayıda yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmada, düşük karbonlu sac malzemenin kapalı kalıp altında tek operasyonda çoklu bükme işlemiyle şekillendirilmesinde yağlayıcı ve bekleme süresinin, şekillendirme performansı ve geri yaylanmaya olan etkisi incelenmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

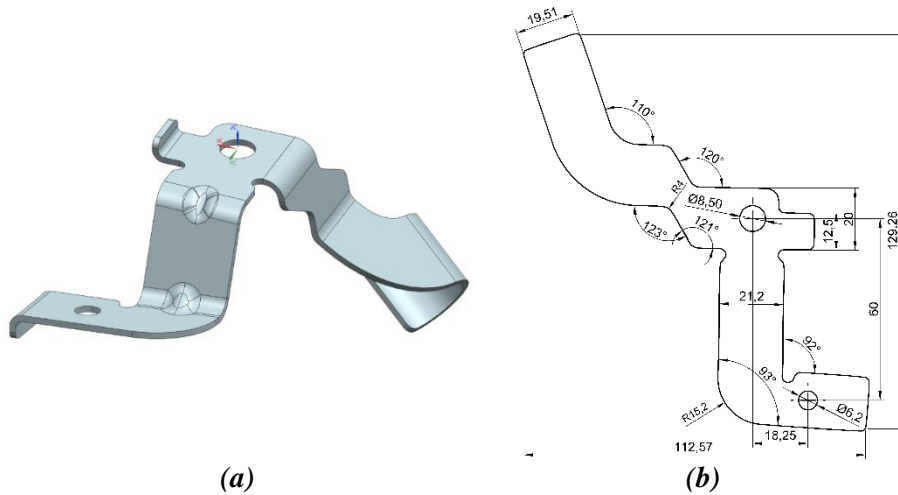
Bu çalışmada, soğuk şekillendirmeye uygun düşük karbonlu 1 mm kalınlıkta DKP sac malzeme kullanılmıştır. DKP saclar, dayanıklı olmaları, yüksek mukavemetleri, kolay şekillenebilmeleri ve derin çekmeye uygun olmaları sebebiyle otomotiv sanayisinde, endüstriyel mutfak ve havalandırma ekipmanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [13]. Tablo 1’de DKP sac malzemeye ait kimyasal özellikler, Tablo 2’de ise mekanik özellikler verilmiştir [14]. Üretimi yapılacak braket parçasının nihai şekli Şekil 2 (a)’da gösterilmiştir. Braket parçası kapalı kalıp altında birden çok bükme operasyonunun tek seferde gerçekleştirildiği bir endüstriyel parçadır. Şekil 2 (b)’de parçanın üretim öncesi açınım boyu ve ölçüleri verilmiştir. Bükme operasyonları sonucunda meydana gelen geri yaylanmanın önlenmesi ve en aza indirgenmesi için, şekillendirme operasyonlarında yağlayıcı, bekleme süresi ve kalıplama basıncı parametreleri kullanılarak 5 tekrar olacak şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. Yağlayıcı olarak endüstride yaygın olarak kullanılan yarı katı gres yağı kullanılmıştır.

Tablo 1. DKP sac malzemeye ait kimyasal özellikler [14].

% ağırlık			
C	P	S	Mn
(maks.)	(maks.)	(maks.)	(maks.)
0,12	0,045	0,045	0,60

Tablo 2. DKP sac malzemeye ait mekanik özellikler [14].

Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Uzama
(N/mm^2)	(N/mm^2)	(%)
280	270-410	28



Şekil 2. (a) Nihai şekil verilmiş parça, (b) açınım boy ve ölçüleri.

Şekillendirilen parçalar üzerinde meydana gelen birim şekil değişimlerinin ölçümü için başlangıç parçaları üzerine lazer ızgaralama yöntemi ile 2x2 mm ebatlarında kare ızgara elemanlar oluşturulmuştur. Lazer ızgaraların şekil değişimi sonrasında alacakları nihai şekilleri ölçülerek, parçaları

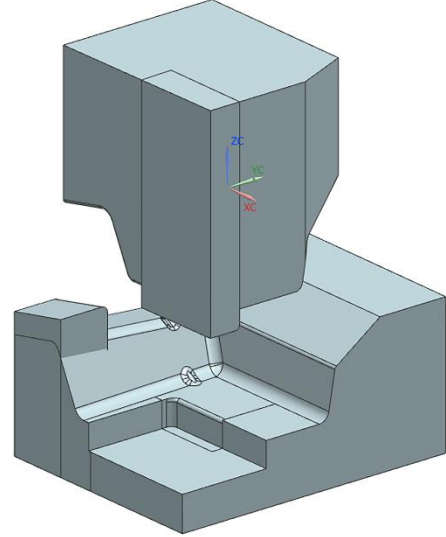
üzerinde meydana gelen birim şekil değişimleri belirlenmektedir. Şekil 3 (a)'da lazer ızgara oluşturulmuş parçalar, Şekil 3 (b)'de şekillendirme için kullanılan kalıbın açık hali verilmiştir. Birim şekil değişimlerinin ölçülmesi için bükme operasyonu Tablo 3'de verilen parametreler kullanılarak 5 tekrar şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. Şekillendirme deneylerinde kullanılan parametreler.

Yağlayıcı	Bekleme Süresi (sn)	Şekillendirme Basıncı (bar)
Gresli ve Gresiz	0 ; 10	50 ; 100



(a)



(b)

Şekil 3. (a) Lazer ızgara bölünmüş numuneler, (b) şekillendirme kalıbı açık hali.

Şekillendirme deneyleri 30 ton hidrolik pres kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 50 bar ve 100 bar basınç altında şekillendirme deneyleri yapılmıştır. Kalıp alt plakası pres tablasına pabuçlar yardımıyla bağlanmış ve kalıp üst plakası pres koç başına zimba aparatı ile bağlanmıştır. Hidrolik pres manuel kumandalı olup, şekillendirme basıncına ulaşıldığında deneyler sonlandırılmıştır. Şekil 4 (a)'da kullanılan hidrolik pres, Şekil 4 (b)'de açınım halindeki ızgara çizilmiş sac malzeme, şekillendirme öncesi kalıp üzerine yerleşimi ve kalıbın prese bağlanmış hali gösterilmiştir.



(a)

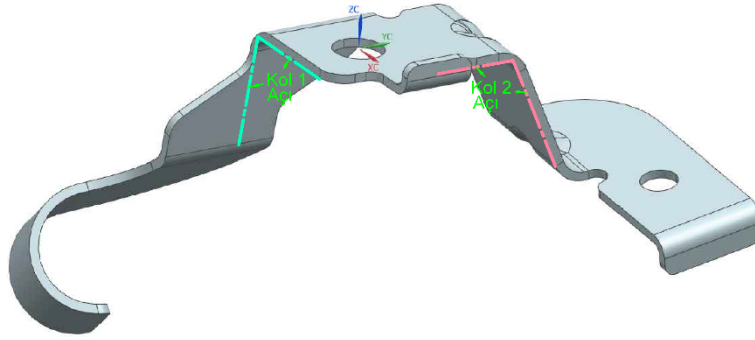


(b)

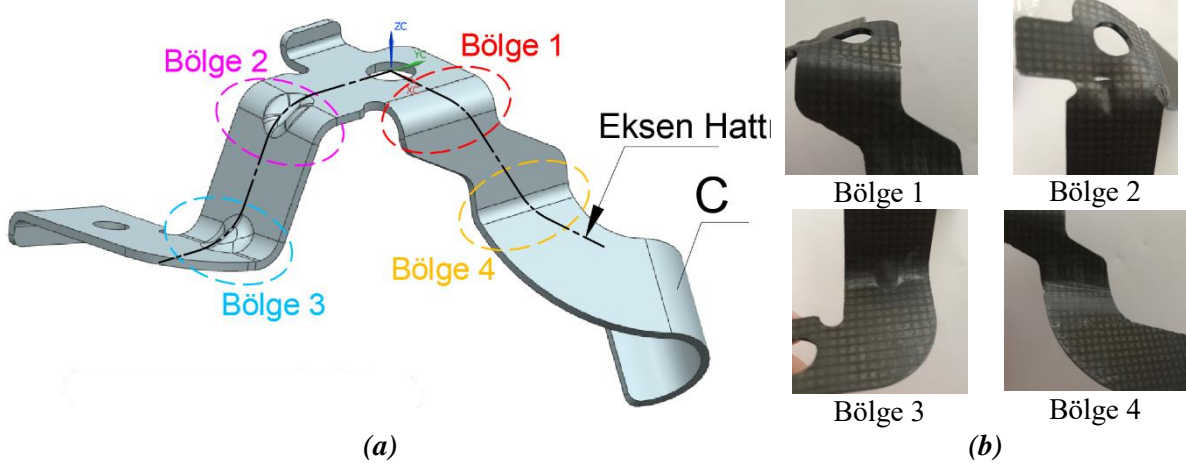
Şekil 4. (a) Hidrolik pres, (b) Bükme kalıbı yerleşimi ve pres bağlantısı.

III. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Şekillendirme işlemi sonucunda üretimi yapılacak parça üzerinde Kol 1 ve Kol 2 olarak gösterilen bölgeler farklı açı değerlerine sahiptir. Şekil 5’de nihai parça üzerinde kollar gösterilmiştir. Ayrıca birim şekil değişimlerinin ölçülmesi için bükme operasyonları bölgelere ayrılmış olup Şekil 6 (a)’da bu bölgeler ve birim şekil değişimlerinin ölçüldüğü eksen hattı ve Şekil 6 (b)’de örnek parça üzerinde bu bölgeler verilmiştir. C ile gösterilen kenar kıvrırma operasyonu bükme operasyonlarından sonra yapılan bir operasyon olup, çalışma kapsamında değerlendirmeye alınmamıştır. Nihai parça üzerinde kol açıları hassasiyeti ± 5 dk olan Mitutoyo üniversal açı ölçer ile ölçülmüştür. Üretimi yapılan parça üzerinde anma ölçüsü Kol 1 için 100° ve Kol 2 için 116° olarak tasarlanmıştır. Tablo 4’de deney tekrarlarından açı ölçer ile ölçülen kol açılarının ortalama değerleri verilmiştir.



Şekil 5. Nihai parça üzerinde kol açıları.



Şekil 6. (a) Nihai parça üzerinde bölgeler ve eksen hattı, (b) örnek parça üzerinde bölgeler.

Üretilen nihai parçanın tasarım aşamasında Kol 1 açısının 100° , Kol 2 açısının 116° olması hedeflenmiştir. Tablo 4’de görüldüğü üzere en yüksek geri yaylanma miktarı Kol 1 açısı için $9,43^\circ$, Kol 2 açısı için $7,91^\circ$ olarak elde edilmiştir. Diğer yandan en küçük geri yaylanma miktarı Kol 1 açısı için $2,74^\circ$, Kol 2 açısı için $1,48^\circ$ olarak ölçülmüştür. Kol 1 ve Kol 2 açılarının kendi aralarında karşılaştırılmasında, bütün şekillendirme deneyleri için Kol 1 açısının geri yaylanma miktarı Kol 2 açısından daha fazla olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalarda, kalıp açısının artmasıyla geri yaylanmanın azaldığı, bükme açısının artmasıyla malzeme yüzeyinde şekil değişimine uğrayan bölge ve uzama miktarının artması sonucunda olduğu bildirilmiştir [15] [5].

Tablo 4. Şekillendirme parametrelerine bağlı olarak ortalama kolların açıları.

Yağlayıcı	Bekleme Süresi (sn)	Basınç (bar)		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	Deney Ortalaması (derece)	Geri Yaylanma Miktarı (derece)
Gressiz	0	50	Kol 1	108,64	108,57	109,56	110,73	109,65	109,43	9,43
Gressiz	0	50	Kol 2	124,37	124,21	123,29	124,22	123,46	123,91	7,91
Gressiz	0	100	Kol 1	107,33	106,81	107,88	106,34	107,58	107,19	7,19
Gressiz	0	100	Kol 2	121,70	121,78	121,73	121,78	121,37	121,67	5,67
Gressiz	10	50	Kol 1	106,25	106,08	106,28	106,13	105,48	106,04	6,04
Gressiz	10	50	Kol 2	119,82	120,66	120,11	120,67	120,78	120,41	4,41
Gressiz	10	100	Kol 1	104,33	104,96	104,20	105,44	105,21	104,83	4,83
Gressiz	10	100	Kol 2	118,57	119,41	118,99	119,41	120,24	119,32	3,32
Gresli	0	50	Kol 1	105,54	105,47	105,43	105,60	104,44	105,30	5,30
Gresli	0	50	Kol 2	120,24	119,41	119,82	121,08	120,24	120,16	4,16
Gresli	0	100	Kol 1	104,87	104,65	103,86	104,48	104,33	104,44	4,44
Gresli	0	100	Kol 2	119,41	119,82	118,57	118,99	119,41	119,24	3,24
Gresli	10	50	Kol 1	103,41	104,25	103,55	103,58	104,44	103,85	3,85
Gresli	10	50	Kol 2	119,41	117,74	119,41	117,74	118,57	118,57	2,57
Gresli	10	100	Kol 1	102,16	103,35	102,38	102,47	103,32	102,74	2,74
Gresli	10	100	Kol 2	117,74	116,90	117,74	117,32	117,74	117,48	1,48

Bekleme süresi açısından incelendiğinde, gressiz 0 saniye bekleme süreli 100 bar basınçlı şekillendirme deneyinde Kol 1 açısı için geri yaylanma miktarı 7,19°, Kol 2 açısı 5,67° olarak ölçülürken, bekleme süresinin 10 saniyeye artırılmasıyla sırasıyla Kol 1 açısı için 4,83°, Kol 2 açısı için 3,32° geri yaylanma miktarı ölçülmüştür. Buradan, bekleme süresinin 10 saniyeye artırılmasıyla geri yaylanma miktarında %30 ile %40 oranında azalma olduğu görülmüştür. Genel olarak, bütün şekillendirme deneylerinde bekleme süresinin artırılmasıyla geri yaylanma miktarında azalma olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda, bekleme süresinin artırılmasının geri yaylanmayı azaltıcı etkisi olduğu, zımbanın bükülen malzeme üzerinde kaldığı süre boyunca malzeme içerisindeki elastik gerilmelerin azaldığı ve kalıcı gerilmelerin arttığı bildirilmiştir [12].

Şekillendirme basınçları açısından karşılaştırıldığında, gressiz 0 saniye bekleme süreli 50 bar basınçlı şekillendirme deneyinde Kol 1 açısı için geri yaylanma miktarı 9,43°, Kol 2 açısı için 7,91° olarak ölçülürken, şekillendirme basıncı 100 bara artırıldığında Kol 1 açısı için geri yaylanma miktarı 7,19°, Kol 2 açısı için 5,67° olarak belirlenmiştir. Ayrıca, gresli 0 saniye bekleme süreli 50 bar basınçlı şekillendirme deneyinde Kol 1 açısı için geri yaylanma miktarı 5,30°, Kol 2 açısı için 4,16° olarak ölçülürken, şekillendirme basıncı 100 bara artırıldığında Kol 1 açısı için geri yaylanma miktarı 4,44°, Kol 2 açısı için 3,24° olarak tespit edilmiştir. Buradan, şekillendirme basıncının artırılmasıyla geri yaylanma miktarının yaklaşık %16 ile %28 arasında azaldığı görülmüştür. Genel olarak, yapılan deneylerde şekillendirme basıncının artırılmasıyla geri yaylanma miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda, metal şekillendirme uygulamalarında şekillendirme kuvveti ve baskı plakası kuvvetinin artmasıyla geri yaylanma miktarının azaldığı bildirilmiştir [16] [17].

Yağlayıcının etkisi kıyaslandığında, gressiz 0 saniye bekleme süreli 50 bar basınçlı şekillendirme deneyinde Kol 1 açısı için geri yaylanma miktarı 9,43°, Kol 2 açısı için 7,91° olarak ölçülürken, gresin kullanıldığı 0 saniye beklemeli 50 bar basınçlı şekillendirme deneyinde Kol 1 açısı için 5,30°, Kol 2 açısı için 4,16° olarak ölçülmüştür. Buna bağlı olarak, yağlayıcının kullanımı ile geri yaylanma miktarında %43 ile %47 oranında azalma olduğu görülmüştür. Genel olarak, bütün şekillendirme deneylerinde yağlayıcının kullanılmasıyla her iki kol açısında meydana gelen geri yaylanma miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Zimba-sac, sac-kalıp ara yüzeylerinde kullanılan yağlayıcının ve yağlama

teknikinin bükme operasyonları için önemli bir faktör olduğu, gres tipi yağlayıcının iyi yapışma özelliğinden dolayı geri yaylanmayı azalttığı bildirilmiştir [18].



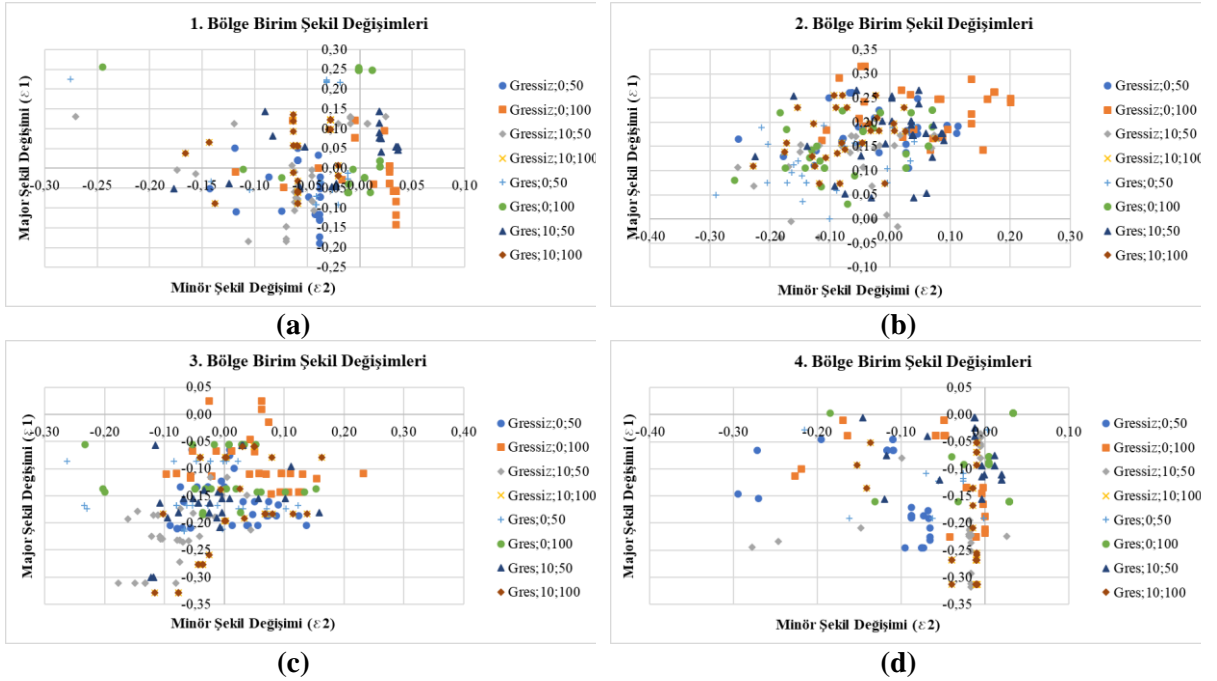
Şekil 7. Deforme olan kare ızgara ölçümü [19].

Nihai şekil verilen parça üzerinden Kol 1 ve Kol 2 üzerinde yer alan Şekil 6'da gösterilen eksen hattı boyunca birim şekil değişimleri ölçülmüştür. Birim şekil değişimleri kalibrasyon ölçeği kullanılarak dijital mikroskop ile bilgisayar üzerinden ölçülmüştür. Şekil 7'de gösterildiği gibi deforme olan kare ızgara eleman üzerinden majör birim şekil değişimi (ϵ_1) ve minör şekil değişimi (ϵ_2),

$$\epsilon_1 = \ln \frac{l_1}{d} \quad (1)$$

$$\epsilon_2 = \ln \frac{l_2}{d} \quad (2)$$

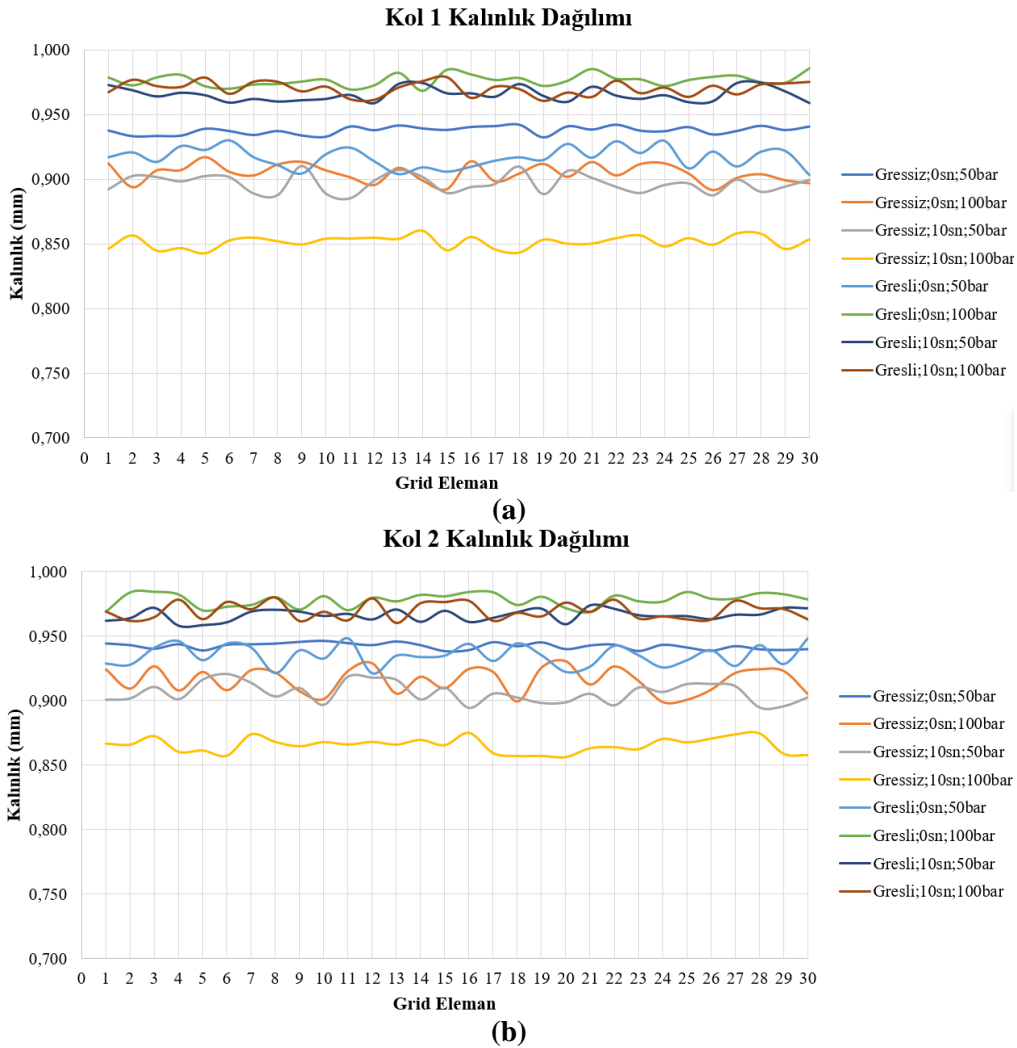
Olarak hesaplanmaktadır. Eş. 1 ve Eş. 2'de l_1 deforme olan kare ızgaranın büyük eksen uzunluğu, l_2 deforme olan kare ızgaranın küçük eksen uzunluğu, d ise kare ızgaranın başlangıçtaki kenar uzunluğunu (2 mm) temsil etmektedir [19]. Şekil 8'de nihai parça üzerinden belirlenen bölgelere ait majör ve minör birim şekil değişimleri grafikleri verilmiştir.



Şekil 8. (a) 1. bölge, (b) 2. bölge, (c) 3. bölge, (d) 4. bölge majör ve minör birim şekil değişim dağılımları.

Nihai parça yüzeyi üzerinde, çoklu bükme operasyonu süresince 1. ve 2. bölgelerin çekmeye, 3. ve 4. bölgelerin basmaya maruz kaldığı görülmektedir. Buna paralel olarak, Şekil 8 (a) ve Şekil 8 (b)'de bölgelerin çekmeye maruz kalmasından dolayı majör birim şekil değişimlerinin 1. bölge ve 2. bölge ağırlıklı olarak pozitif bölgede yüksek olduğu görülmektedir. Majör birim şekil değişiminin 1. bölge için 0,25, 2. bölge için 0,32 değerlerine çıktığı görülmektedir. Diğer yandan, Şekil 8 (c) ve Şekil 8 (d)'de görüldüğü üzere, parça yüzeyinin basmaya maruz kalmasından dolayı majör birim şekil değişiminin negatif değerlere kadar düştüğü belirlenmiştir. Majör birim şekil değişiminin 3. bölge için -0,35, 4. bölge için -0,32 değerlerine kadar azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde yağlayıcı kullanımı ve şekillendirme basıncının artmasıyla çekmeye maruz kalan 1. ve 2. bölgelerde majör birim şekil değişiminin arttığı, basmaya maruz kalan 3. ve 4. bölgelerde majör birim şekil değişiminin azaldığı belirlenmiştir. Bu değişimin, yağlayıcı kullanılmasıyla daha homojen deformasyon elde edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer yandan, bekleme süresinin majör ve minör birim şekil değişimleri üzerinde etkisinin neredeyse olmadığı görülmüştür. Bu bağlamda, zimba-sac malzeme ve sac malzeme-kalıp ara yüzeylerinde yapılan iyi bir yağlamanın temas basıncının daha iyi olmasına, yüzey kalitesinin arttığına ve daha homojen birim şekil değişiminin elde edilmesine sebep olduğu bildirilmektedir [20].

Nihai parça üzerinden Kol 1 ve Kol 2 üzerinden kare ızgara uygulanmış numunelere hizalı olarak, 30 noktadan kalınlık ölçümü $\pm 0,001$ mm hassasiyetli dijital mikrometre ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 9 (a)'da Kol 1'e ait kalınlık dağılımı, Şekil 9 (b)'de Kol 2'ye ait kalınlık dağılımı grafikleri verilmiştir.



Şekil 9. (a) Nihai parça Kol 1 üzerinden kalınlık dağılımı, (b) Nihai parça Kol 2 üzerinden kalınlık dağılımı.

Şekil 9 (a) ve Şekil 9 (b) incelendiğinde, minimum kalınlık Kol 1 için 0,8428 mm, Kol 2 için 0,8564 mm olarak elde edilmiştir. En düşük kalınlık değerinin gressiz 10 saniye bekleme süreli 100 bar şekillendirme basınçlı deneylerde her iki kol parçası için elde edildiği görülmüştür. Diğer yandan, gressin kullanıldığı şekillendirme deneylerinde başlangıç kalınlığı olan 1 mm kalınlık değerine daha yakın kalınlık değerinin elde edildiği, yağlayıcı kullanımı ile daha homojen kalınlık dağılımının elde edildiği belirlenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, sac şekillendirme işlemlerinde baskı plakası-sac malzeme, sac malzeme-kalıp, zımba-sac malzeme arayüzlerinde yağlayıcı kullanımı ile sürtünme katsayısının azaldığı, buna bağlı olarak sac malzemede meydana gelen incelmeye azaldığı bildirilmiştir [21].

IV. SONUC

Bu çalışmada, kapalı kalıp altında çoklu bükme operasyonları ile üretilen braket elemanının geri yaylanma karakteristiği üzerine yağlayıcı ve bekleme süresinin etkisi incelenmiştir. DKP sac malzeme şekillendirme öncesi lazer ile kare ızgara uygulama işlemine tabi tutulmuş, şekillendirme operasyonları sonucunda geri yaylanma açıları, birim şekil değişimleri ve kalınlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda;

- En yüksek geri yaylanma miktarı $9,43^\circ$ ve $7,91^\circ$ olarak gres kullanılmayan 0 saniye bekleme süreli 50 bar şekillendirme basınçlı bükme operasyonlarında elde edilirken, en düşük geri yaylanma miktarı ise $2,74^\circ$ ve $1,48^\circ$ gresli 10 saniye bekleme süreli 100 bar şekillendirme deneylerinden elde edilmiştir.
- Deneylerde kullanılan bekleme süresinin 10 saniyeye arttırılmasıyla, geri yaylanma açılarında %30 ile %40 oranında azalma olduğu görülmüştür.
- Şekillendirme deneylerinde basıncın 50 bardan 100 bara arttırılmasıyla, geri yaylanma miktarında %16 ile %28 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir.
- Gres yağlayıcı kullanılan şekillendirme deneylerinin sonucunda, geri yaylanma miktarında %43 ile %47 oranında azalma olduğu belirlenmiştir.
- Majör birim şekil değişimleri açısından karşılaştırma yapıldığında, çekmeye maruz kalan yüzeylerde yağlayıcı kullanımı ve şekillendirme basıncını artışının, birim şekil değişimini arttırdığı, basmaya maruz kalan yüzeylerde ise azalttığı görülmüştür. Özellikle yağlayıcı kullanımı ile homojen deformasyon elde edildiği tespit edilmiştir.
- Kalınlık dağılımları açısından yağlayıcı kullanımının, şekillendirme basıncının artışının ve bekleme süresinin arttırılmasının daha homojen kalınlık dağılımı elde edilmesini sağladığı ve sac malzeme üzerinde incelmeyi azalttığı gözlemlenmiştir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde bükme kalıbının kullanılmasına imkan tanıyan, her türlü katkıları ve desteklerini esirgemeyen Ket İnovasyon Metal İmalat Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi teşekkürlerimizi sunarız.

V. KAYNAKLAR

[1] D-K. Leu, “A simplified approach for distinguishing between spring-back and spring-go in free U-die bending process of SPFC 440 sheets”, *Materials and Design*, vol. 94, pp. 314-321, 2016.

[2] Y. Feng, S. Shi, Z. Wang, and Z. Wang, “Research on mechanism of springback control by viscous medium with different mechanical properties”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 304, pp. 1-16, 2022.

[3] I. Altpeter, M. Kopp, M. Kröning, B.-A. Behrens, M. Milch, and C. Schäffner, “Influences on the part quality in conventional deep drawing processes”, *9th European Conference on Nondestructive Testing*, 2006, pp. 1-8.

- [4] G. Brabie, B. Chirita, N. Nanu, and V. Ciubotariu, "Analysis of the springback and residual stresses generated by cold plastic forming in drawn round parts made from steel sheets", *Metalurgia International*, vol. 14, no. 12, pp. 21-27, 2009.
- [5] A. Işıktaş ve İ. Ay, "Farklı kalınlıklardaki Dkp sacın farklı açılarda yapılan V-bükme işlemindeki geri esnemelerinin incelenmesi", *BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 17, s. 1, ss. 59-69, 2015.
- [6] A. Chanda, and D. Bhattacharyya, "A parametric study to minimise spring-back while producing plywood channels", *Journal of Cleaner Production*, vol. 304, pp. 1-11, 2021.
- [7] K. Chung, M.-G. Lee, D. Kim, C. Kim, M. L. Wenner, and F. Barlat, "Spring-back evaluation of automotive sheets based on isotropic-kinematic hardening laws and non-quadratic anisotropic yield functions Part I: theory and formulation", *International Journal of Plasticity*, vol. 21, no. 5, pp. 861-882, 2005.
- [8] S. L. Zang, J. Liang, and C. Guo, "A constitutive model for spring-back prediction in which the change of Young's modulus with plastic deformation is considered", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 11, pp. 1791-1797, 2007.
- [9] J. Wang, S. Verma, R. Alexander, and J.-T. Gau, "Springback control of sheet metal air bending process", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 10, no. 1, pp. 21-27, 2008.
- [10] X. Cui, Z. Zhang, Z. Du, H. Yu, D. Qiu, Y. Cheng, and X. Xiao, "Inverse bending and springback-control using magnetic pulse forming", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 275, no. 1-13, 2020.
- [11] B. Liu, F. Cao, Y. Zeng, and W. Wu, "Numerical and experimental study on temperature and springback control of U-shape titanium extrusion hot stretch bending", *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 5, no. 4, pp. 453-469, 2022.
- [12] K. Aydın ve İ. Karaağaç, "DP600 ve HSLA300 sac malzemelerde geri esneme davranışlarına proses parametrelerinin etkisinin deneysel araştırılması", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 7, s. 3, ss. 1456-1465, 2019.
- [13] ESN Demir Çelik Yapı. (2023). *DKP Sac*. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.esnmetal.com/dkp-sac-fiyatlari/>
- [14] ERDEMİR. (2017). *Ürün Kataloğu 2017*. [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.erdemir.com.tr/Site/s/1/upload/files/Urun_Katalogu-2017-1269.pdf
- [15] L. Sayın ve G. Basmacı, "Bakır sac levhaların 'V' bükme yöntemi ile şekillendirilmesiyle oluşan geri esneme miktarının deneysel olarak incelenmesi", *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, c. 11, s. 3, ss. 147-154, 2019.
- [16] E. Esener ve M. Fırat, "Metal şekillendirme prosesi üzerinden geri esneme telafi yöntemlerinin incelenmesi", *16th International Conference on Machine Design and Production*, İzmir, Türkiye, 2014, ss. 1-7.
- [17] R. K. Lal, V. K. Choubey, J. P. Dwivedi, and S. Kumar, "Study of factors affecting springback in sheet metal forming and deep drawing process", *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, pp. 4353-4358, 2018.
- [18] R. Narayanasamy and P. Padmanabhan, "Influence of lubrication on springback in air bending process of interstitial free steel sheet", *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 19, pp.

246-251, 2010.

[19] P. Wankhede, S. Kodey, S. Kurra, and S. Radhika, "A low cost surface strain measurement system using image processing for sheet metal forming applications", *Measurement*, vol. 187, pp. 1-14, 2022.

[20] L. M. V. Tigrinho, R. A. dos Santos, R. A. C. Filho, and P. V. P. Marcondes, "Experimental investigation on the influence of the lubricant type in the punch stretching of extra deep-drawing steel", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 30, no. 4, pp. 290-294, 2008.

[21] H. Zein, M. El-Sherbiny, M. Abd-Rabou, and M. El Shazly, "Effect of die design parameters on thinning of sheet metal in the deep drawing process", *American Journal of Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 20-29, 2013.