



AA 5754-O alaşımının ılık derin çekilmesi üzerine kalıp yüzey açısı ve baskı plakası kuvvetinin etkisinin deneysel araştırılması

Cebeli Özek¹, Vedat Taşdemir^{2*}

¹Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

²Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elbistan Meslek Yüksekokulu, Makine Programı, Kahramanmaraş, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- AA5754-O alaşımının ılık derin çekilmesi
- Et kalınlığı ve şekillendirme kuvvetine sıcaklık, kalıp yüzey açısı ve baskı plakası kuvvetinin etkisi
- Çekilen kaplardaki sertlik ve geri yaylanma ilişkisi

Makale Bilgileri

Geliş: 28.12.2015

Kabul: 24.11.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.300608

Anahtar Kelimeler:

Ilık derin çekme,
et kalınlığı,
kalıp geometrisi,
sertlik dağılımı,
geri yaylanma,
AA5754 alaşımı

ÖZET

Bu çalışmada, AA 5754-O alaşımının ılık derin çekilmesine kalıp yüzey açısı, baskı plakası kuvveti ve sıcaklığın etkisinin deneysel olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için, kalıp yüzeylerine 0-15° arasında açılar verilerek deneyler oda sıcaklığı(OS), 100°C, 175°C ve 250°C sıcaklıklarında, 1,2 kN, 2,4 kN ve 3,6 kN baskı plakası kuvvetlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, kalıp boşluğu 1,35 mm, istampa ve kalıp radyüsleri ise 8 mm sabit tutulmuştur. Kalıpla iş parçası arasındaki sürtünme kuvvetini düşürmek için yüksek sıcaklık ve baskılar altında özelliğini yitirmeyen MoS₂ katı yağlayıcı kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde et kalınlığı, istampa kuvveti ve geri yaylanma üzerine kalıp yüzey açısı ve baskı plakası kuvvetinin etkisinin OS ve 100°C'de daha belirgin olduğu, sıcaklık arttıkça et kalınlığı dağılımının daha homojen hale geldiği; şekillendirme kuvveti, geri yaylanma miktarı ve sertlik değerinin ise önemli ölçüde düştüğü belirlenmiştir. Yine kap duvarı boyunca sertlik değerinin kap ağzına doğru gidildikçe arttığı ve sıcaklığın önemli etkisinin olduğu görülmektedir.

Experimental investigation of the effects of blank holder force and die surface angle on the warm deep drawing of AA5754-O alloy

H I G H L I G H T S

- The warm deep drawing of AA5754-O alloy
- The Effect of temperature, die surface angle and blank holder force on the wall thickness and forming force
- Hardness and springback relation at drawn cups

Article Info

Received: 28.12.2015

Accepted: 24.11.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.300608

Keywords:

Warm deep drawing,
wall thickness,
die geometry,
hardness distribution,
springback,
AA5754 alloy

ABSTRACT

In this study, it is aimed to determine the experimental effects of die surface angle, blank holder force and temperature on the warm deep drawing of AA5754 alloy. For this purpose, the die surfaces were machined between 0-15° and the experiments were performed under 1.2 kN, 2.4 kN and 3.6 kN blank holder forces and at different temperature values, namely; room temperature (RT), 100°C, 175°C, and 250°C. In the experiments, the die clearance, punch and die radii were kept constant as 1.35 mm and 8 mm, respectively. In order to reduce the friction force between die and blank, MoS₂ was used as lubricant due to its high temperature and pressure resistance. It is experimentally found that the effects of drawing parameters were more dominant at RT and 100°C. A further increase in forming temperature lead to lower forming forces, springback ratios, hardness and the more homogenous distribution of the wall thickness. It is also observed that the hardness distribution along the cup wall was tendency of increase toward the top of the cup with a significant effect of temperature.

* Sorumlu Yazar/Corresponding author: vtasdemir@ksu.edu.tr / Tel: +90 344 300 4085

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Derin çekme işlemi, ıstampanın mekanik hareketi ile sac metalleri şekillendiren bir plastik şekil verme yöntemidir. Bu yöntemde, iki boyutlu, düzlemsel geometriye sahip iş parçalarından derin çekme kalıbı denilen elemanlar yardımıyla belirli derinlik ve profillere sahip üç boyutlu ürünler elde edilir [1]. Üretilen kaplar, birden fazla operasyon ile de oluşturulabilirler [2]. Basit ve karmaşık şekilli birçok parça kolaylıkla imal edilebildiğinden dolayı sanayideki uygulamalarda bu yöntem oldukça önemli bir yere sahiptir [3, 4]. Son yıllarda, hafif ve dayanıklı malzemelerin kullanımları birçok alanda giderek artmaktadır [5]. Bu malzemelerden bir tanesi de alüminyum alaşımlarıdır. AA 5754 Al-Mg alaşımları, sahip oldukları yüksek süneklik ve dayanıklılık [6], iyi kaynak edilebilirlik ve düşük yoğunluk gibi özelliklerinden dolayı otomotiv endüstrisi başta olmak üzere yaygın kullanım alanına sahiptirler [7]. Ancak bu alaşımların şekillendirilebilirlikleri, mikroyapıları nedeniyle oda sıcaklığında çelik sac malzemelere nazaran çok düşüktür [8]. Yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki bir sıcaklık değerinde ise bu oran önemli derecede artmaktadır. Oda sıcaklığında Al-Mg alaşımlarının davranışları deformasyon hızından bağımsız iken, 100°C'nin üzerine çıkıldığında akma mukavemeti nispeten düşmeye başlar, buna karşılık deformasyon hızı hassasiyet indeksi(m) ise artar. Sıcaklıkla birlikte akma mukavemetindeki bu azalma, özellikle 175°C'nin üzerinde daha da belirgin hale gelir [9]. Deneysel çalışmalar, m indeks değerinin pozitif olması halinde akma dayanımının düştüğünü, negatif olması durumunda ise dinamik deformasyon sertleşmesine yol açtığını göstermiştir [10]. Dinamik deformasyon sertleşmesi olayına Portevin–Le Chatelier (PLC) etkisinin sebep olduğu bilinmektedir [11]. Bundan dolayı oda sıcaklığında Al-Mg alaşımlarının şekillendirilebilirliği PLC etkisinden dolayı sınırlı oranda kalmaktadır [12]. Bu olay katı Mg alaşımlarının dislokasyon hareketlerini engellemesi ile açıklanmaktadır [13].

Sıcaklık etkisi ile şekillendirmenin iki önemli avantajı vardır [14]. Birincisi, PLC etkisinin sıcaklık artışı ile ortadan kalkmasından dolayı Al-Mg alaşımlarının şekillendirilebilirliklerinde önemli artışın görülmesidir [15]. Boogaard, AA 5754 alaşımının limit çekme oranı (LÇO) üzerine yapmış olduğu çalışmada sıcaklığın etkisi ile çekme oranının %23,8, yine Bolt ve arkadaşları da sıcaklık etkisi ile AA 5754 alaşımının çekme oranının %29,1 arttığını belirtmişlerdir [7, 16]. Sıcaklık artışının bir diğer avantajı ise şekillendirme sırasında deformasyondan kaynaklı kap duvarlarındaki gerilmeleri azaltmasıdır. Geri yaylanma sac metal şekillendirmedeki önemli kusurlardan biridir [17]. Bu gerilme durumu kaplarda geri yaylanmalara sebep olur. Laurant ve arkadaşları AA5754-O alaşımının ılık şekillendirme koşullarındaki mekanik ve geri yaylanma özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda geri yaylanmaya sebep olan kap duvarlarındaki teğetsel gerilmelerin dağılımını etkileyen temel faktörün sıcaklık

olduğunu belirtmişlerdir [18]. Görüleceği üzere birçok araştırmacı yaptıkları çalışmalarda alüminyum alaşımlarının şekillendirilebilirliklerinde sıcaklık etkisi ile önemli artışlar sağlamışlardır. Şekillendirmeyi etkileyen diğer bir faktör de kalıp tasarımı ve geometrisidir. Kalıp geometrisi şekillendirilecek sacın kalıp boşluğuna akışını kolaylaştıracak şekilde tasarlanmalıdır. Seçgin ve Savaş kalıp yüzeyine açı vererek tasarladıkları yeni kalıp sistemi ile yaptıkları deneylerde LÇO'nun %24 arttığını, kap duvar kalınlığındaki incelmeye ise %11 azaldığını tespit etmişlerdir [19]. Shoichiro ve arkadaşları da yaptıkları çalışmada, tasarladıkları kalıp sistemi ile lokal ısıtma ve soğutma tekniğini kullanarak Mg alaşımlarının LÇO'sunu 2,1'den 5'e yükselterek %238'lik artış sağlamışlardır [20].

Yapılan bu çalışmalar, kalıp tasarımının ürünlerin şekillendirilmesini etkileyen önemli bir parametre olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, malzemenin yapısal ve mekanik özellikleri, malzeme geometrisi, sürtünme, yağlayıcı türü, baskı plakası kuvveti, kalıp boşluğu, ıstampa hızı gibi faktörler de şekillendirmeyi etkileyen diğer önemli parametrelerdir [21]. Görüldüğü üzere deneyler esnasında kullanılan parametreler deney sonuçlarını önemli ölçüde etkilemektedir.

Bu çalışmada, sıcaklık ve kalıp geometrisinin AA 5754-O alaşımının derin çekilebilirliği üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada, mevcut literatürden farklı olarak, kalıp ile baskı plakası yüzeylerine 0°, 5°, 10° ve 15°'lik açılar verilmiş ve deneyler oda sıcaklığı, 100°C, 175°C ve 250°C sıcaklıklarda yapılmıştır. Seçilen bu işlem parametrelerinin derin çekme üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır.

2. MALZEME VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Materyal (Material)

Deneylerde, 1 mm kalınlığında ticari olarak temin edilmiş EN AW-5754 (AlMg3) sac malzeme kullanılmıştır. Malzeme, "H111" formunda temin edilmiş olup, çekme deneylerinden önce malzeme 380°C sıcaklıkta 4 saat tavlama tabi tutularak "O" formuna getirilmiştir. Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

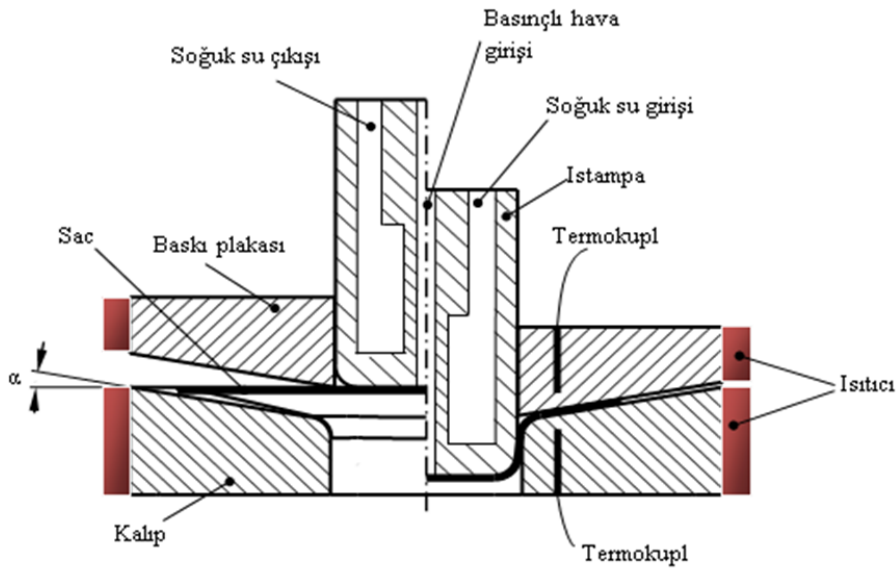
Sac malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla 5000 kN kapasiteli SHIMATZU marka çekme test cihazında 5 mm/dak çekme hızında 0°, 45° ve 90° olmak üzere üç farklı haddeleme yönünde toplam 9 adet numune çekme testine tabi tutulmuştur ve ortalaması alınmıştır. Sertlik ölçümü ise hassas bir şekilde numune alındıktan sonra bakalit içerisine gömülmüş ve çeşitli zımparalama ve parlatma işlemlerinin ardından Emcotest DuraScan mikrosertlik cihazı ile levha kalınlığının orta düzlemi doğrultusunda yapılmıştır. Malzemenin mekanik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. EN AW-5754 (AlMg3) sacının kimyasal analizi, % (Chemical composition of EN AW-5754 (AlMg3), %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Al
0,13	0,3	0,019	0,14	2,72	0,005	0,005	0,022	0,018	0,01	0,013	Geriye kalan

Tablo 2. Deney numunesinin oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri (Mechanical properties of test specimen at room temperature)

Hadde yönü (°)	Akma dayanımı (N/mm ²)	Çekme dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)	Elastikiyet modülü (GPa)	Sertlik, HV0.2	
					Isıl işlem öncesi, "H111"	Isıl işlem sonrası, "O"
0	167,74	248,54	10,32	66	82,6	61,7
45	163,25	235,16	12,82			
90	165,64	240,11	11,68			

**Şekil 1.** Deney düzeneği şeması (Schematic design of the testing apparatus)

2.2. Metot (Method)

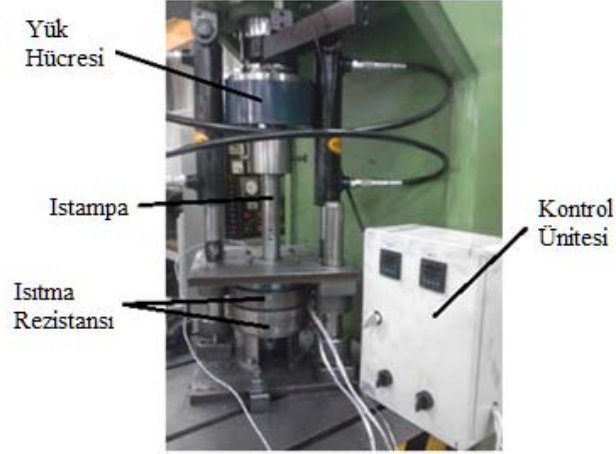
Bu çalışma ile, sıcaklığın ve kalıp geometrisinin derin çekme işlemine etkilerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Şekillendirilebilirliği kontrol etmek için deneyler, kalıp ve baskı plakası yüzeylerine 0°, 5°, 10° ve 15° açılar verilerek oda sıcaklığı (OS), 100°C, 175°C ve 250°C sıcaklıklarda yapılmıştır. İstampa ve kalıp köşe yarıçapları 8 mm olarak sabit alınmış, baskı plakası kuvveti (BPK) ise 1,2 kN, 2,4 kN ve 3,6 kN olarak uygulanmıştır. Deneylerde, yüzeyler arasındaki sürtünmeleri azaltmak amacıyla MoS₂ (3-4 µm) yağlayıcı kullanılmıştır. Şekil 1'de deney düzeneğinin şematik görüntüsü verilmiştir. Tablo 3'te ise deneylerde kullanılan işlem parametreleri verilmiştir. Deneyleri gerçekleştirmek için kalıp ve baskı plakasına ısıtıcı rezistanslar yerleştirilerek ısıtılmış, ısıtma su ile ve sac malzeme ise basınçlı hava ile soğutulmuştur. Kalıp ve baskı plakasının sıcaklıkları kalıplar içerisine yerleştirilen termokupl ile kontrol edilmiştir. Isıtma işleminde kalıp ve baskı plakasını istenilen sıcaklıkta tutmak için kontrol ünitesi kurulmuştur. Çekme esnasında ıstampaya gelen

kuvvetin belirlenmesi için CAS LS – 20T marka 20 ton kapasiteli ±2 kg hassasiyetli tek yönlü kuvvet ölçme özelliğine sahip bir yük hücresi kullanılmıştır. İstampa kuvvetleri 10⁻¹ saniye aralıklarla ölçülmüştür.

Tablo 3. Deneylerde kullanılan işlem parametreleri (Drawing tool geometry and process parameters)

Parametre	Ölçü
Kalıp radyüsü, mm	8
İstampa radyüsü, mm	8
Baskı plakası kuvveti, kN	1,2, 2,4, 3,6
İlkel parça çapı, mm	85
İstampa hızı, mm/s	4
İstampa çapı, mm	39,60
Kalıp çapı, mm	42,30
Sac kalınlığı, mm	1
Tek taraflı kalıp boşluğu, mm	1,35
Kalıp yüzey açısı, °	0, 5, 10, 15
Çekme sıcaklığı, °C	25, 100, 175, 250

Deneysel çalışmaların neticesinde elde edilen kapların kalınlık dağılımlarının etkisini belirlemek için deney numunesi hassas bir şekilde kesilerek hadde doğrultusunda 5 mm aralıklarla bölüntülenmiş ve QLR digit marka 10^{-4} mm hassasiyetindeki dijital mikrometre ile belirlenen noktaların et kalınlıkları ölçülmüştür (Şekil 3). Kalıp açısı ve sıcaklığın geri yaylanmaya olan etkisini belirlemek için yapılan deneylerde baskı plakası kuvveti 2,4 kN olarak sabit tutulmuştur. Yapılan geri yaylanma ölçümleri için çekilen kabın üst bölgesinden ve alt bölgesinden iki bilezik çıkartılmıştır. Bileziklerin kesimi torna tezgâhında hassas olarak yapılmıştır. Geri yaylanma miktarını ölçmek için



Şekil 2. Deney seti (Testing apparatus)

Deneysel çalışmaların neticesinde elde edilen kapların kalınlık dağılımlarının etkisini belirlemek için deney numunesi hassas bir şekilde kesilerek hadde doğrultusunda 5 mm aralıklarla bölüntülenmiş ve QLR digit marka 10^{-4} mm hassasiyetindeki dijital mikrometre ile belirlenen noktaların et kalınlıkları ölçülmüştür (Şekil 3). Kalıp açısı ve sıcaklığın geri yaylanmaya olan etkisini belirlemek için yapılan deneylerde baskı plakası kuvveti 2,4 kN olarak sabit tutulmuştur. Yapılan geri yaylanma ölçümleri için çekilen kabın üst bölgesinden ve alt bölgesinden iki bilezik çıkartılmıştır. Bileziklerin kesimi torna tezgâhında hassas olarak yapılmıştır. Geri yaylanma miktarını ölçmek için

bilezikler Şekil 4’de görüldüğü gibi eksenel doğrultuda kesilmiştir. Kesme sonucunda meydana gelen açılma ölçülmüştür. Şekil 4’de ölçümler için kullanılan kap ve bileziğin çıkartılması görülmektedir. Kapların sertlik ölçümleri ise Emcotest DuraScan mikrosertlik cihazı ile hadde doğrultusunda kaplardan kesilip çıkartılmış ve bakalit içerisine gömülmüş, çeşitli zımparalama ve parlatma işlemleri yapıldıktan sonra orta düzlem boyunca 5 mm aralıklarla 200 gr yük uygulanarak (HV 0,2 kg) yapılmıştır.

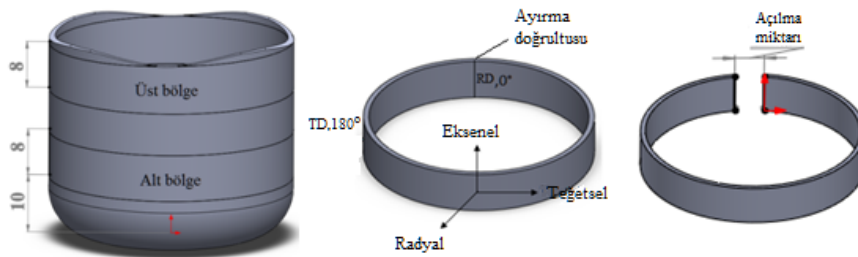


Şekil 3. Et kalınlığı ölçümü (The measurement of wall thickness)

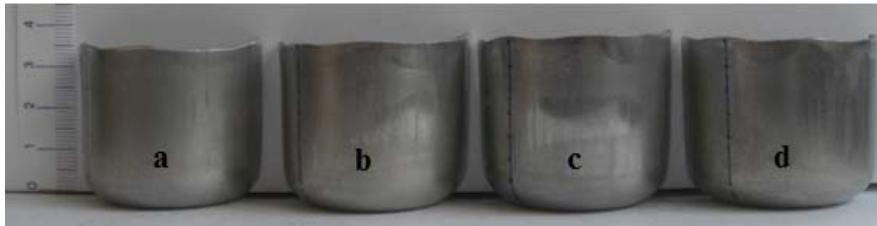
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Et Kalınlığı Sonuçları (Results for Wall Thickness)

Derin çekme işlemi esnasında çekilen kap üzerinde birçok gerilme meydana gelmektedir. Meydana gelen bu gerilmeler kabın et kalınlığı değişimini doğrudan etkilemektedir [19, 22]. Bundan dolayı derin çekme esnasında dikkat edilmesi gereken hususlardan biri de et kalınlığı değişimidir. Çekme işleminin başarısı et kalınlığının değişiminin başarısına bağlıdır. Kap cidarlarındaki et kalınlığı değişimi iş parçası kalitesini de etkilemektedir [23].



Şekil 4. Geri yaylanma ölçümü için hazırlanan bilezik (Ring prepared to springback measurement)



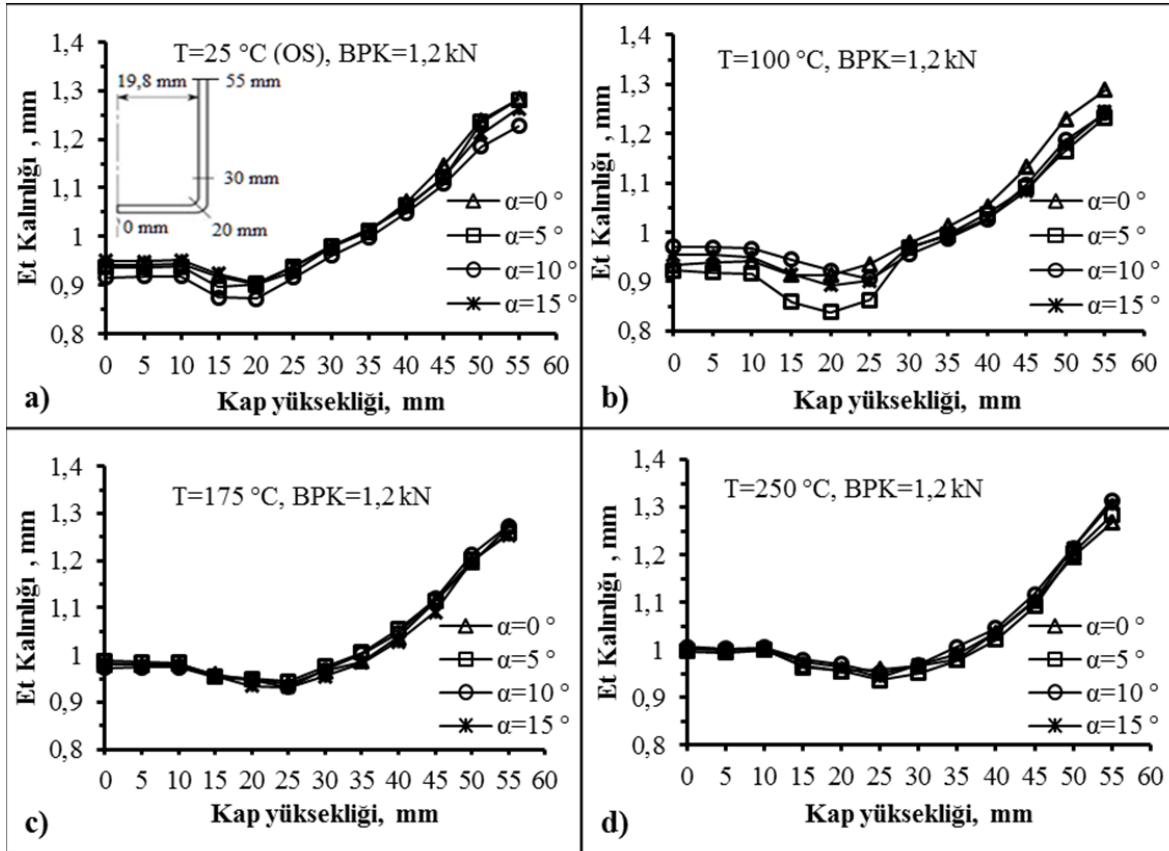
Şekil 5. Oda sıcaklığı ve 1,2 kN BPK’de elde edilen numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$
(Specimens for Room temperature and 1,2 kN BHF)

Şekil 5’de, oda sıcaklığı(OS) ve 1,2 kN BPK’ de elde edilen deney numuneleri görülmektedir. Şekil 6’da şekillendirme sıcaklığı ve kalıp açısının et kalınlığı üzerindeki değişimi görülmektedir. Şekil 6a’da oda sıcaklığı ve 1,2 kN baskı plakası kuvveti değerlerinde α ’nın haddeleme yönü boyunca et kalınlığı değişimine etkisi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi 0-15 mm arasındaki bölgede et kalınlığının azaldığı ve yaklaşık olarak 0,85-0,95 mm aralığında olduğu, çekilen sac kalınlığının ortalama %10 oranında azaldığı belirlenmiştir. 15 mm’den sonra kap üst bölgelerine doğru et kalınlığı kademeli olarak artmakta, 32 mm’den sonra ise kalınlık değerinin sac malzeme kalınlığından fazla olduğu tespit edilmiştir. Kalınlıktaki bu artış ortalama %22’dir. α ’nın bütün değerleri için kalınlıktaki değişim benzer eğilim göstermiştir.

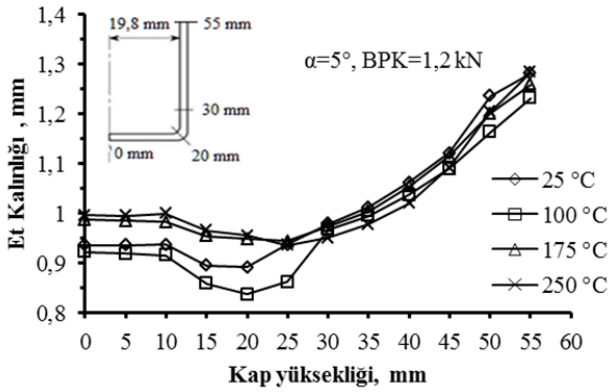
Şekil 6b’de ise 100 °C ve 1,2 kN baskı plakası kuvveti değerlerinde α ’nın haddeleme yönü boyunca et kalınlığı değişimi görülmektedir. Şekil 6b, Şekil 6a ile benzer eğilim göstermiş ancak sıcaklık 100 °C’ ye çıktığında kap köşesindeki (20 mm’deki) incelme maksimum değerine ulaşmıştır. Bu noktadaki incelme yaklaşık %17 ile 5°’lik kalıpta görülmüştür. 100°C’de yapılan deneylerde kalıp açılarının kalınlık değişimine etkisi çok daha belirgin hale gelmiştir. Yapılan çalışmalarda bu sıcaklıkta mukavemet değerinin nispeten arttığı görülmektedir.

Şekil 6c ve 6d birlikte incelendiğinde sıcaklık artışı ile kalınlık dağılımının daha homojen hale geldiği ve kalıp açısının etkisinin çok daha sınırlı olduğu görülmektedir. Bu deney şartları için 175°C sıcaklığın şekillendirme için ideal olduğu, sıcaklık 250°C’ye çıktığında kap ağızlarındaki kalınlığın daha da arttığı söylenebilir.

Şekil 7’de, $\alpha=5^\circ$ kalıp açısı ve 1,2 kN baskı plakası kuvveti değerlerinde şekillendirme sıcaklığının et kalınlığı değişimine etkisi verilmiştir. Şekilden, bütün sıcaklıklar için kalınlıkta 0-10 mm aralığında önemli bir değişimin olmadığı, bu aralıktan sonra 20-25 mm aralığına kadar incelmelerin devam ettiği, sonrasında ise kalınlıkta artışın olduğu görülmektedir. Oda sıcaklığında (25°C), kap merkezindeki kalınlık 0,936 mm’dir. Şekillendirme sıcaklığı 250°C’ye çıkarıldığında merkezdeki kalınlık 0,997 mm olarak ölçülmüştür. Sıcaklığa bağlı olarak kap tabanındaki kalınlık değişimi yaklaşık %6’dır. Tüm sıcaklık değerleri için en büyük incelmelerin kap köşesinde ve hemen üzerinde olduğu görülmektedir. Oda sıcaklığında 0,938 mm olarak ölçülen en ince kalınlık, 100°C’de 0,838 mm, 175°C’de 0,944 mm, 250°C’de ise 0,938 mm ölçülmüştür. Kap üst kısımlarına doğru çıkıldıkça kalınlık değişiminin tüm sıcaklık değerleri için çok sınırlı olduğu görülmektedir. Sonuç olarak sıcaklığın et kalınlığını etkileyen en önemli bir parametre olduğu söylenebilir.



Şekil 6. Sıcaklığın ve kalıp açısının et kalınlığı üzerindeki etkisi (Effect on wall thickness of temperature and die angle)



Şekil 7. Sıcaklığın et kalınlığı üzerindeki etkisi (Effect of temperature on wall thickness)

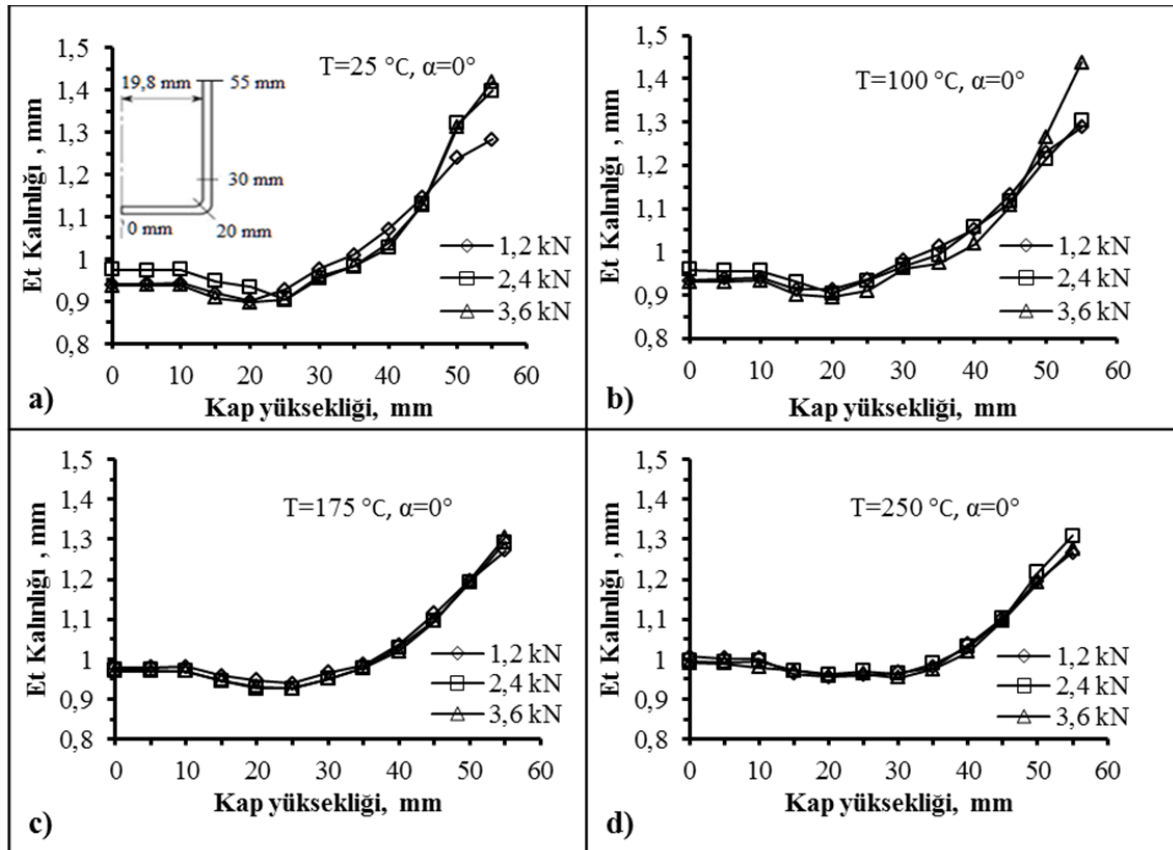
Şekil 8’de sabit R, β , α ($R=8$ mm, $\beta=2,14$ ve $\alpha=0^\circ$) değerlerinde ve farklı şekillendirme sıcaklıklarında BPK’nın et kalınlığı üzerindeki etkisinin değişimi görülmektedir. Şekilden, kalınlık dağılımının homojenleşmesi açısından sıcaklığın önemli bir faktör olduğu görülmektedir. Şekil 8a ve 8b’de, farklı BPK’lerinde oda sıcaklığı ve 100°C’de yapılan deneylere ait kalınlık değişimlerini göstermektedir. Şekil 8a ve 8b’deki kalınlık değişimleri benzer eğilim göstermektedir. Kapın yüksekliği arttıkça üst kısımlara doğru BPK’nın artmasına bağlı olarak malzeme yığılmasından dolayı

kalınlığın da arttığı görülmektedir. En fazla yığılma özellikle kap ağzına doğru (55 mm konumunda) baskı plakası kuvvetindeki artışla orantılı olarak meydana gelmiştir. Ancak, 175°C ve 250°C’de yapılan deneylerde ise hem kap tabanı hem de kabın üst kısımlarındaki kalınlık değişiminin daha homojen hale geldiği, BPK’nın önemli bir etkisinin olmadığı ve bütün BPK’lerinde kalınlık dağılımının hemen hemen eşit olduğu görülmektedir. Bu durum sıcaklık etkisi ile deformasyon sertleşmesinin ortadan kalkmasına bağlı olarak dislokasyon hareketlerinin kolaylaşması ve malzeme akışının artması ile açıklanabilir.

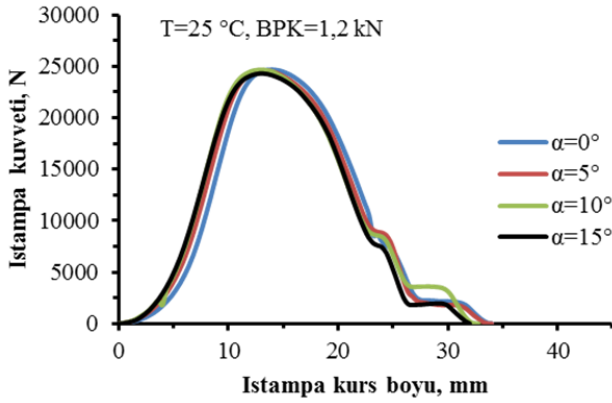
3.2. Şekillendirme Kuvveti Sonuçları (Results for Forming Force)

Istampa ile sac malzeme arasındaki temas sonucu sürtünmenin şiddetlenmesi ile gerilme kuvveti artar. Istampa deformasyon hareketine devam etmesi ile gerilme kuvveti de o oranda artmaya devam eder. Gerilme kuvvetindeki bu artış kalınlığın önemli ölçüde azalmasına ve kabın aşırı deformasyona uğramasına neden olur. Bundan dolayı seçilen deney parametreleri istampa kuvvetini önemli ölçüde etkiler.

Şekil 9’da, oda sıcaklığında kalıp açısının istampa kuvvetine etkisi verilmiştir. Grafik incelendiğinde bütün açı değerleri için istampa kuvvetinde önemli bir değişimin olmadığı görülmektedir.

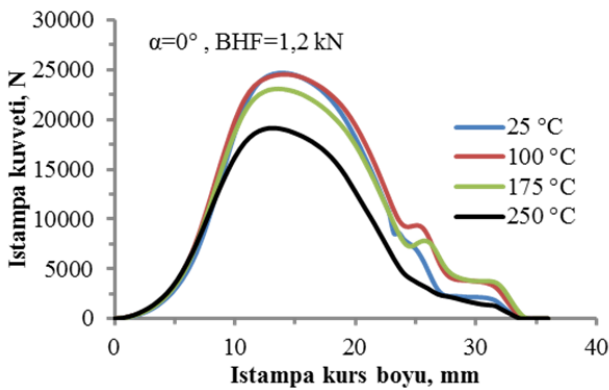


Şekil 8. BPK’nın sıcaklığa bağlı olarak et kalınlığı üzerindeki etkisi (Effect of BHF on wall thickness)

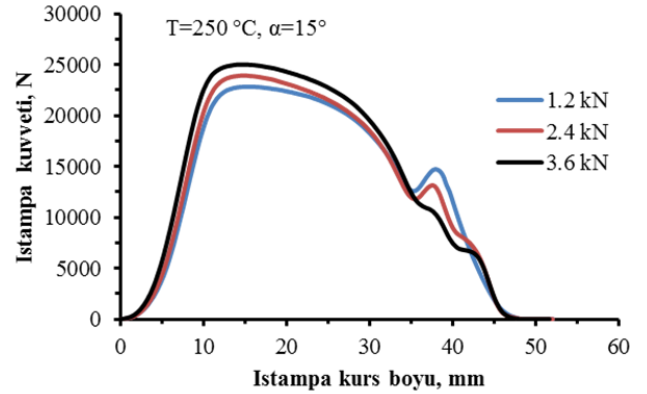


Şekil 9. Oda sıcaklığında kalıp açısının istampa kuvvetine etkisi (Effect of the die angle on punch force at room temperature)

Istampa kuvveti değerinin sıcaklığa bağlı değişimi ise Şekil 10'da verilmiştir. Şekilde, sıcaklığın istampa kuvvetini önemli derecede etkilediği görülmektedir. Istampa kuvvetininin, 25°C'de 24,68 kN iken 250°C'de 19,15 kN değerine düştüğü, böylece değişimin %22,4 olduğu bulunmuştur. Yapılan birçok çalışmada şekillendirme sıcaklığının artması ile malzemenin deformasyon sertleşmesi üssünün (n) azaldığı, deformasyon hızı duyarlılık üssünün (m) ise attığı tespit edilmiştir. Bir malzemenin şekil değiştirme hızı duyarlılık üssünün yüksek olması da yüksek süneklığe işaret etmektedir. Sıcaklık arttıkça malzeme mukavemeti azaldığından deformasyon için gerekli enerjide soğuk şekillendirmeye göre daha düşüktür [24]. Şekil 11'de ise istampa kuvvetinin baskı plakası kuvveti ile değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde, BPK'nin artması ile şekillendirme kuvvetinin arttığı ve kuvvet grafiğinde iki tepe noktasının olduğu görülmektedir. Birinci nokta kesit daralmasının başladığı noktayı, ikinci nokta ise yetersiz baskı plakası kuvvetinden dolayı çekilen sac malzemenin kenarında oluşan ondülasyonların kalıp boşluğuna sıkışmasından kaynaklanan kuvvet artışını göstermektedir. Özellikle 1,2 kN BPK'de en büyük değere ulaşan ütüleme kuvveti 3,6 kN'da ortadan kalkmıştır. Istampa kuvveti sırasıyla, 1,2 kN; 2,4 kN ve 3,6 kN BPK için 22,84 kN, 23,92 kN ve 25,015 kN olarak ölçülmüştür.



Şekil 10. Istampa kuvveti-sıcaklıkla ilişkisi (Punch force-temperature relation)



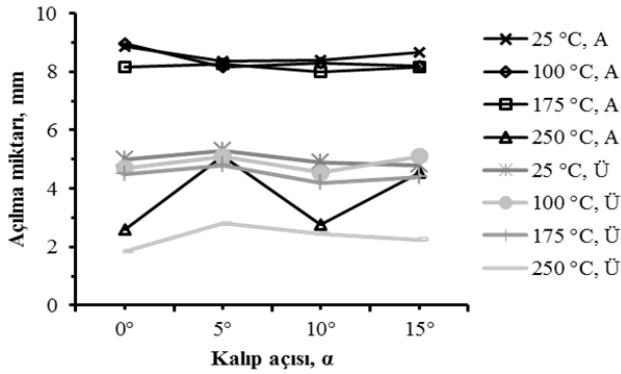
Şekil 11. Istampa kuvveti-BPK ilişkisi (Punch force-BHF relation)

3.3. Geri Yaylanma Ve Sertlik Dağılımı Sonuçları (Results for Springback and Hardness Distribution)

Split-ring testi bölünmüş halka testi olarak da bilinen basit bir karşılaştırma testidir. Bu işlem bir derin çekme kabından bilezik şeklinde numune alındıktan sonra radyal düzlemde bir kenarının kesilmesi işlemidir. Bölünme işleminden önceki ve sonraki çaplar arasındaki fark geri esneme miktarını ve dolaylı olarak da artık gerilme değerini verir. Geri yaylanma olayının asıl nedeni ayrılma düzlemine dik teğetsel gerilmelerdir [25,26]. Çekilen kaplar üzerindeki bu gerilmeler şekillendirilen parçaların ömrünü, tokluğunu, çatlak oluşum direncini, manyetik özelliklerini ve korozyon direncini etkiler. Yapılan deneyler sonucunda kaplarda oluşan ortalama açılma miktarı Tablo 4'de verilmiştir. Şekil 12'de ise sıcaklık ve kalıp açısının bilezikteki açılmaya olan etkisi görülmektedir. Yapılan ölçümler sonucunda kabın üst bölgesindeki yaylanma miktarı kabın alt bölgesindeki yaylanma miktarından daha küçük çıkmıştır. Kap üst bölgesindeki geri yaylanma miktarının düşük olmasının sebebi kap ağzındaki yığılma sonucu oluşan deformasyon sertleşmesinin geri yaylanmaya neden olan teğetsel gerilmeleri azaltmasıdır. Yine şekilden görüleceği üzere sıcaklığın geri yaylanmaya önemli etkisi vardır. Sıcaklık 250°C'ye çıktığında geri yaylanma miktarı da önemli derecede düşmüştür. Oda sıcaklığında 8,85 mm olan açılma miktarı 250°C'de 2,60 mm'ye düşmüştür.

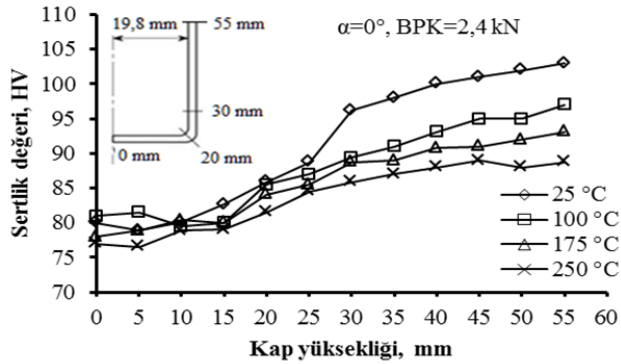
Tablo 4. Sıcaklık ve kalıp açısına bağlı olarak bilezikteki açılma miktarı (Experimental ring opening depending on the temperature and die angle)

	Bölge	Bilezikteki açılma miktarı, mm			
		$\alpha=0^\circ$	$\alpha=5^\circ$	$\alpha=10^\circ$	$\alpha=15^\circ$
25°C	Üst	5,00	5,30	4,90	4,80
	Alt	8,85	8,35	8,40	8,65
100°C	Üst	4,70	5,10	4,55	5,10
	Alt	8,95	8,15	8,30	8,20
175°C	Üst	4,50	4,80	4,20	4,40
	Alt	8,15	8,25	8,00	8,15
250°C	Üst	1,85	2,80	2,45	2,25
	Alt	2,60	5,15	2,75	4,55

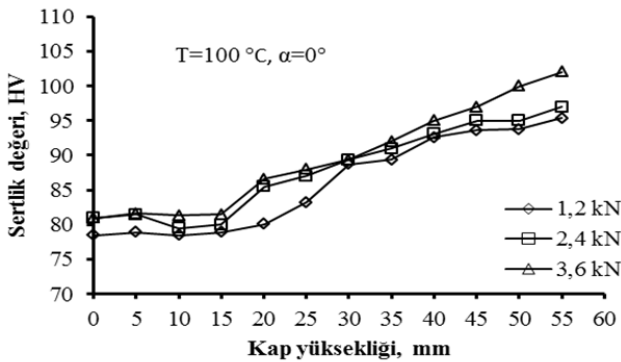


Şekil 12. Sıcaklığa bağlı olarak üst(Ü) ve alt(A) bilezikte oluşan açılma miktarları
(Upper and lower ring opening depending on the temperature)

Şekil 13'de kaplardan ölçülen sertlik değerleri sonuçları verilmiştir. Şekilden en düşük sertlik değerinin kap tabanında olduğu, kap ağzına doğru çıkıldıkça sertlik değerinin arttığı görülmektedir. En fazla plastik deformasyona uğrayan bölge kap ağzı olduğu için en yüksek gerilme değeri ve sertlik de burada oluşmaktadır. Yine şekilden sıcaklık arttıkça sertlik değerinin düştüğü görülmektedir. En yüksek sertlik değeri OS'da 103 HV, 100°C'de 97 HV, 175°C'de 93,1 HV ve 250°C'de 88,7 HV olarak ölçülmüştür. Şekil 14'de ise sertlik değerinin baskı plakası kuvveti ile değişimi görülmektedir. Şekilden baskı plakası kuvveti etkisinin sınırlı olduğu söylenebilir.



Şekil 13. Sıcaklığın sertlik dağılımına etkisi üzerindeki etkisi
(Effect of temperature on hardness distribution)



Şekil 14. BPK'nin sıcaklığa bağlı olarak sertlik dağılımı üzerindeki etkisi
(Effect of blank holder force on hardness distribution)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma, AA 5754 Al-Mg alaşımının derin çekme kalıplarında şekillendirilmesi esnasında kalıp geometrisi ve sıcaklığın et kalınlığı, ıstampa kuvveti ve geri yaylanma miktarına etkisinin belirlenmesi amacı ile yapılmıştır. Çalışma neticesinde çıkarılan genel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Sıcaklık arttıkça baskı plakası kuvvetindeki artışın et kalınlığı değişimine olan etkisi de azalmaktadır. Sıcaklık artışı dinamik deformasyon sertleşmesi ortadan kaldırdığından malzeme akışını kolaylaştırarak kalınlık dağılımının daha homojen hale gelmesini sağlamıştır. Kalınlık dağılımına kalıp yüzey açısının etkisi özellikle 25°C ve 100°C'de daha belirgin olarak görülmüştür. Şekillendirilen kaplardaki geri yaylanmayı etkileyen temel faktör sıcaklıktır. Sıcaklık arttıkça yaylanma miktarı da önemli ölçüde düşmüştür. En fazla deformasyon olayının gerçekleştiği kap üst kısmındaki geri esneme miktarı kap alt kısmındaki geri esneme miktarından daha düşüktür. Kalıplama kuvveti, sıcaklık 250°C'ye çıktığında oda sıcaklığına nazaran yaklaşık %22 oranında düşmüştür. Sonuçlar, kalıplama kuvvetini etkileyen en önemli faktörün şekillendirme sıcaklığı olduğunu, ikinci olarak baskı plakası kuvveti ve son olarak ise kalıp açısının olduğunu göstermiştir. Kap cidarı boyunca sertlik değeri kap ağzına doğru çıkıldıkça deformasyon sertleşmesinden dolayı artmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ethiraj N., Senthilkumar V.S., Experimental Investigation on Warm Deep Drawing of Stainless Steel AISI 304, Applied Mechanics and Materials, 26-28, 436-442, 2010.
2. Güneş A.T., Pres İşleri Tekniği, Makine Mühendisleri Odası, Ankara, 2, 2002.
3. Jayahari L., Sasidha, P.V., Reddy P.P., BaluNaik B., Gupta A.K., Singh S.K., Formability studies of ASS 304 and evaluation of friction for Al in deep drawing setup at elevated temperatures using LS-DYNA, Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 26, 21-31, 2014.
4. Kotkunde N., Deole A.D, Gupta A.K, Singh S.K., Adilya B., Failure and formability studies in warm deep drawing of Ti-6Al-4V alloy, Materials and Design, 60, 540-547, 2014.
5. Gedikli H., Cora Ö.N., Koç M., Comparative investigations on numerical modeling for warm hydroforming of AA5754-O aluminum sheet alloy, Materials and Design, 32, 2650-2662, 2011.
6. Laurent H., Grèze R., Oliveira M.C., Menezes L.F., Manach P.Y., Alves J.L., Numerical study of springback using the split-ring test for an AA5754 aluminum alloy, Finite Elements in Analysis and Design, 46, 751-759, 2010.
7. Wang H., Luo Y., Friedman P., Chen M., Gao L., Warm forming behavior of high strength aluminum alloy AA7075, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 22, 1-7, 2012.

8. Abedrabbo N., Pourboghrat F., Carsley J.E., Warm forming of aluminum alloys using a coupled thermo-mechanical anisotropic material model, CP778 Volume A, Numisheet 2005.
9. Van den Boogaard A., Thermally enhanced forming of aluminum sheet modeling and experiments, Ph.D. thesis, Twente University, Enschede, The Netherlands, 2002.
10. Öztürk F., Pekel H., Halkacı H.S., The effect of strain-rate sensitivity on formability of AA 5754-O at cold and warm temperatures, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20, 77–81, 2011.
11. Farhoud K., Khan A.S., Pandey A., Negative to positive strain rate sensitivity in 5xxx series aluminum alloys: experiment and constitutive modeling. *Int. J. Plast.*, 55 (0), 232–46, 2014.
12. Coër J., Bernard C., Laurent H., Andrade-Campos A., Thuillier, S., The effect of temperature on anisotropy properties of an aluminium alloy, *Experimental Mechanics*, 51 (7), 1185–1195, 2010.
13. Halim H., Wilkinson D.S., Niewczas M., The Portevin-Le Chatelier(PLC) effect and shear band formation in an AA5754 alloy, *Acta Mater.*, 55, 4151–4160, 2007.
14. Grèze R., Manach P.Y., Laurent H., Thuillie, S., Menezes L.F., Influence of the temperature on residual stresses and springback effect in an aluminium alloy, *International Journal of Mechanical Sciences*, 52, 1094-1100, 2010.
15. Bernard C., Coër J., Laurent H., Chauvelon P., Manach P.Y., Relationship between local strain jump and temperature bursts due to the Portevin–Le Chatelier effect in an Al–Mg alloy. *Exp. Mech.*, 53 (6), 1025–32, 2013.
16. Bolt P.J., Lamboo N.A.P.M., Rozier P.J.C.M., Feasibility of warm drawing of aluminum products, *J Mater Proc Technol* 115 (1), 118–21, 2001.
17. Laurent H., Coër J., Grèze R., Manach P.Y., Andrade-Campos A., Oliveira M.C., Menezes L.F., Mechanical behaviour and springback study of an aluminium alloy in warm forming conditions, *International Scholarly Research Network ISRN Mechanical Engineering*, ID:381615, 2011.
18. Oliveira M.C., Alves J.L., Chaparro B.M., Menezes L.F., Study on the influence of work-hardening modeling in springback prediction, *International Journal of Plasticity*, 23 (3), 516–543, 2007.
19. Seçgin O., Savaş V., An experimental investigation of forming load and side-wall thickness obtained by a new deep drawing die. *Int J Mater Form* 3, 209–213, 2010.
20. Shoichiro Y., Hisashi N., Hirokuni Y., Ken-ichi M., Formability enhancement in magnesium alloy stamping using a local heating and cooling technique: circular cup deep drawing process, *Journal of Materials Processing Technology* 142, 609–613, 2003.
21. Çavuşoğlu O., Gürün H., Investigation of the effects of deformation speed on the mechanical properties and deep drawing process of DP600 and DP780 sheet metal, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29, (4), 777-784, 2014.
22. Zein H., El Sherbiny M., Abd Rabou M., El shazly M., Thinning and spring back prediction of sheet metal in the deep drawing process, *Materials and Design*, 53, 797–808, 2014.
23. Özek C., Ünal E., The effect of die/blank holder angles on limit drawing ratio and wall thickness in deep drawing of square cups, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27, (3), 615-622, 2012.
24. Meriç C., Atik E., Özkaya E., Deformasyon sıcaklığının ve deformasyon hızının Al 99.0'un mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3 (1), 293-298, 1997.
25. Demeri M.Y., Lou M., Saran M.J., A benchmark test for springback simulation in sheet metal forming, *Society of Automotive Engineers, Inc.*, 01, 2657, 2000.
26. Grèze R., Experimental and numerical study of springback of aluminium alloys after drawing, PhD thesis, University Of Bretagne-sud, 2009.

