

S355JR (ST52) Sac Malzemenin Bükülmesinde Geri Yaylanma Davranışının İncelenmesi

İbrahim BUTGÜL ¹, Gültekin Basmacı ^{2*}, Levent SAYIN ³

¹Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, BURDUR

^{2*}Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği, BURDUR

³Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, BURDUR

(Alınış / Received: 15.08.2023, Kabul / Accepted: 20.11.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 12.12.2023)

Anahtar Kelimeler

Plastik şekil verme,
Sac levha,
V büküm,
Geri yaylanma.

Öz: Sac metal kalıpları kullanılarak üretimi gerçekleşen parçalar endüstride geniş bir alanda kullanılmaktadır. Tercih edilen uygulama alanlarından birisi de büküm işlemleri kalıpcılıktır. Sac metal levhalara ait kalıplar kullanılarak gerçekleştirilen şekillenme işleminde başlıca görülen sorun geri yaylanmadır. V büküm işlemi kullanılarak oluşan geri yaylanmalara bakıldığında, kalınlıkları farklı olan malzemelerde, değişik açılardaki oluşan geri yaylanma tutarını gösteren grafiklerin eksik olduğu tespit edilmektedir. Çalışmalar sırasında oluşan geri yaylanma miktarlarını tespit etmek için yapılan V büküm kalıbı ve deney malzemesi olarak S355JR (ST52), sac metal levhada işlem yapılmıştır. Kalınlığı 2 ve 3 mm örnekler 60, 90 ve 120 dereceden oluşan kalıp açıları kullanılarak ve işleme alınan her bir açı için büküm radyüsü 2 mm ve 4 mm değerindekiler kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deneylerin sonrasında numune ürünlerin geri yaylanma miktarlarını tespit edebilmek amacıyla dijital ölçüm cihazından yararlanılmıştır. Deneylerden elde edilen deney sonuçlarının belirli parametrelere göre karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda S355JR (ST52) sac levhada geri yaylanma gözlemlenmiştir. Büküm kalıp açısı yükseldikçe geri yaylanmanın azaldığı izlenmiştir. Sac levha kalınlığının artmasıyla geri yaylanma miktarının düştüğü ve büküm radyüsü yükseldikçe geri yaylanmanın arttığı belirlenmiştir.

Experimental Investigation of Springback Behavior in the Bending of S355JR (St52) Sheet Materials

Keywords

Plastic shaping,
Sheet metal,
V-bending,
Springback.

Abstract: The parts produced using sheet metal molds are used in a wide range of industries. Twisting molding is also a preferred application. The main problem seen in the shaping process performed using molds belonging to sheet metal sheets is back springing. When we look at the springbacks created by using the V bending process, it is determined that the graphs showing the amount of springback at different angles are missing in materials with different thicknesses. In order to determine the amount of back spring formed during the studies, the V bending mold and S355JR (ST52) sheet metal plate were processed as experimental material. The experiments were carried out using mold angles of 60, 90 and 120 degrees for 2 and 3 mm thick specimens and bending radii of 2 mm and 4 mm for each angle machined. After the experiments, a digital measuring device was used to determine the amount of springback of the sample products. Comparisons of the experimental results obtained from the experiments were made according to certain parameters. As a result of the experiments, springback was observed in the S355JR (ST52) sheet metal. It has been observed that the springback decreases as the bending mold angle increases. It was determined that the amount of springback decreased with the increase of the sheet metal thickness, and the springback increased as the bending radius increased. Two situations have been observed. First observation; As the sheet metal thickness increases, the amount of springback decreases. Second observation; The higher the bending radius, the greater the springback.

*İlgili Yazar, email: gbasmaci@mehmetakif.edu.tr

1. Giriş

Sanayi sektöründe kendisine pek çok alanda kullanım bulan sac levhalar, karbon oranı yüksek elementlerden elde edilirler. Düzgün bir yüzeye sahip olup pürüzsüzdür. Yassı veya rulo halde bulunan sac levha malzemeler kullanım yerine göre çeşitli kalınlıklarda ve ebatlarda olabilirler. Haddelenmiş ürünlerin arasında yer alıp ve geniş alanlarda tercih edilirler. Levha sac üretimde daha kolay imalatı olduğundan dolayı ayrıca kullanım rahatlığı ve mukavemeti ile endüstriyel farklı kullanım alanlarına sahipler. Sac metaller endüstriyel ürünler, otomotiv, mutfak eşyaları, elektronik parçalar, savunma sanayi, havacılık sanayisinde vb. yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sac metallerin günümüzde farklı işleme yöntemleri mevcuttur. Endüstriyel de sac levhalar çoğunlukla büküm kalıpcılığı ile hammadde, yarı mamul hale getirilir. Endüstriyel kalıpcılığın uygulama alanlardan biriside büküm kalıpcılığıdır. Sac metal levhaların kalıpla şekil verilmesi esnasında geri yaylanma karşılaşılan sorunlardan birisidir. Büküm işlemi esnasında malzemenin davranışında değişiklikler meydana gelebilmektedir. Malzeme üstünden büküm kuvveti geri alındığı zaman, sac metal levha bir miktar şekil değişmesi ve eski haline geri dönme olayına geri yaylanma olarak bilinmektedir.

Forcellese vd. 1998 [5] yılında yapmış olduğu çalışmada, büküm kuvveti V büküm metodunda geri yaylanmaya tesirleri incelemişlerdir. Çalışmalarda; büküm kuvveti yanında, büküm radyüsü ve geri yaylanmaya olan etkileri gözlemlemişlerdir. Büküm radyüsü arttığında geri yaylanmanın yükseldiği, düşük olması durumun da ise geri yaylanmanın düştüğü tespit edildiği belirtilmiştir.

Chan vd. 2004 [4] yılında yapmış olduğu, V büküm kalıbıyla yaptıkları deneylerde geri yaylanmanın tesirlerini incelemişlerdir. Alüminyum AL2024-T3 sac metal levha malzemesini kullanarak, değişik kalıp açılarında ve büküm radyüsleri üzerinde çalışmaları incelemişlerdir. Yapılan bu çalışmalarında Abaqüs ve Patran yazılımlarını kullanarak sonuçları daha efektif hale getirmişlerdir. Sonlu elemanların analiz verilerine göre, büküm radyüsünün düşmesi ve kalıp açısının ise yükselmesiyle geri esneme miktarının düştüğünü incelemişlerdir.

Panthi vd. 2007 [11] yılında yapılan çalışmada oluşan büküm kuvvetinin geri yaylanma üzerinde görülen etkisini analiz çalışmalarıyla elde etmişlerdir. Seçilen malzemeye en düşük büküm kuvveti yapıldığında oluşan geri yaylanma değerinin büyük olduğu ve büküm kuvvetinin yükselmesi durumunda oluşan geri yaylanma miktarının gözle görülür bir şekilde azaldığı gözlemlemişlerdir.

Sarıkaya tarafından 2008 [12] yılında yaptığı çalışmalarında, ısıl işlemi kullanmış olup değişik kalınlıklarda olan alüminyumdan oluşan malzemelere birbirinden farklı üç kalıp açısı ve üç farklı kalıp değişkenleri kullanılarak büküm çalışması realize edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda von mises gerilme değişimleri, plastik gerilme değerlerinin, kalıp kuvvetlerinin geri esneme düzenine etkilerini sonlu elemanlar analizi yönteminde faydalanarak iki şekilde olan teorik ve deneysel olarak tetkik edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda alüminyumdan yapılmış olan malzemelerde ileri yaylanma olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca deney sonucunda elde edilen bulgular doğrultusunda seçilen kalınlık değeri artırıldığında geri yaylanma değerinin de minimuma yaklaştığı saptanmıştır.

Bakhshi-Jooybari vd. 2008 [2] yılında yaptıkları çalışmada, CK67 sac metal levhayla birlikte V- büküm işlemleri 3 farklı değerdeki kalınlık, 4 farklı büküm radyüs olacak şekilde kullanmış olup 60°lik kalıpta deneyi gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonunda ise sac levha numunelerinde ileri yaylanmanın gerçekleştiği sonucuna karar vermişlerdir. Büküm radyüsünün miktarının artması ise geri yaylanma değerinin artış gösterdiği tespit etmişler.

Tekaslan vd. 2008 [15] yılında yaptıkları çalışmada, hadde yönüne değerlendirildiğinde malzemelerde seçilen birbirinden farklı altı açılarda bükümleme işlemi sonucunda görülen geri yaylanma değerinin tespit etmek istemişlerdir. 25x50 mm ebatları olan farklı kalınlıkları olan 3 adet Bakır sac kullanılmışlardır. Yapılan çalışmada farklı olarak 4 metotta yer alan kullanılan birinci ve ikinci metotlarda oluşan geri yaylanma değerini tespit etmede elverişli olduğu kanısına saptanmıştır. Üst kalıp yükünün Bakır sac üzerinde bekletilmesi sonucunda büküm zaman değerinin arttırılmasına karşı geri yaylanma değerinde azalma görüldüğü tespit etmişlerdir. 20-25 sn. bekleme süresi ile ortalama 1-3° değerler aralığında geri yaylanma değerinde azalış incelenmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre kalınlık değeri ile seçilen bükme açısının geri yaylanma üzerine doğru orantıda etkilediğine karar vermişlerdir.

Özer tarafından 2011 [10] yılında yaptığı çalışmalarında, yüksek mukavemete sahip çeliklere yapılan işlem adı olan şekil verme sonrasında gözlemlenen geri yaylanma değerinin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çıkarım

yapılması ve düzeltilmesi üzerine çalışmıştır. Birbirinden farklı 3 büküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Hill48 ve Barlat89 akma modellerinin yer aldığı çalışmada sonlu elemanlar analizlerini tespit etmiştir. DP, TRIP ve TWIP 3 farklı çeliklerin geri yaylanma özellikleri incelenerek, pekleşme katsayısı ve pekleşme üstelinin geri yaylanma üzerinde tesirleri olup olmadığı incelenmiştir. U- profil büküm işlemi sonrasında benzer olmayan malzemeleri birbirleriyle karşılaştırmış ve olanların arasında bulunan anizotropi ve plastik davranışını en doğru sergileyen modelin Barlat89 olduğu tespit edilmiştir. S-ray profil büküm işlemi sonucunda, Barlat89 modeliyle yapılan deneylere göre çok fazla geri yaylanma tespit edilmiştir. Kalıp boşluk değerinin artması sonucunda geri yaylanma değerinin artış gösterdiği sürtünme katsayısı ve baskı plakası kuvvet miktar değerleri yükseldikçe de geri yaylanma değerinin azalış gösterdiği sac kalınlığının artmasından dolayı geri yaylanma miktarının arttığı sonuçlarına varılmıştır.

Ötü tarafından 2012 [8] yılında yaptığı çalışmalarında, V büküm kalıplarında ise yer alan değişik büküm işlemleri kullanarak AA 5754-O ve AL 1050-O sac malzemelerinde oluşan geri yaylanma miktarlarını değerlendirilmiştir. Yapılan deneyde ise deneysel ve teorik yöntemleri kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Aynı olmayan iki kalınlığı bulunan malzemeleri 3 tane olmak üzere farklı açılar kullanarak V büküm kalıplarında, haddeleme yönü doğrultusunda 0°, 45° ve 90° olacak şekilde çalışmalar yapmıştır. Üst kalıp sac levhanın üzerinde gerçekleştirilen oyalanma süresi sonucunda geri yaylanma miktarını azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kullanılan sac malzemelerinde hadde yönü özelliğinden dolayı geri yaylanma miktarlarında farklılıklar oluşturduğu tespit edilmiştir.

Şahin tarafından 2013 [14] yılında yaptığı çalışmalarında, geri yaylanma davranışları tespit edebilmek için, yöntem olarak V büküm kullanarak deneysel ve Dynaform yazılımı aracılığıyla teorik açıdan incelemiştir. Kalıp değişken çeşitlerine göre paslanmaz, dkp, alüminyum malzemelerine göre çalışmalar gerçekleştirmiştir. Kalıp değişkeninde farklı olarak üç V kalıp açıları kullanılmakta olup ve büküm radyüs değerinin sabit değer olarak ele almıştır. Üç farklı kalınlığı olan örnekler kullanılmış ve elde edilen sayısal sonuçlarıyla birlikte deneysel sonuçları karşılaştırma yapılmıştır. Deneysel ve teorik sonuçları yaptığı inceleme sonucunda birbirlerine eşit değerler olduğunu tespit etmiştir. Bazı deney göstergelerinde yer alan geri yaylanmanın yanında ileri yaylanma değerinin sonuçları tespit edilmiştir.

Aslan tarafından 2014 [1] yılında yaptığı çalışmalarında, yöntem olan V büküm ise sıvı basıncıya birlikte deneysel olarak araştırma yapmıştır. Kalınlığı 0,5 mm olarak belirlenen alüminyumdan oluşan, Bakır ve pirinç malzemelerini ise değişik açılar kullanarak V büküm kalıplarında çalışmalarını noktalamışlardır. Büküm sıvı basıncı miktarı ve ütüleme süresindeki gözlemlenen artış miktarının geri yaylanma değerinin azalttığını, büküm açısı ile malzemede olan sertliğin artması da geri yaylanma miktarının arttırdığını elde etmiştir.

Özdemir tarafından 2015 [9] yılında yaptığı çalışmalarında, V dip büküm çalışması bulgusunda yer alan ileri ve geri yaylanma davranışları, normalizasyon ve ısıl işleminde yer alan 16Mo3 oluşan sac malzemelere olan etkisi küçük yapısal düzeyde çalışılmıştır. Yapılan çalışma sonucuna göre 30° gerçekleştirilen büküm işleminde, ısıl işlemi olmadan ve normalizasyon işlemi yapılan sac malzemelerin kalınlık değerleri artırıldıkça, ileri yaylanma miktarını artış gösterirken, 60° ve 90° açılarla gerçekleştirilen işlem olan bükümde sac malzeme kalınlık miktarını arttırıldıkça elde edilen ileri yaylanma miktarının azalış gösterdiği tespit edilmiştir. Menevişleme işlemi yapılmamış elemanlarda ise, sacların kalınlık miktarını arttırdıkça geri yaylanma değerinin azalış gösterdiği gözlemlenmiştir. Isıl işlemi olmadan ve normalizasyon işlemi yapılmış malzemelerde üst kalıp büküm radyüsü miktarını arttırıldıkça ileri yaylanma sayısal değerini azaltırken, ısıl işlemi uygulanmış malzemelerde ise, geri yaylanma davranış değerinin arttığını tespit etmişlerdir.

Sayın tarafından 2019 [13] yılında yapmış olduğu çalışmasında farklı sac levha malzemelerin farklı kalınlıkları da geri yaylanmasını incelemiştir. Bu çalışmada geri yaylanma miktarlarını incelemek için V büküm kalıpları malzemelere olarak da AISI 304, EN 10130 DC01, Bakır sac metal levhalar kullanılmıştır. Deneyde kullanılan malzemelere göre geri yaylanma farklılık gösterdiği gözlemlenmiş olup akma mukavemeti yüksek olan malzemede daha fazla geri yaylanma olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca malzeme kalınlığı arttıkça da geri yaylanmanın azaldığı gözlemlenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Yapılan çalışmada V büküm kalıp tasarlanarak yapılan S355JR (ST52) sac levhaları, 2 ve 3 mm kalınlıklarında, 2 ve 4 mm büküm radyüsünde geri esneme davranış araştırmaları yapılmıştır. Yapılan deney çalışmalarda bulgular ve sonuçlar grafik ve tablolar halinde kıyaslanmıştır. Sac metal levhalarda V büküm işlemi esnasında kullanılacak deney malzemeleri geri yaylanmayı etkileyen parametreler kalıp malzemelerin açıları Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. İşlem parametreleri

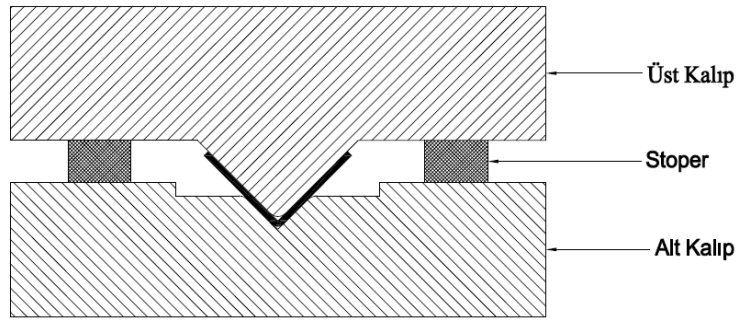
Malzeme	S355JR (ST52)
Kalıp Açısı (°)	60,90,120
Malzeme kalınlığı (mm)	2,3
Bükme radyüsü (mm)	2,4

Deneylerde kullanılacak sac metal levhaların boyutları belirlenmiş olup Lazer makine tezgâhında işlem yapılmıştır. 100 tonluk atölye modeli hidrolik pres aracıyla V büküm deneyi her parametreler için 3 er defa tekrarlanarak toplamda 36 adet numune büküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneyde üst kalıp malzeme üstünde 3 saniye bekletilmiştir. Büküm işlemi uygulanırken sac metal levha fazla yük ile deforme olmaması için alt kalıp ve üst kalıp arasına stoperler konulmuştur. Kullanılan stoper kalınlıkları Tablo 2.2'de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. İşlem parametrelerine göre stoper kalınlığı

Kalıp açısı (°)	Malzeme kalınlığı (mm)	Stoper kalınlığı (mm)
60	2	11,3
	3	12,3
90	2	14,9
	3	15,9
120	2	10
	3	11

Deneyde kullanılan kalıpların ve stoperlerin şematik gösterimi şekil 2.1'de örnek olarak verilmiştir.

**Şekil 2.1.** 60° V bükme kalıbı stoper gösterimi

2.1. Deneyde kullanılan malzemelerinin özellikleri

V büküm deneyinde kullanılan 75x50 mm boyutlarında 2 ve 3 mm kalınlığındaki S355JR (ST52) sac metal levhaları kullanılmıştır. Deney numunelerinin kimyasal özellikleri Tablo 2.3'de; mekanik özellikleri ise de Tablo 2.4' de gösterilmiştir.

Tablo 2.3. S355JR (ST52) sac malzemesinin kimyasal özellikleri

Sınıf	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Mo
S355JR (ST52)	0,057	1,064	0,029	0,006	0,467	18,09	8,05	0,206	0,14

Tablo 2.4. S355JR (ST52) sac malzemesinin mekanik özellikleri

Malzeme	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (% in 50 mm) min
S355JR (ST52)	218-279	319-352	28,7-39,2

Deney kalıp malzemeleri, CK 45 imalat çeliği seçilerek CNC dik işlem makinesinde hassas bir biçimde işlenerek üretilmiştir. Kalıp malzemelerde darbeden dolayı çatlama, kırılma ve malzemenin içyapısında bozulmaması için ısıtım işlemi uygulanmıştır. Deney örnekleri hassas bir şekilde alınabilmesi için Lazer makine yardımıyla 75x50 mm ölçülerinde kesilerek hazırlanmıştır. Şekil 2.2'de deneylerde kullanılan örnekler verilmiştir. Büküm kuvvet hesaplamaları aşağıdaki gibi yapılmıştır.

$$P_k = \frac{c \cdot \sigma_b \cdot s^2 \cdot b}{W} \quad (1)$$

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

$$P_e = 2 \cdot P_b \quad (3)$$

Burada;

P_e = Son Büküm Kuvveti (N)

σ_b = Çekme mukavemeti (N/mm²)

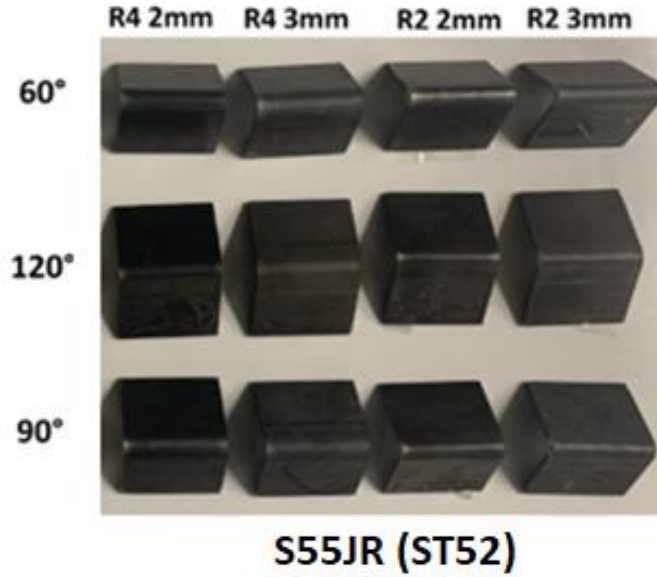
c = Büküm kuvveti katsayısı

W = Kalıp açıklığı (mm)

P_k = Büküm kuvveti (N)

s = Sac levha kalınlığı (mm)

b = Levha genişliği (mm)



Şekil 2.2. Deney numunesi

3. Bulgular

Deneyde kullanılan kalıplar 60°, 90°, 120° açılarda 2 ve 4 mm büküm radyüslü kalıplarla 2 ve 3 mm kalınlığında S355JR (ST52) sac metal levha kullanılarak yapılmıştır. Her büküm deney örnekleri için 3'er adet olacak biçimde toplamda 36 adet numune bükülmüştür.

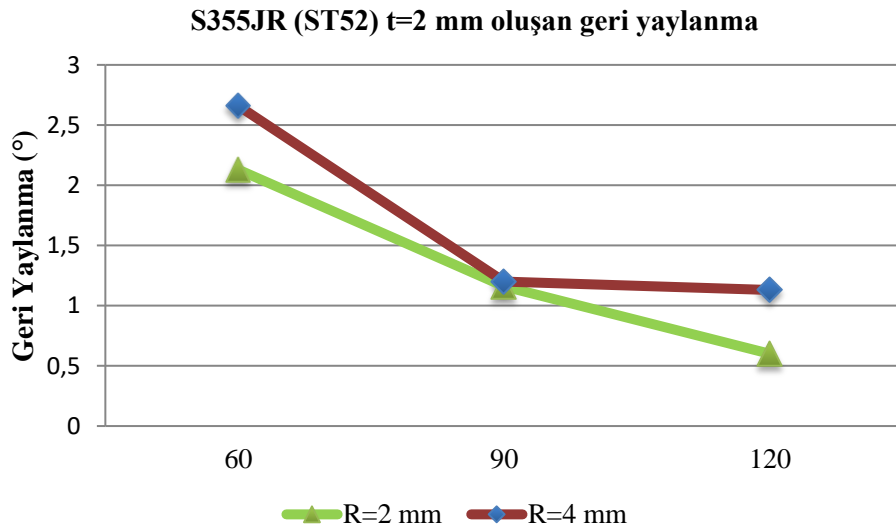
Tablo 3.1'de Hidrolik pres makinesinde gerçekleştirilen deneyler, S355JR (ST52) levhaya ait deneysel geri yaylanma sonuçları açı değerleri ile verilmiştir. Deney sonuçları tablo 3.1'de verilmiştir. Hidrolik preste bükülen deney örnekleri dijital açı ölçer kullanılarak veriler ölçülmüştür. S355JR (ST52) 2 mm sac levhaya ait geri yaylanma verilerin grafik Şekil 3.1'de gösterilmiştir. S355JR (ST52) 3 mm sac levha için ise Şekil 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.1. S355JR (ST52) sac levha deneysel geri yaylanma sonuçları

Kalıp Açısı (°)	Sac Kalınlığı(mm)	Büküm Radyüsü(mm)	Geri Yaylanma (°)
60	2	2	2,13
		4	2,66
	3	2	0,23

		4	1,1
90	2	2	1,16
		4	1,2
	3	2	0,5
		4	1,8
120	2	2	0,6
		4	1,13
	3	2	0,35
		4	0,6

Tablo 3.1'de genellikle deney sonuçlarında ve bütün değerlerde bulunan geri esneme miktarları ortalama değerlere yakın ve geri esneme açı değerlerinin birbirleriyle uyumlu olduğu gözükmemektedir. Tablo (3.1.)'de en yüksek geri yaylanma 60° büküm açısı 2 mm kalınlık, 4 mm radyüslü kalıptaki S355JR (ST52) sac levhalarının bükülmesi ile elde edildiği gözlemlenmiştir. En az geri yaylanma ise 120° büküm açısı 3mm kalınlık, 2 mm radyüslü kalıptaki S355JR (ST52) sac levhanın bükülmesi sonucunda gözükmemektedir.



Şekil 3.1. 2 mm kalınlığının S355JR (ST52) sac levhanın kalıp açısına göre geri yaylanma grafiği

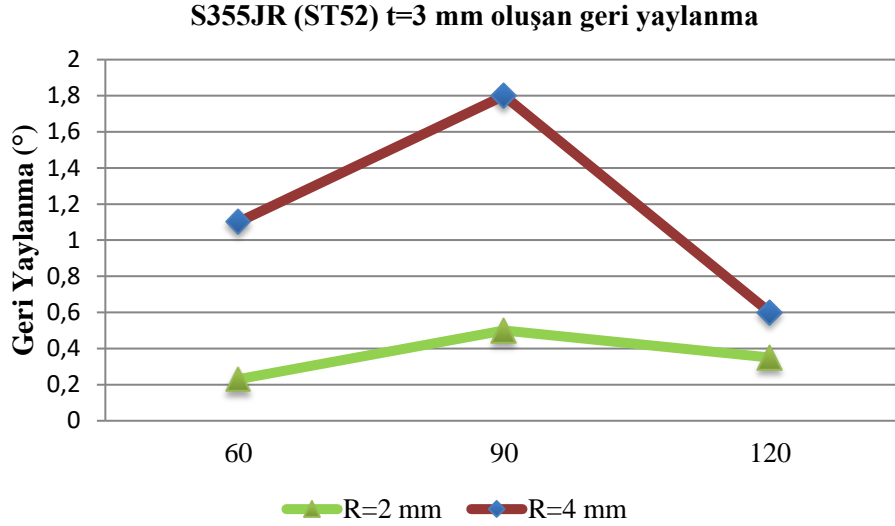
Yukarıda belirtilen Şekil 3.1'de görüldüğü gibi 2 mm kalınlığına sahip ST52 sac levha için belirlenen geri yaylanma değeri 120° büküm açısına ait olan kalıptan erişilmiştir. ST52 sac levhanın maksimum geri yaylanma değerini ise 90° büküm açısına ait olan kalıptan erişilmiştir.

Büküm açısı 60° olan kalıpta, büküm radyüsleri 4 mm olarak yapılan büküm işlemleri sonucunda görülen geri yaylanma miktarı, büküm radyüsü 2 mm olana göre geri yaylanmaya miktarı %24,8 değerinde arttığı ve oluşan geri yaylanma değerinin ise en az bükme radyüsü 4 mm olan değerde (2,66°) olduğu tespit edilmiştir.

Büküm açısı 90° olan kalıpta, büküm radyüsleri 4 mm olarak yapılan büküm işlemleri sonucunda görülen geri yaylanma miktarı, bükme radyüsü 2 mm olana göre geri yaylanmaya miktarı %0,35 arttığı ve oluşan geri yaylanma değerinin ise en az bükme radyüsünde 4 mm olan değerde (1,2°) olduğu tespit edilmiştir.

Büküm açısı 120° olan kalıpta, bükme radyüsleri 4 mm olarak yapılan büküm işlemleri sonucunda görülen geri yaylanma miktarı, bükme radyüsü 2 mm olana göre geri yaylanmaya miktarı %88,3 arttığı ve oluşan geri yaylanma değerinin ise en az bükme radyüsünde 4 mm olan değerde (1,13°) olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen veriler incelendiğinde oluşan sonuçlara göre bükme açısı 90° olan kalıplarda 2 mm ST52 sac levhanın bükülmesiyle gerçekleşen büküm radyüsünün oluşturduğu geri yaylanma üzerindeki bıraktığı etkinin diğer kalıp açılarına göre en az olduğu tespit edilirken, büküm açısı 120° olan kalıplarda ise bu farkın maksimum çıktığı gözlemlenmektedir.



Şekil 3.2. 3 mm kalınlığının S355JR (ST52) sac levhanının kalıp açısına göre geri yaylanma grafiği

Yukarıda belirtilen Şekil 3.2’de görüldüğü üzere 3 mm kalınlığına sahip ST52 sac levha için belirlenen en az geri yaylanma değeri 60° büküm açısına ait olan kalıptan erişilmiştir. ST52 sac levhanının en fazla geri yaylanma değerini ise 90° büküm açısına ait olan kalıptan erişilmiştir.

Büküm açısı 60° olan kalıpta, büküm radyüsleri 4 mm olarak yapılan büküm işlemleri sonucunda görülen geri yaylanma miktarı, bükme radyüsü 2 mm olana göre geri yaylanmaya miktarı %79,1 değerinde arttığı ve oluşan geri yaylanma değerinin ise en az bükme radyüsü 2 mm olan değerde (0,23°) olduğu tespit edilmiştir.

Büküm açısı 90° olan kalıpta, bükme radyüsleri 4 mm olarak yapılan büküm işlemleri sonucunda görülen geri yaylanma miktarı, bükme radyüsü 2 mm olana göre geri yaylanmaya miktarı %72,2 arttığı ve oluşan geri yaylanma değerinin ise en az bükme radyüsünde 2 mm olan değerde (1,8°) olduğu tespit edilmiştir.

Bükme açısı 120° olan kalıpta, bükme radyüsleri 4 mm olarak yapılan büküm işlemleri sonucunda görülen geri yaylanma miktarı, bükme radyüsü 2 mm olana göre geri esneme miktarı %41,6 arttığı ve oluşan geri yaylanma değerinin ise en az bükme radyüsünde 2 mm olan değerde (0,35°) olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen veriler incelendiğinde oluşan sonuçlara göre büküm açısı 60° olan kalıplarda 2 mm ST52 sac levhanının bükülmesiyle gerçekleşen bükme radyüsünün oluşturduğu geri yaylanma üzerindeki bıraktığı etkinin kalıp açılarına göre en az olduğu tespit edilirken, büküm açısı 90° olan kalıplarda ise bu farkın en yüksek çıktığı gözlemlenmektedir.

ST52 sac levhalarına ait kalınlıkların, belirlenen kalıp açılarına göre değerlendirme işlemi sonrasında 2 mm kalınlığı bulunan sac levhadaki kalıp açısı derecesi arttırıldıkça oluşan geri yaylanma miktarının düştüğü, 3 mm kalınlıktaki sac levhada ise kalıp açısı arttırıldıkça oluşan geri yaylanma değerinin arttığı gözlemlenmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Yapılan deneylerde elde edilen veriler grafikler halinde incelendiğinde malzeme kalınlığının artması ile geri yaylanmanın azaldığı el edilmiştir. En yüksek geri yaylanma değeri 2 mm sac kalınlığında gözlemlenirken en az geri yaylanma miktarı da 3 mm sac kalınlığında olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen değerler ile literatür taramasındaki sonuçlar ile örtüşmektedir. Malzeme kalınlığı artmasıyla geri yaylanmanın azalmanın sebebi bükme işlemi sonrasındaki uç radyüsünde oluşan gerilme miktarının azalmasından kaynaklanmaktadır [7].

Kalıp açılarının artması ile geri yaylanmanın azalmasının sebebi ise bükme açısının yükselmesi ile sac levhanının dış yüzeyindeki uzama miktarının artması ile oluşmaktadır [6]. Büküm radyüsüne bakıldığında 2 mm büküm radyüsü kalıpta elde edilen geri esneme miktarı ile 4 mm büküm radyüslü kalıplarda daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Büküm radyüsü düşük olan kalıplarda geri yaylanma miktarı daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Kalıplardaki büküm radyüsü geri yaylanmada önemli bir etkisinden biridir. Bir diğer etkende malzemenin plastik bölgesine bağlıdır. Düşük büküm radyüsü, kuvveti daha yüksek plastik deformasyona ve düşük bölgesel gerinim seviyesi gerektiren ince bir alanda yoğunlaşmaktadır. Bu sebeplerden ötürü geri yaylanma miktarının artmasına neden olmaktadır [3].

- S355JR (ST52) sac metal levhanın düşük akma mukavemetinde olduğu için geri esneme miktarı az olduğu belirlenmiştir.
- S355JR (ST52), sac metal levhaların kalınlıkları artmasıyla geri esneme değerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bu olayın sebebi ise büküm bölgesindeki meydana gelen kalıntı gerilme değerinin düşmesinden kaynaklandığı söylenebilir.
- V büküm deney kalıp açısının yükselmesi 2 mm S355JR (ST52) sac metal levhalarda geri yaylanma değerinin düştüğü belirlenmiştir. Genel olarak kalıp açılarının yükselmesi ile geri yaylanma değerinin düştüğü sac metal levhaların bükme işlemi sonrasında dış yüzeyindeki uzamanın düşmesinden kaynaklandığı söylenebilir.
- Yapılan deneyde kullanılan 2 mm büküm radyüsüne sahip kalıplardan elde edilen geri esneme miktarının 4 mm büküm radyüsüne göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Teşekkür

Yapılan deneysel çalışma 0829-YL-22 proje kodu ile Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafınca desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Aslan, Y. (2014). *Sıvı Basıncıyla V Bükme Prosesinde Geri Esnemenin Deneysel Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [2] Bakhshi, J. M., Rahmani B., Daezadeh V., ve Gorji A. (2008). The Study of Spring-back of CK67 Steel Sheet in V-Die and U-Die Bending Processes, *Materials and Design*, Faculty of Mechanical Engineering Babol University of Technology, Mazandaran, Iran, 30, 2410-2419.
- [3] Buang, MS., Abdullah, SA., ve Saedon, J. (2015). *Effect of Die and Punch Radius on Springback of Stainless Steel Sheet Metal in The Air V-Die Bending Process*, Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 8, 1322-1331.
- [4] Chan, W. M., Chew, H. I., Lee, H. P., ve 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.
- [5] Forcellese, A., Fratini, L., Gabrielli, F., ve Micari, F. (1998). *The Evaluation of Springback in 3D Stamping and Coining Processes*, Journal of Materials Processing Technology, 80-81, 108-112.
- [6] Leu, D. K. (1997). *A Simplified Approach For Evaluating Bendability and Springback in Plastic Bending of Anisotropic Sheet Metals*, Journal of Materials Processing Technology, 66, 9-17.
- [7] Livatyalı, H., ve Altan, T. (2001). *Prediction and Elimination of Springback in Straight Flanging Using Computer Aided Design Methods*, Journal of Materials Processing Technology, 117, 262-268.
- [8] Ötü, R. (2012). *V Bükme Kalıplarında Alüminyum Alaşımli Sacların Şekillendirilmesi ve Geri Esneme Miktarlarının Tespiti*, Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, Türkiye.
- [9] Özdemir, M. (2015). *Sac Malzemenin Geri-İleri Esneme Miktarı ve Deformasyon İlişkisinin Deneysel ve Matematiksel Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [10] Özer, F. (2011). *Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Şekil Verme Operasyonları Sonucu Oluşan Geri Yaylanmanın Doğru Tahmini ve Telifisi*, Yüksek Lisans Tezi. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [11] Panthi, S. K., ve Ramakrishnan N. (2007). *An Analysis of Springback in Sheet Metal Bending Using Finite Element Method (FEM)*, Journal of Materials Processing Technology, 180, 80-85.
- [12] Sarıkaya, O. T. (2008). *Analysis of Heat Treatment Effect on Springback in V- Bending*, Yüksek Lisans Tezi. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [13] Sayın, L. (2019). *AISI 304, EN 10130 DC01, Bakır Sac Levhaların V bükme Yöntemi ile Şekillendirme Sonucunda Oluşan Geri Yaylanma Miktarının Deneysel Olarak İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi). Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Burdur, Türkiye.

- [14] Şahin, Ç. Ö. (2013). *Sac Levhaların V-Bükme Sonucu Geri Yaylanma Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [15] Tekaslan, Ö., Nedim, G., ve Şeker, U. (2008). *V Bükme Kalıplarında Bakır Sac Malzemelerin Geri Esneme Miktarlarının Tespiti*, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, Ankara, Cilt 23, No 1, 231-238.