

Kayar baskı plakalı artımlı sac şekillendirme yöntemiyle şekillendirilen Erdemir 7136 sacının geri esneme davranışının araştırılması

Investigation of the springback behavior of Erdemir 7136 sheet formed by rolling blank holder incremental sheet forming method

Vedat TAŞDEMİR^{1*}, Nuri ŞEN², Ömer SEÇGİN³

¹Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Elbistan Meslek Yüksekokulu, Kahramanmaraş İstiklal Üniv., Kahramanmaraş, Türkiye.
vedat.tasdemir@istiklal.edu.tr

²Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye.
nurisen@duzce.edu.tr

³Makine Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye.
omersecgin@subu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 04.02.2020
Kabul Tarihi/Accepted: 13.07.2020

Düzeltilme Tarihi/Revision: 17.05.2020

doi: 10.5505/pajes.2020.40325
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Artımlı şekillendirme yöntemi ile kalıp imalatına ihtiyaç duyulmadan hızlı ve düşük maliyetli prototip parça üretimi yapılabilmektedir. Ancak bu yöntemdeki en önemli sorunlardan bir tanesi üretilen parçaların geometrik doğruluğudur. Geometrik hatanın en büyük kaynağı ise geri esneme olayıdır. Bu çalışmada, kayar baskı plakalı artımlı sac şekillendirme metodu kullanılarak 1 mm kalınlığındaki Erdemir 7136 sacı şekillendirilmiştir. Klemp sıkma (sacı tutma) basıncı, artım miktarı, form takım çapı ve ilerleme hızı parametrelerinin geri esnemeye olan etkileri araştırılmıştır. Araştırma neticesinde geri esneme açısının takım çapı arttıkça büyüdüğü, ilerleme hızı ve artım miktarının artması ile düştüğü tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında optimum parametre değerleri 5.8776 bar klemp sıkma basıncı, 1500 mm/dk. ilerleme hızı, 0.75 mm artım miktarı ve 5 mm takım çapı olarak belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Artımlı sac şekillendirme, geri esneme, Erdemir 7136 malzeme, yanıt yüzey metodu.

Abstract

Rapid and low-cost prototype parts can be produced without the need for mold production with incremental forming method. One of the most important problems in this method is the geometry accuracy of the products produced. The biggest source of the geometric error is the springback event. In this study, Erdemir 7136 sheet with a thickness of 1 mm was formed by using rolling blank holder incremental sheet forming method. The effects of holding pressure, increment, tool diameter and feedrate parameters on springback were investigated. As a result of the research, it was found that the springback angle increased with increasing of form tool diameter and decreased with increasing of feedrate and increment. The optimal conditions for springback are determined as 5.8776 bar holding pressure, 1500.0 mm/min feedrate, 0.75 mm increment and 5 mm tool diameter.

Keywords: Incremental sheet forming, springback, Erdemir 7136 material, response surface methodology.

1 Giriş

Artımlı sac şekillendirme, form takımları yardımıyla bölgesel deformasyon ile sac malzemeleri şekillendirmede kullanılan sac metal şekillendirme yöntemlerinden biridir [1]. Artımlı şekillendirme, uygun üretim maliyetleri ile karmaşık geometriye sahip, yüksek kişiselleştirilmiş ürünlerin üretilmesine izin veren esnek bir imalat teknolojisidir [2]-[4]. Artımlı şekillendirme yönteminin temel uygulama alanı otomotiv ve havacılık sektörü olmakla birlikte son zamanlarda giderek önem kazanan biyomedikal gibi farklı birçok alan için de önemli bir potansiyele sahiptir.

Artımlı şekillendirme işlemleri daha çok CNC tezgâhlar yardımıyla yapılır. Üretilcek ürünlerin takım yolu kodları CAD/CAM programları kullanılarak oluşturulur ve CNC tezgâhlara aktarılır. CNC tezgâhlar ve CAD/CAM teknolojisindeki gelişmeler, karmaşık yapıları ürünlerin hızlı prototipleme işleminin çok maliyetli olmadan artımlı şekillendirme yöntemiyle üretilmesini kolaylaştırmaktadır [5],[6].

Artımlı şekillendirme yönteminin, geleneksel sac şekillendirme yöntemleri ile kıyaslandığında birçok üstün özelliğe sahip

olmasına rağmen endüstriyel kullanım için giderilmesi gereken eksik yönleri de mevcuttur [7]. Artımlı sac şekillendirme esnek ve hızlı prototipleme adına tercih edilen bir şekillendirme yöntemi olsa da geometrik tamlık, uzun üretim süresi, büyük duvar açısı sınırlaması, düşük yüzey kalitesi, geri esneme, yüksek sürtünme, incelleme ve çatlama gibi problemleri vardır [8]-[12]. Miraci ve diğ. geometrik hatayı tasarlanan ürün ile elde edilen ürün arasındaki fark olarak tanımlamaktadır [13]. Geri esneme, artımlı sac şekillendirme işleminde önemli bir problemdir ve doğru tahmin edilmesi artımlı şekillendirme işleminde parçanın doğru üretimi açısından da önemlidir [14]. Üretilen ürünlerin geometrik hatalarının temel kaynağı olan geri esneme, şekillendirme işleminden sonra parça üzerindeki sıkma kuvvetinin kaldırılmasından sonra elastik olarak meydana gelen ve istenmeyen geometrik değişim olarak tanımlanır [15]. Geri esneme, deformasyon esnasında meydana gelen lokal geri esnemeyi, parçayı sıkma ve yükün kaldırılması sonrası oluşan global geri esnemeyi ve eğer yapılırsa düzeltme işleminden dolayı oluşan geri esnemeyi içerebilir [16].

Artımlı şekillendirme işleminde geri esneme probleminin azaltılması ve üretilen parçaların geometrik tamlıklarının artırılması üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır. Li ve diğ. [17], DC56 sac malzeme kullanarak çok kademeli artımlı sac

* Yazışılan yazar/Corresponding author

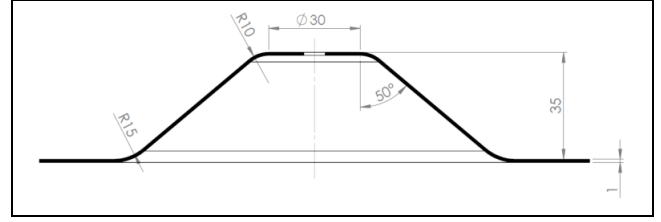
şekillendirme işlemini hem deneysel hem de sonlu elemanlar analizi ile yapmışlardır. Kademe sayısı arttığında, her bir şekillendirme kademesi sırasında biriken geri esnemenin dolaylı, tek kademe işleminin aksine geri esnemenin daha da büyüdüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca, geri esneme büyüklüğünün duvar açısı ile ilişkili olmadığını da belirtmişlerdir. Zhang ve diğ. [18], AA2024-T3 alaşımının artımlı şekillendirilmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarının neticesinde tavlama işleminin elde edilen parçadaki geometrik hataları önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir. Leonhardt ve diğ. [19], AZ31 malzemenin sıcak hava ile ısıtarak tek nokta artımlı sac şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarını farklı sıcaklıklar, akış debileri ve ısıtma sürelerinde gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda sıcaklığın etkisi ile şekillendirme kuvvetinin azaldığını, kalınlık dağılımının iyileştiğini ve geometrik sapmaların da azaldığını belirtmişlerdir. Ambrogio ve diğ. [20], AA1050-O malzemenin geometrik tamlığı üzerine hem deneysel hem de sonlu elemanlar analizini kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında duvarlar boyunca eğrilik oluşturan bazı hataların ortaya çıktığını, bunun elastik geri yaylanmadan kaynaklandığı kaydedilmiştir. Bu sorunun üstesinden gelmek için takım yolunu yeniden optimize ederek şekil bozukluğunu azaltmışlardır. Naranjo ve diğ. [21], Ti6Al4V malzemenin tek nokta artımlı şekillendirme yöntemi ile ılık şekillendirilebilirliği ve boyutsal tamlığı üzerine hem deneysel hem de sonlu elemanlar yöntemini kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Sıcaklığın şekillendirme kuvveti, kalınlık vb. için önemli bir etken olduğunu belirtmekle birlikte geri esnemenin sıcaklığın artması ile azaldığını ve düşük sıcaklıklarda parçaların geri esnemesinin önemli ölçüde arttığını belirtmişlerdir. Wei ve diğ. [22], sac metal artımlı şekillendirme işleminde simetrik koni benzeri parçaların hassasiyeti üzerine geri esnemenin etkisini araştırmışlardır. Ana deformasyon bölgesindeki geri esnemenin çok küçük olduğunu ve iş parçasının şekillendirme hassasiyeti üzerine çok az etkisinin olduğunu belirtmişlerdir. Yine, şekillendirme işlemi sırasında, iş parçasının şekillendirme açısı ne kadar büyük olursa, geri esnemenin de o kadar küçük olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, şekillendirme açısı ile geri esneme arasında doğrusal bir ilişki olduğunu söylemişlerdir.

Bu çalışmada, son dönemde geliştirilmiş olan kayar baskı plakalı iki nokta artımlı şekillendirme yöntemi kullanılarak, soğuk şekillendirmeye uygun, yüksek akma dayanımlı, soğuk haddelenmiş Erdemir 7136 malzemesinin geri esneme davranışı araştırılmıştır. Öncelikle Taguchi L18 ortogonal deney dizinine göre deney tasarımı yapılarak parçalar şekillendirilmiştir. Deneysel olarak geri esneme açısı ($\Delta\alpha$) belirlenmiştir. Daha sonra ise elde edilen sonuçlar yüzey yanıt yöntemi kullanılarak optimum şekillendirme parametreleri belirlenmiştir.

2 Materyal ve metod

Bu çalışmada otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan, 1 mm kalınlığında, Erdemir 7136 (1.0550; EN10268:2006+A1:2013) sacı şekillendirilmiştir. Bu sacın hadde yönündeki akma gerilmesi 400 N/mm², enine doğrultudaki akma gerilmesi ise 430 N/mm²'dir. Çekme gerilmeleri ise hadde yönünde 490 N/mm², enine doğrultuda ise 510 N/mm²'dir. Çalışma kapsamında şekillendirilen numunenin ölçüleri Şekil 1'de görülmektedir. Çalışmalar DAHLIHCNC işleme tezgâhında helisel takım yolu

kullanılarak yapılmıştır. Deneyler esnasında tezgâha herhangi bir devir verilmemiştir. Fener mili serbest bırakılmıştır.



Şekil 1. Şekillendirilen numunenin detay resmi.

Figure 1. Detail picture of the sample formed.

Geri esneme açısı üzerine tutma basıncı (klemp sıkma basıncı), ilerleme hızı, artım miktarı ve takım çapı olmak üzere 4 parametrenin etkisi incelenmiştir. Basınc için iki seviye, diğer parametreler için ise üçer seviye belirlenmiştir. Deneysel faktörler ve seviyeleri Tablo 1'de verilmiştir.

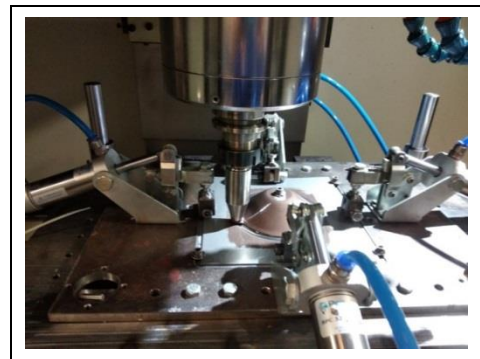
Tablo 1. Deneysel faktörler ve seviyeleri [23].

Table 1. Experimental factors and levels [23].

Faktörler	Simge	Seviyeler			Birim
		1	2	3	
Tutma basıncı	P	2	9	-	bar
İlerleme hızı	f	500	1000	1500	mm/dk.
Artım miktarı	Δz	0.25	0.5	0.75	mm
Takım çapı	D	5	10	15	mm

Çalışma için seçilen faktörler, artımlı şekillendirmede ürün kalitesini etkileyen en önemli faktörlerden birkaçıdır. Literatürden farklı olarak bu çalışmada kayar baskı plakası kullanıldığı için klemp sıkma basıncının etkisi de araştırılmıştır. Yapılan ön çalışmalar neticesinde sıkma basıncının alt limiti 2 bar, üst limiti ise 9 bar olarak belirlenmiştir. Her bir faktörün seviyeleri belirlenirken yine yapılan çalışmalar dikkate alınarak yaygın olarak kullanılan seviyelerin belirlenmesine özen gösterilmiştir. Literatür araştırması esnasında form takım çapının 6 mm'den başlayarak 100 mm'ye kadar çıkan çok geniş bir aralığın kullanıldığı görülmüştür. Ancak, en sık kullanılan takım çapının ortalama 10 mm ve 12 mm olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada da 10 mm referans alınarak şekillendirmeye olan etkisinin tam görülebilmesi için 5 mm, 10 mm ve 15 mm olarak takım çapları belirlenmiştir.

Sac, iş bağlama aparatının üzerine konulduktan sonra 4 adet klemp ile sıkılmıştır. Her bir klemp 2 bar basınç ile sıkıldığında sac üzerine 187.28 N, 9 bar basınç ile sıkıldığında ise 1039.02 N baskı kuvveti uygulamaktadır. Şekil 2'de şekillendirme anından bir görünüm verilmiştir.



Şekil 2. Şekillendirme anından bir görünüm.

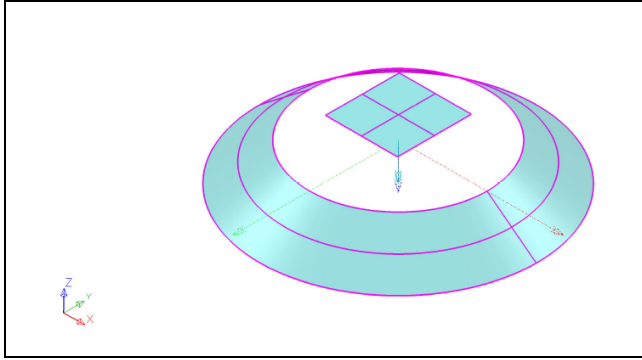
Figure 2. A view of the moment of forming.

Şekillendirme sonrası parçalarda oluşan geri esneme açıları Şekil 3'te görülen Kreon ACE-6-20 CMM (Coordinate Measuring Machine) koordinat ölçüm cihazı ile 7-10 noktadan ölçüm yapılarak belirlenmiştir. Yapılan ölçümler Autodesk Powerinspect yazılımına alınarak CAD görüntü resmi oluşturulmuş ve ölçüm değerleri CAD dosyası üzerinden elde edilmiştir. Şekil 4'te 3 No.lu numune için örnek bir CAD görüntü resmi verilmiştir.



Şekil 3. Geri esneme ölçümünde kullanılan koordinat ölçüm cihazı.

Figure 3. Coordinate measuring device used in springback measurement.



Şekil 4. CAD görüntü resmi.

Figure 4. CAD view.

3 Deneysel sonuçlar ve tartışma

Deney seti ve deneysel sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Tablonun sol tarafında her bir deneyde kullanılan parametrelerin seviyeleri, deney sonuçları bölümünde ise geri esneme açıları yer almaktadır. Deneyler neticesinde şekillendirilen parçaların görüntüsü ise Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Şekillendirilen parçalar.

Figure 5. Formed parts.

Tablo 2. Deney seti ve deney sonuçları [23].

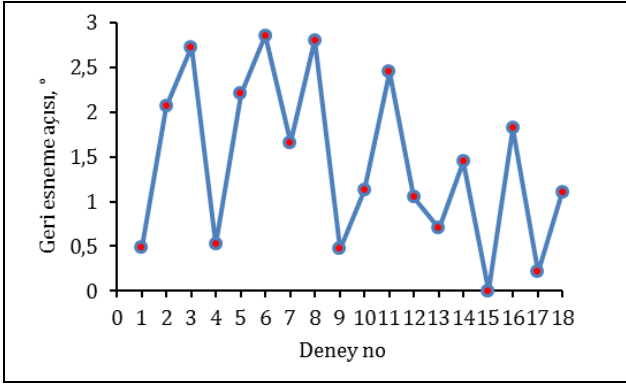
Table 2. Experiment set and experimental results [23].

Deney No	Faktörler				Deney Sonuçları Geri esneme açısı ($\Delta\alpha$) (°)
	Basınç (P) (bar)	İlerleme hızı (f) (mm/dk.)	Artım miktarı (Δz) (mm)	Takım çapı (D) (mm)	
1	2	500	0.25	5	0.492
2	2	500	0.5	10	2.062
3	2	500	0.75	15	2.728
4	2	1000	0.25	5	0.52
5	2	1000	0.5	10	2.203
6	2	1000	0.75	15	2.857
7	2	1500	0.25	10	1.657
8	2	1500	0.5	15	2.802
9	2	1500	0.75	5	0.472
10	9	500	0.25	15	1.125
11	9	500	0.5	5	2.447
12	9	500	0.75	10	1.049
13	9	1000	0.25	10	0.701
14	9	1000	0.5	15	1.447
15	9	1000	0.75	5	0.012
16	9	1500	0.25	15	1.819
17	9	1500	0.5	5	0.212
18	9	1500	0.75	10	1.109

3.1 Geri esneme açısı

Şekillendirilen malzeme üzerinden yükün kaldırılması neticesinde, elastik geri dönüşten dolayı meydana gelen geri ve ileri esneme, çıkan ürünlerin kalitesini, parça maliyetini vb. olumsuz yönde etkilemekte hatta ciddi geometrik hatalara sebep olabilmektedir [24]. Geleneksel sac şekillendirme ile karşılaştırıldığında, artımlı şekillendirmede form takımı, takım yolu boyunca malzemeye temas eder ve sürekli olarak lokal plastik deformasyon gerçekleşir. Şekillendirme süresince, form takımı aralıklı ve müteakip etkilere sahiptir, bu nedenle bölgesel malzeme deformasyonu da aralıklı birikme ile oluşur. Buna ek olarak, malzeme geri esnemesi süresiz ve tekrarlanan bir süreçtir. Bu durum göz önüne alındığında artımlı sac şekillendirmede geri esneme mekanizması geleneksel şekillendirme işleminden daha karmaşık bir yapıya sahiptir [22]. Han ve diğ. [25], artımlı sac şekillendirme işleminde sonlu elemanlar analizi destekli geri esneme mekanizması üzerine yaptıkları çalışmalarında, bu yöntemin kendine has bir geri esneme özelliğinin olduğunu ve şekillendirme esnasında oluşan artık gerilmelerin serbest kaldığını belirtmişlerdir.

Geri esneme üzerine malzeme kalınlığı, ilerleme hızı, devir, takım yolu, yağlama, form takım çapı ve artım miktarı gibi birçok parametrenin etkisi vardır. Bu parametrelerin etkilerinin belirlenmesi elde edilecek ürün kalitesi için önemlidir. Şekil 6'da her bir deney sonucunda oluşan geri esneme açıları verilmiştir. Şekillendirilen parçalarda en büyük geri esneme açısı 2.857°, en küçük geri esneme açısı ise 0.012° olarak ölçülmüştür. En düşük geri esneme açısı 9 bar basınç, 1000 mm/dk. ilerleme hızı, 0.75 mm artım miktarı ve 5 mm takım çapında elde edilmiştir.



Şekil 6. Deneylerden elde edilen geri esneme açıları.

Figure 6. Springback angles obtained from experiments.

3.2 Yanıt yüzey metodolojisi (YYM)

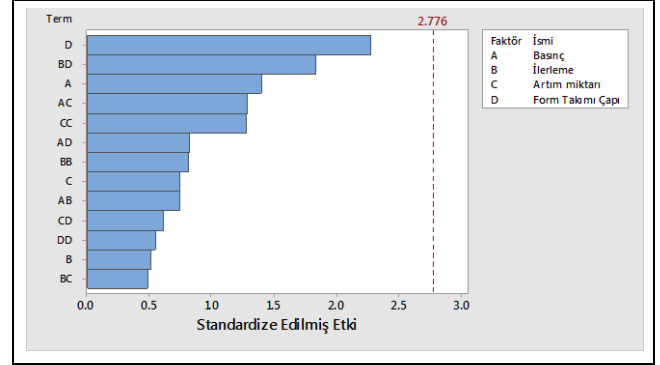
Yanıt yüzey metodolojisi (YYM), bir sistemde giriş parametrelerinin optimizasyonu için kullanılan matematiksel modelleme yöntemidir. Bu yöntem, deneysel sonuçlardan elde edilen veriler ile çok faktörlü modellerin oluşturulması ve benzer şekilde çözümlenmesinde kullanılır [26]. Bu ilişkiler, en küçük kareler tekniği ile modellenmiştir. Birçok bilimsel konuda, y cevabı ve girişler veya kontrol edilebilir değişkenler kümesi arasında bir ilişki vardır. YYM'deki birincil aşama, yanıt ile bağımsız faktörler arasında uygun bir ilişki tespit etmektir [27]. Tipik olarak, bu ilişkiyi sunmak için Eşitlik 1'de verilen denklem kullanılır [28]. Çalışma kapsamında YYM modeli oluşturmak için Minitab programı kullanılmıştır.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j \geq i}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

Burada, y tahmin edilen tepki (geri esneme açısı- Δz); β_0 sabit katsayı; $\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$, birinci ve ikinci dereceden kodlanan giriş parametreleri ve parametre etkileşim katsayıları, ε ise yanıtta tespit edilen hatadır.

Şekil 7'deki pareto grafiği incelendiğinde geri esnemeyi etkileyen en etkili faktörler sırası ile form takım çapı, tutma basıncı, artım miktarı ve ilerleme hızı şeklinde sıralanabilir. Form takım çapı büyüdükçe geri esneme miktarı artmaktadır. Takım çapı arttıkça temas alanı artmakta ve şekillendirilen yüzeye daha fazla baskı gelmektedir. Parça üzerinden takım yükünün kalkmasıyla birlikte daha fazla artık gerilme serbest kalmakta bu da geri esneme miktarını arttırmaktadır. Han ve diğ. [29] tarafından yapılan çalışma elde ettiğimiz sonuçlar ile uyum içerisindedir. Geri esnemeyi etkileyen ikinci önemli parametre ise tutma basıncıdır. Sac tutma basıncı 2 bar'dan 9 bar'a çıktığında nispeten geri esneme açısı düşmüştür. Geri esnemeyi etkileyen üçüncü önemli parametre ise artım miktarıdır. Artım miktarındaki artışla ters orantılı olarak geri esneme açısının azaldığı görülmüştür. Seçilen parametreler arasında en az etkili parametre ise ilerleme hızıdır. İlerleme hızındaki artış takım ile iş parçası arasında sürtünmeyi arttırmakta, sonucunda ise ısı oluşmaktadır. Isı artışına bağlı olarak şekillendirme kolaylaşmakta ve oluşan ısının olumlu etkisi ile parça duvarlarındaki artık gerilmeler de nispeten azalmakta bu durumda geri esneme üzerine olumlu etki yapmaktadır. Leonhardt ve diğ. [19], yaptıkları çalışmada ısı etkisinin geometriksel sapmaları azalttığını belirtmişlerdir. Benzer şekilde Naranjo ve diğ. ısı etkisi ile geri esnemenin azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca seçilen parametreler

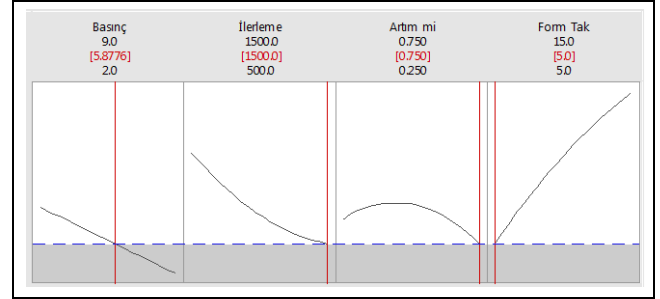
arasındaki ikili etkileşimlerin göz ardı edilmemesi gerektiği söylenebilir.



Şekil 7. Geri esneme açısı için pareto grafiği.

Figure 7. Pareto plot for springback angle.

Şekil 8'de verilen yanıt optimizasyon grafiği incelendiğinde geri esneme için optimum değerlerin; 5.8776 bar basınç, 1500 mm/dk. ilerleme hızı, 0.75 mm artım miktarı ve 5 mm takım çapı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 8. Geri esneme açısı için yanıt optimizasyon grafiği.

Figure 8. Response optimization plot for springback angle.

Geris esneme açısı için elde edilen regresyon denklemi Eşitlik 2'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \Delta \alpha = & -0.46 + 0.315 P - 0.00320 f + 8.93 \Delta z + 0.047 D \\ & + 0.000001 f * f - 6.86 \Delta z \\ & * \Delta z - 0.0074 D * D \\ & - 0.000084 P * f - 0.372 P \\ & * \Delta z - 0.0119 P * D \\ & - 0.00099 f * \Delta z + 0.000188 f \\ & * D + 0.167 \Delta z * D \end{aligned} \quad (2)$$

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, otomotiv sektörü başta olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılan Erdemir 7136 sacı kayar artımlı şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Geri esneme açısı için yanıt yüzey metodolojisi (YYM) kullanılarak optimizasyon çalışması yapılmıştır. Çalışmanın neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Geris esneme olayı boyutsal tamlik açısından oldukça önemlidir. Geri esneme açısını etkileyen en önemli parametreler; form takım çapı, tutma basıncı, artım miktarı ve ilerleme hızı şeklinde sıralanabilir,

İlerleme hızı arttıkça geri esneme açısı düşmüştür,

Artım miktarı 0.25 mm'den 0.5 mm'ye çıktığında geri esneme artış göstermiş ancak 0.75 mm'de en düşük seviyeye gerilemiştir,

Takım çapı arttıkça takımla iş parçası arasındaki temas alanındaki artışa paralel olarak geri esneme açısı da artmıştır, Tutma basıncının etkisini daha iyi analiz etmek için daha farklı basınç parametrelerinin seçilmesi gerektiği anlaşılmaktadır, Artımlı sac şekillendirmede lokal deformasyonla şekillendirme gerçekleştiği için geri esneme olayı da diğer şekillendirme işlemlerine göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu kapsamda hem farklı malzemeler hem de farklı parametreler kullanılarak çalışmalar genişletilebilir.

5 Conclusions

In this study, Erdemir 7136 sheet, which is widely used in many fields, especially in the automotive industry, was formed by the rolling blank holder incremental sheet forming method. For the spring-back angle, an optimization study was performed using the response surface methodology (RSM). As a result of the study, the following results were obtained.

Springback is very important in terms of dimensional completeness. The most important parameters affecting springback angle; tool diameter, holding pressure, increment amount and feed rate,

As the advance speed increased, the springback angle decreased,

When the increment amount increased from 0.25 mm to 0.5 mm, the springback increased, but decreased to the lowest level at 0.75 mm,

As the tool diameter increases, parallel to the increase in the contact area between the tool and the work piece, the springback angle also increased,

It is understood that more different pressure parameters should be selected in order to better analyze the effect of holding pressure.

In incremental sheet metal forming, spring-back event has a more complex structure compared to other forming processes, as forming occurs with local deformation. In this context, studies can be expanded by using both different materials and different parameters.

6 Teşekkür

Bu çalışma kapsamındaki geri esneme ölçümleri daha önce yayımlanan "Investigation of formability of HC380LA material via the TPIF-RL incremental forming method" (<https://doi.org/10.1080/03019233.2019.1711351>) isimli çalışma [23] kapsamında elde edilen numuneler kullanılarak yapılmıştır. Daha önce yayımlanan çalışmada geri esneme ölçümleri çeşitli sebeplerden ötürü yapılamamış, bu çalışma kapsamında yapma imkânı bulunmuştur. Ayrıca geri esneme açılarının ölçümünde yardımcı olan "Her Makina Kalıp" firması ve çalışanlarına da teşekkür ederiz.

7 Kaynaklar

- [1] Choi H, Lee C. "A mathematical model to predict thickness distribution and formability of incremental forming combined with stretch forming". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 55(Part B), 164-172, 2019.
- [2] Bagudanch I, Garcia-Romeu ML, Centeno G, Elías-Zúñiga A, Ciurana J. "Forming force and temperature effects on single point incremental forming of polyvinylchloride". *Journal of Materials Processing Technology*, 219, 221-229, 2015.

- [3] Song X, Zhang J, Zhai W, Taureza M, Castagne S, Danno A. "Numerical and experimental study of micro single point incremental forming process". *Procedia Engineering*, 207, 825-830, 2017.
- [4] Gupta P, Jeswiet J. "Manufacture of an aerospace component by single point incremental forming". *Procedia Manufacturing*, 29, 112-119, 2019.
- [5] Shamsari M, Mirnia MJ, Elyasi M, Baseri H. "Formability improvement in single point incremental forming of truncated cone using a two-stage hybrid deformation strategy". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(5-8), 2357-2368, 2018.
- [6] Dakhli M, Boulila A, Tourki Z. "Effect of generatrix profile on single-point incremental forming parameters". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(5-8), 2505-2516 2017.
- [7] Gatea S, Ou H, McCartney G. "Review on the influence of process parameters in incremental sheet forming". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1-4), 479-499, 2016.
- [8] Li X, Han K, Li Z, Li D, Li Z. "One novel method to improve surface quality in incremental sheet forming". *Procedia Engineering*, 207, 842-847, 2017.
- [9] Yue ZM, Chu XR, Gao J. "Numerical simulation of incremental sheet forming with considering yield surface distortion". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(5-8), 1761-1768, 2017.
- [10] Dang T, Tebaay LM, Gies S, Tekkaya AE. "Multiple forming tools in incremental forming - influence of the forming strategies on sheet contour". *AIP Conference Proceedings*, 1769, 1-5, 2016.
- [11] Shayti M, Bahloul R, BelHadjSalah H, Zemzemi F. "Optimization techniques applied to single point incremental forming process for biomedical application". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(5-8), 1789-1804, 2018.
- [12] Seçgin Ö, Özsert İ. "Formability analysis of DC01 sheet in the incremental sheet forming method". *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, 40(5), 507-515, 2019.
- [13] Micari F, Ambrogio G, Filice L. "Shape and dimensional accuracy in single point incremental forming: state of the art and future trends". *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1-3), 390-395, 2007.
- [14] Jeswiet J, Micari F, Hirt G, Bramley A, Dufloy J, Allwood J. "Asymmetric single point incremental forming of sheet metal". *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 54(2), 88-114, 2005.
- [15] Shawn CH, Cao J, Xia ZC. "An accelerated springback compensation method". *International Journal of Mechanical Sciences*, 49(3), 267-279, 2007.
- [16] Lasunon O, Knight WA. "Comparative investigation of single-point and double-point incremental sheet metal forming processes". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 221(12), 1725-1732, 2007.
- [17] Li J, Geng P, Shen J. "Numerical simulation and experimental investigation of multistage incremental sheet forming". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(9-12), 2637-2644, 2013.
- [18] Zhang Z, Zhang H, Shi Y, Moser N, Ren H, Ehmann KF, Cao J. "Springback reduction by annealing for incremental sheet forming". *Procedia Engineering*, 5, 696-706, 2016.

- [19] Leonhardt A, Kurz G, Victoria-Hernández J, Kräusel V, Landgrebe D, Letzig D. "Experimental study on incremental sheet forming of magnesium alloy AZ31 with hot air heating". *Procedia Manufacturing*, 15, 1192-1199, 2018.
- [20] Ambrogio G, Costantino I, De Napoli L, Filice L, Fratini L, Muzzupappa M. "Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: A numerical and experimental investigation". *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154(1-3), 501-507, 2004.
- [21] Naranjo JA, Miguel V, Martínez A, Coello J, Manjabacas MC. "Evaluation of the formability and dimensional accuracy improvement of Ti6Al4V in warm SPIF processes". *Metals*, 9(3), 1-17 2019.
- [22] Wei H, Zhou L, Heidarshenas B, Ashraf IK, Han C. "Investigation on the influence of springback on precision of symmetric-cone-like parts in sheet metal incremental forming process". *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2(2), 140-145, 2019.
- [23] Şen N, Taşdemir V, Seçgin Ö. "Investigation of formability of HC380LA material via the TPIF-RL incremental forming method". *Ironmaking and Steelmaking*, <https://doi.org/10.1080/03019233.2019.1711351> 2020.
- [24] Bakhshi-Jooybari M, Rahmani B, Daezadeh V, Gorji A. "The study of spring-back of CK67 steel sheet in V-die and U-die bending processes". *Materials and Design*, 30(7), 2410-2419, 2009.
- [25] Han F, Mo JH, Cui XH, Wang ZL. "Studies on the springback mechanism of incremental sheet forming based on FEM simulation". *Advanced Materials Research*, 102-104, 242-246, 2010.
- [26] Basmacı G. "Optimization and influence of cutting parameters on surface roughness during turning of ASTM B574 (Hastelloy C-22) using a hybrid of Taguchi and RSM methods". *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 761-771, 2018.
- [27] Samet U. "Improving of a response surface methodology for the simultaneous prediction of emission and performance in a diesel engine working with waste tire pyrolysis oil". *Duzce University Journal of Science and Technology*, 7(3), 1261-1278, 2019.
- [28] Liu Z, Liu S, Li Y, Meehan PA. "Modeling and optimization of surface roughness in incremental sheet forming using a multi-objective function". *Materials and Manufacturing Processes*, 29(7), 808-818, 2014.
- [29] Han F, Mo JH, Qi HW, Long RF, Cui XH, Li ZW. "Springback prediction for incremental sheet forming based on FEM-PSONN technology". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(4), 1061-1071, 2013.