


Investigation of Al 5754 Alloy in Warm Processing Conditions in Terms of Deep Drawability and Sheet Thickness Variation by Finite Element Method

Mehmet Emin ÇETİN^{1*} 

¹Necmettin Erbakan University, Faculty of Aviation and Space Sciences, Department of Astronautical Engineering, Konya, Turkey

Article Info

Research article
Received: 06/07/2023
Revision: 02/08/2023
Accepted: 21/08/2023

Keywords

Warm Deep Drawing
AA5754-O
Temperature

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/07/2023
Düzeltilme: 02/08/2023
Kabul: 21/08/2023

Anahtar Kelimeler

Ilık Derin Çekme
Al 5754-O
Sıcaklık

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the effects of temperature, blank holder pressure, and punch speed on the deep drawability of Al 5754-O alloy were investigated numerically using the finite element method (FEM). / Bu çalışmada; sıcaklık, baskı plakası basıncı ve zımba hızının Al 5754-O alaşımının derin çekilebilirliği üzerindeki etkileri sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılarak sayısal olarak araştırılmıştır.

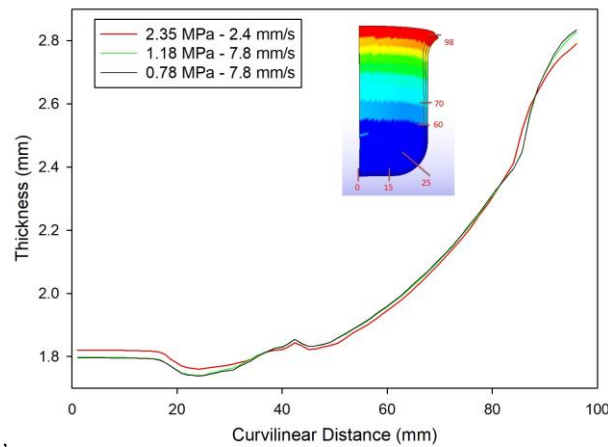


Figure A: Thickness variation graph for 300°C temperature / Şekil A.: 300°C sıcaklık için kalınlık değişimi grafiği

Highlights (Önemli noktalar)

- Warm forming of AA5754 alloy / Al 5754 alaşımının ılık şekillendirilmesi.
- Deep drawability and sheet thickness variations / Derin çekilebilirlik ve sac kalınlığı değişimi
- The effect of temperature, blank holder pressure and punch speed / Sıcaklık, baskı plakası basıncı ve zımba hızının etkisi

Aim (Amaç): To investigate the effect of temperature, blank holder pressure, and punch speed on the warm deep drawability of AA 5754 alloy. / Sıcaklık, baskı plakası basıncı ve zımba hızının Al 5754 alaşımının ılık derin çekilebilirliğine etkisini incelemek.

Originality (Özgünlük): Warm deep drawing analyses of AA 5754 alloy were performed numerically at 2 different punch speeds, 4 blank holder pressures, and 4 different temperatures. / Al 5754 alaşımının ılık derin çekme analizleri 2 farklı zımba hızında, 4 farklı baskı plakası basıncında ve 4 farklı sıcaklıkta sayısal olarak gerçekleştirilmiştir.

Results (Bulgular): When all parameters are considered, it is determined that the most critical parameter affecting the sheet thickness variation is the punch speed. When analyses are examined which are conducted at 300 °C, it is concluded that the sheet thickness will decrease as the punch speed increases. / Tüm parametreler dikkate alındığında sac kalınlığı değişimini etkileyen en kritik parametrenin zımba hızı olduğu tespit edilmiştir. 300°C'de yapılan analizler incelendiğinde zımba hızı arttıkça sac kalınlığının azalacağı sonucuna varılmıştır.

Conclusion (Sonuç): Considering 300 °C temperature, 0.78 MPa blank holder pressure, and 7.8 mm/s punch speed parameters, the maximum cup height was obtained as 74.31 mm. / 300 °C sıcaklık, 0,78 MPa baskı plakası basıncı ve 7,8 mm/s zımba hızı parametreleri göz önüne alınarak yapılan analizde maksimum kap yüksekliği 74,31 mm olarak elde edilmiştir.



Al 5754 Alaşımının Ilık İşlem Koşullarında Derin Çekilebilirliği ve Sac Kalınlık Değişimi Açısından Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi

Mehmet Emin ÇETİN^{1*}

¹Necmettin Erbakan University, Faculty of Aviation and Space Sciences, Department of Astronautical Engineering, Konya, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/07/2023
Düzeltilme: 02/08/2023
Kabul: 21/08/2023

Anahtar Kelimeler

Ilık Derin Çekme
Al 5754-O
Sac kalınlık

Öz

Alüminyum alaşımlarının şekillendirilebilirliği için ılık işlem koşulları büyük önem arz etmektedir. Yeniden kristalleşme altı sıcaklıklarda mikro yapıda değişim olmadan şekillendirilebilirlik artırılabilir. Bu çalışmada, Al 5754-O alaşımının ılık sıcaklıklarda şekillendirilmesine etki eden sıcaklık, işlem parametresi olarak kullanılarak derin çekme işlemi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. AA5754-O alaşımının derin çekilebilirliği; 25°C'de tutulan zımba ile, 225 °C, 250 °C, 275°C ve 300°C'de kadar ısıtılmış kalıp koşullarında, 0,78 MPa, 1,18 MPa, 1,57 MPa ve 2,35 MPa baskı plakası basınçlarında ve 2,4 mm/s ve 7,8 mm/s zımba hızlarında analizler yapılarak sıcaklığın, baskı plakası basıncının ve zımba hızının ılık derin çekilebilirliğe etkisi sac kalınlığı değişimi parametresi yoluyla araştırılmıştır. Analizlerde sıcaklık dağılımı, şekillendirme hızı ve baskı plakası basıncı parametrelerinin sac inceliği üzerine etkisi analiz edilmiştir. Yapılan analizler değerlendirilirken kusursuz derin kap çekilebilirliğini sağlayan parametreler incelenmiş ve şekillendirme hızı ve baskı plakası basıncı parametrelerinin şekillendirilebilirliğe etkileri analiz edilmiştir. 300 °C sıcaklık, 0,78 MPa baskı plakası basıncı ve 7,8 mm/s zımba hızı koşulu için en büyük kap yüksekliği 74,31 mm olarak elde edilmiştir.

Investigation of Al 5754 Alloy in Warm Processing Conditions in Terms of Deep Drawability and Sheet Thickness Variation by Finite Element Method

Article Info

Research article
Received: 06/07/2023
Revision: 02/08/2023
Accepted: 21/08/2023

Keywords

Warm Deep Drawing
AA5754-O
Temperature

Abstract

Warm forming conditions are of great importance for the formability of aluminum alloys. At sub-recrystallization temperatures, formability can be increased without changing the microstructure. In this study, the temperature affecting the shaping of the Al 5754-O alloy at warm temperatures was used as a process parameter and the macro deep drawing process was numerically investigated using the finite element method. The deep drawability of the AA5754-O alloy was investigated using the sheet thickness variation parameter, with punch held at 25°C, and die conditions heated up to 225 °C, 250 °C, 275°C and 300 °C. In addition, analyzes were made at 0.78 MPa, 1.18 MPa, 1.57 MPa, and 2.35 MPa pressure blank holder pressures and at punch speeds of 2.4 mm/s and 7.8 mm/s. In the analyses, the effects of temperature distribution, punch velocity, and blank holder pressure parameters on cup thinning were analyzed. While evaluating the analyzes, the parameters that ensure the perfect deep cup drawability were examined and the effects of punch velocity and blank holder pressure parameters on the formability were analyzed. The largest cup height was obtained as 74.31 mm for the condition of 300 °C temperature, 0.78 MPa blank holder pressure, and 7.8 mm/s punch speed.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bir plastik şekil verme yöntemi olan derin çekme işleminde zımba mekanik hareket yaparak sac malzemeleri şekillendirir. Derin çekme imal usulünde kalıp yardımıyla düzlemsel geometri iki boyutlu saclardan belirli şekle ve derinliğe sahip üç boyutlu ürünler elde edilir [1]. Derin çekme işlemi tek kademede gerçekleştirilebileceği gibi birden

fazla kademede de gerçekleştirilebilir [2]. Endüstri uygulamalarında karmaşık veya basit şekle sahip birçok ürün kolaylıkla üretilebildiğinden derin çekme yöntemi önem arz etmektedir [3]. Dayanıklı ve hafif malzemelerin kullanımı otomotiv, havacılık ve uzay, denizcilik ve demiryolu sanayilerinde giderek artmaktadır [4]. Alüminyum alaşımları düşük yoğunlukları ve yüksek mukavemetleri ile bu malzemelerden bir tanesidir [5], [6]. Jang vd. [7]

yaklaşık 8 µm tane boyutlarına sahip ticari 5182 ve 7075 alüminyum alaşımlı levhaların çekme deformasyon davranışını 423-723 K sıcaklık aralığında karşılaştırmışlardır. Eş eksenli tanelere sahip 5182 alüminyum alaşımı için ince uzun taneli 7075 alüminyum alaşımından daha büyük deformasyon hızı duyarlılık üssü değerleri elde edilmiştir. Xiao vd. [8] Al 7075 alaşımının yüksek sıcaklıklarda derin çekme simülasyonlarını gerçekleştirmiş ve deneysel olarak analizlerin doğrulamasını yapmışlardır. Sıcak şekillendirme işleminde proses parametrelerinin şekillendirilebilirliğe etkisini incelemişler ve sıcak şekillendirme işleminin, soğuk şekillendirmeye kıyasla Al 7075'in şekillendirilebilirliğini önemli ölçüde artırabildiğini bulmuşlardır. Halkaci vd. [9] Al 5754 alaşımının derin çekme oranını sıvı basıncı ve baskı plakası kuvvetini değiştirerek hidro mekanik derin çekme yöntemiyle artırmaya çalışmışlardır. Klasik derin çekme yönteminde 2 olarak belirledikleri sınır çekme oranını hidro mekanik derin çekme yöntemiyle 2,27'ye yükseltmişlerdir.

Al-Mg alaşımlarından biri olan Al 5754 alaşımı sahip olduğu yüksek mukavemet, yüksek süneklik, düşük yoğunluk ve iyi kaynak edilebilirlik özelliklerinden dolayı otomotiv endüstrisi başta olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [10], [11]. Al 5754 alaşımının oda sıcaklığındaki şekillendirilebilirliği çelik saclara göre düşüktür. Fakat Al 5754 alaşımının yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki bir değerde şekillendirebilirliği artmaktadır [12]. 25 °C sıcaklık koşulunda 5754 serisi alaşımların makro şekillendirilebilirlikleri deformasyon hızına duyarlı değilken 100 °C'nin üzerinde akma gerilmesinin görece düşmeye başlar ve deformasyon hızı duyarlılık üssü artar. Sıcaklığına artışı ile birlikte akma gerilmesindeki azalma 175 °C'nin üzerinde belirginleşir [13]. Metallerin ılık şekillendirilmelerinde işlem sıcaklığı değeri, şekil verilecek malzemenin erime sıcaklığının 0,3-0,5 katı arasındadır [14]. Bu sıcaklık değeri aralığında şekillendirilebilirlik malzemenin kayma bantlarını aktif hale getirilerek artırılabilir [15]. Ek olarak bu aralığın maksimum sınırı yeniden kristalleşme sıcaklığı altında kaldığı için malzemede içyapı değişikliği oluşmadan şekillendirme yapılabilmektedir [2]. Laurent ve ark. [16] AA5754-O alüminyum alaşımının silindirik kalıpta derin çekilmesini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Yeniden kristalleşme sıcaklığının Al alaşımı için 350 °C ve altı sıcaklıklar olduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir. Çalışmalarında kalıp sıcaklıkları için 250 °C ve üstü sıcaklıklarda deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada da

analiz sıcaklıkları 225 °C, 250 °C, 275°C ve 300°C olarak belirlenmiştir. Bolt vd. çalışmalarında Al 5754 alaşımının derin çekilebilirliğini incelemiş ve sıcaklığın sağladığı pozitif etki ile derin çekme oranını %29,1 arttığını belirtmişlerdir [17]. Kaya vd. [18] AA 5754-O alaşımının ılık derin çekilebilirliğini derin çekme oranı, sac kalınlığı değişimi ve yağlayıcı etkisi yönünden araştırmışlardır. Yaptıkları deneylerde AA5754-O malzemesi için 2,9 derin çekme oranına 300 °C sıcaklıkta ve 2,5 mm/s zımba hızında ulaşmışlardır. Derin çekme işlemi sırasında kap duvarlarındaki deformasyon kaynaklı gerilmeler sıcaklık artışı ile azalmaktadır [19]. Görüldüğü gibi literatürde birçok çalışmada Al-Mg alaşımlarının şekillendirilebilirliği sıcaklık ile artırılabilir. Derin çekme işleminde baskı plakası basıncı ve zımba hızı şekillendirilebilirliği etkileyen diğer faktörlerdendir [20]–[22].

Bu çalışmada; sıcaklık, baskı plakası basıncı ve zımba hızının Al 5754-O alaşımının derin çekilebilirliği üzerindeki etkileri sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılarak sayısal olarak araştırılmıştır. Literatürden farklı olarak, zımba hızları 2,4 mm/s ve 7,8 mm/s olarak belirlenmiş, baskı plakası basınçları 0,78 MPa, 1,18 MPa, 1,57 MPa ve 2,35 MPa olarak verilmiş ve sayısal analizler 225 °C, 250 °C, 275 °C ve 300 °C sıcaklıklarda yapılmıştır. Seçilen bu işlem parametrelerinin derin çekilen kaplardaki sac kalınlığı değişimi üzerindeki etkileri sayısal olarak araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Çalışmada sac malzemede ılık mekanik derin çekme sonucunda oluşan kalınlık değişiminin belirlenmesi için 4 ayrı model sonlu elemanlar analizine tabi tutulmuştur. Sonlu elemanlar analizi için LS-DYNA programı kullanılmıştır. Solidworks CAD programında derin çekme kalıp bileşenleri çizilmiştir. Kalıp bileşenleri Hyper-mesh programına aktarılmış ve sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Sac malzemesi olarak Al 5754 alaşımı kullanılmıştır. SEM'in oluşturulmasında derin çekilecek malzemenin fiziksel davranışının malzeme modelini belirlemesi kritik öneme sahiptir. Johnson-Cook malzeme modeli metallerin yüksek şekil değiştirme hızları için uygun bir modeldir bu nedenle malzeme modeli olarak seçilmiştir. ılık derin çekme SEM'nin oluşturulmasında MAT-15 (izotropik, elastik-plastik) Johnson-Cook malzeme modeli kullanılmıştır. Al 5754 alaşımının temel mekanik

özellikleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Johnson-Cook malzeme modeli parametreleri literatürde Al 5754 alaşımı için yapılmış çalışmalardan [3], [23] alınmış ve Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Al 5754 alaşımının mekanik özellikleri (Mechanical properties of AA5754 alloy)

Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Kayma Modülü (GPa)	Poisson oranı
2700	70	26.9	0,33

Tablo 2. Johnson-Cook malzeme modeli katsayıları [3], [23] (Constants of Johnson-Cook material model)

A [MPa]	B [MPa]	C	n	m	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
103,773	296,552	-0,003101	0,4368	1,24513	-0,2	1,133	-0,229	0,0897	7,979

Ilık derin çekme işleminin sonlu elemanlar modelinin (SEM) oluşturulması için gerekli geometrik şekiller zımba, sac, baskı plakası ve kalıptan oluşmaktadır. Tablo 3’te sayısal analizlerde kullanılan kalıp, sac, baskı plakası ve işlem sıcaklıklarına ait parametreler verilmiştir.

SEM’deki tüm parçalar Solidworks (Dassault, Fransa) programında yüzey olarak modellenmiştir. Daha sonra Hypermesh (Altair Engineering, Troy Michigan, ABD) programı kullanılarak yüzeylerin sonlu eleman ağ yapıları oluşturulmuştur.

Tablo 3. İşlem parametreleri (Process parameters)

İşlem Parametreleri	Değerler
Baskı plakası basıncı	0,78 MPa, 1,18 MPa, 1,57 Mpa, 2,35 MPa
Sac çapı	150 mm
Zımba hızı	2,4 mm/s, 7,8 mm/s
Zımba çapı	65,21 mm
Zımba radyüsü	15 mm
Kalıp çapı	69,39 mm
Kalıp radyüsü	11,71 mm
Malzeme kalınlığı	2 mm
Ilık işlem sıcaklığı	225 °C, 250 °C, 275 °C, 300 °C,

SEM’de sac, kalıp, baskı plakası ve zımba kabuk (Shell) elemanlarla modellenmiştir. Sac malzeme için tam integrasyonlu dörtgen ve üçgen kabuk elemanlar (Element Type 16) kullanılmıştır. Derin çekme sayısal modelinde yer alan baskı plakası,

zımba ve kalıp için kalınlık boyunca 3 integrasyon noktasına sahip Belytschko-Tsay (Element Type 2) kabuk eleman kullanılmıştır. Bu çalışmada modellerde kullanılan bileşenlerin her birinin eleman sayıları Tablo 4’te gösterilmiştir.

Tablo 4. Modellemede kullanılan sonlu eleman sayıları (Finite element numbers used in modeling)

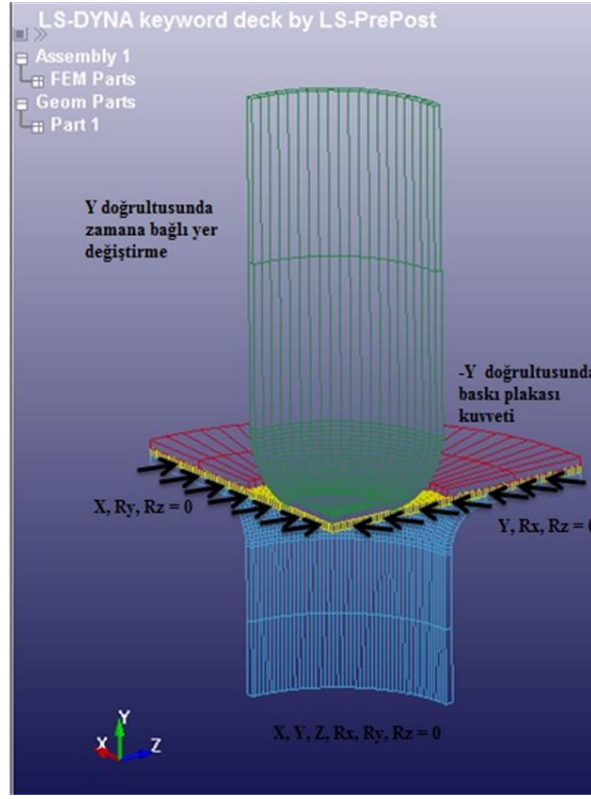
Parça Adı	Sac	Kalıp	Zımba	Baskı Plakası
Eleman Sayısı	5369	1200	460	50

LS-Dyna sonlu elaman analizi yazılımında çözüm yapmadan önce Ls-PrePost programı kullanılarak SEM modeli için gerekli malzeme parametreler, başlangıç ve sınır şartları tanımlanmıştır. Ilık derin çekme analizinde nümerik çözüm süresi göz önüne

alınarak aksel simetrik çeyrek model kullanılmıştır. Sacın y yönünde ötelenmesi, x ve z yönlerinde dönmesi sınırlandırılmıştır. Ek olarak sacın sınır şartları olarak y ve z yönlerinde dönmesi, x yönünde ötelenmesi sınırlandırılmıştır. Aynı

zamanda analizler gerçekleştirilirken baskı plakası, zımba ve kalıp rijit olarak modellenmiştir. Kalıbın ise bütün yönlerde serbestlik dereceleri sınırlandırılırken, zımba ve baskı plakasının y

ekseni doğrultusu dışındaki bütün serbestlik dereceleri sınırlandırılmıştır. Şekil 1’de analiz parametreleri ve sınır şartları verilmiştir.



Şekil 1. Ilık derin çekme analizinde kullanılan sınır şartları (Boundary conditions used in warm deep drawing analysis)

Sonlu eleman analizlerinde sac-zımba, sac-baskı plakası, sac-kalıp arasındaki temas bölgelerindeki sürtünme katsayıları sırasıyla 0,25, 0,05 ve 0,05 Coulomb sürtünme katsayıları tanımlanmıştır. Bütün temas yüzeyleri için LS-DYNA temas kartlarından “contact forming one way surface-to-surface” kartı kullanılmıştır. Ilık mekanik derin çekme işleminin sayısal modellenmesinde LS-DYNA programının 3 numaralı “diagonal scaled conjugate gradient iterative” algoritması ısı çözümü olarak kullanılmıştır. Ilık derin çekme işleminde model bileşenleri arasındaki ısı transferini modellemek için her bir malzemeye ve temas

algoritmasına atanan özellikler ayrı ayrı Tablo 5, 6, 7 ve 8’de verilmiştir. Zımbaya 25 °C sabit sıcaklık verilmiştir. Şekillendirme sıcaklığının derin çekilebilirliğe etkisini görmek için saca ve kalıba 225°C, 250 °C, 275 °C ve 300 °C sıcaklık değerleri atanmıştır. Zımba hızının derin çekilebilirliğe etkisini görmek için zımbaya 2,4 mm/s ve 7,8 mm/s hızları verilmiştir. Ek olarak baskı plakası basıncının ılık derin çekme işlemine etkisini gözlemlemek için baskı plakası basıncı 2 mm sac kalınlığı için (-Y) yönünde 0,78 MPa, 1,57 MPa, 2,35 MPa ve 1.18 MPa olarak uygulanmıştır.

Tablo 5. Kalıp (AISI 4140) için analizlerde kullanılan ısı özellikler (Thermal properties of die (AISI 4140) used in analysis)

Isı İletim Katsayısı (W/m ² K)	Özgül Isı (J/Kg ^o K)	Isıl Kapasite (J/ ^o K)
38.95	473	12440

Tablo 6. Baskı plakası (AISI 4140) için analizlerde kullanılan ısı özellikler (Thermal properties of blank holder (AISI 4140) used in analysis)

Isı İletim Katsayısı (W/m ² K)	Özgül Isı (J/Kg ^o K)	Isıl Kapasite (J/ ^o K)
38.95	473	2385

Tablo 7. Zimba (AISI 4140) için analizlerde kullanılan ısıl özellikler (Thermal properties of punch (AISI 4140) used in analysis)

Isı İletim Katsayısı (W/m ^{°K})	Özgül Isı (J/Kg ^{°K})	Isıl Kapasite (J/°K)
38.95	473	1183

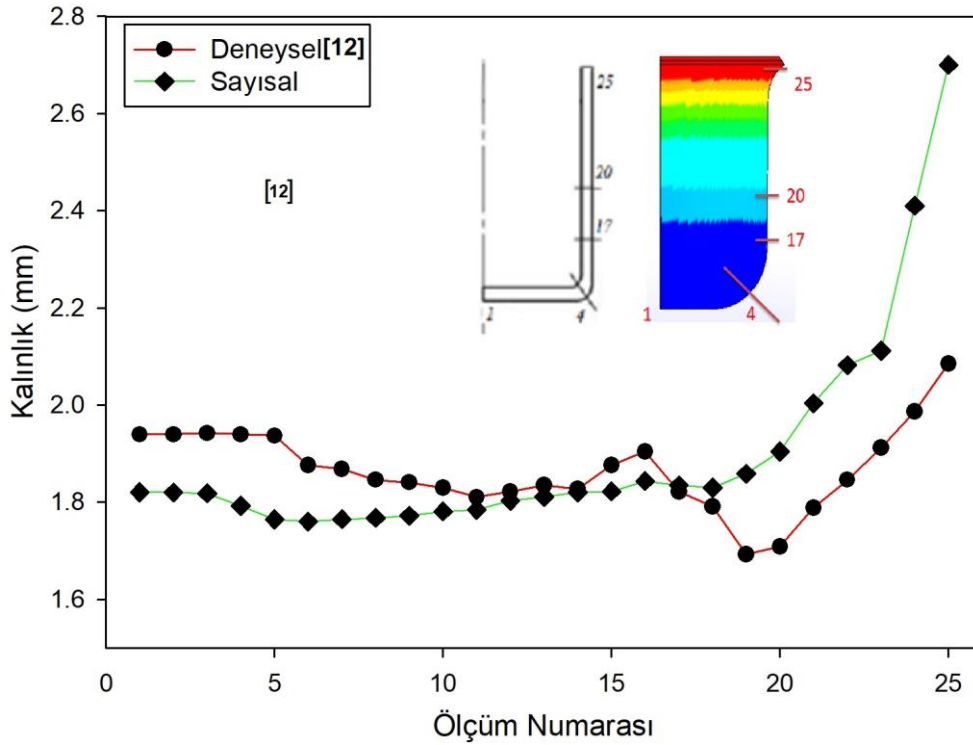
Tablo 8. Sac (Al 5754) için analizlerde kullanılan ısıl özellikler (Thermal properties of sheet (Al 5754) used in analysis)

Isı İletim Katsayısı (W/m ^{°K})	Özgül Isı (J/Kg ^{°K})	Isıl Genleşme Katsayısı (1/°K)	Ergime Sıcaklığı (°K)
220	904	2.4x10 ⁻⁵	933

3. BULGULAR (RESULTS)

Sonlu elemanlar yöntemi sayısal bir çözüm olduğundan SEM'nin deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanması analizden elde edilen sonuçlar açısından önemlidir. SEM'nin doğrulanması 2,3 derin çekme oranında, 2,4 mm/s zimba hızında ve 2,35 MPa baskı plakası basıncında ve 300 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiş derin çekme

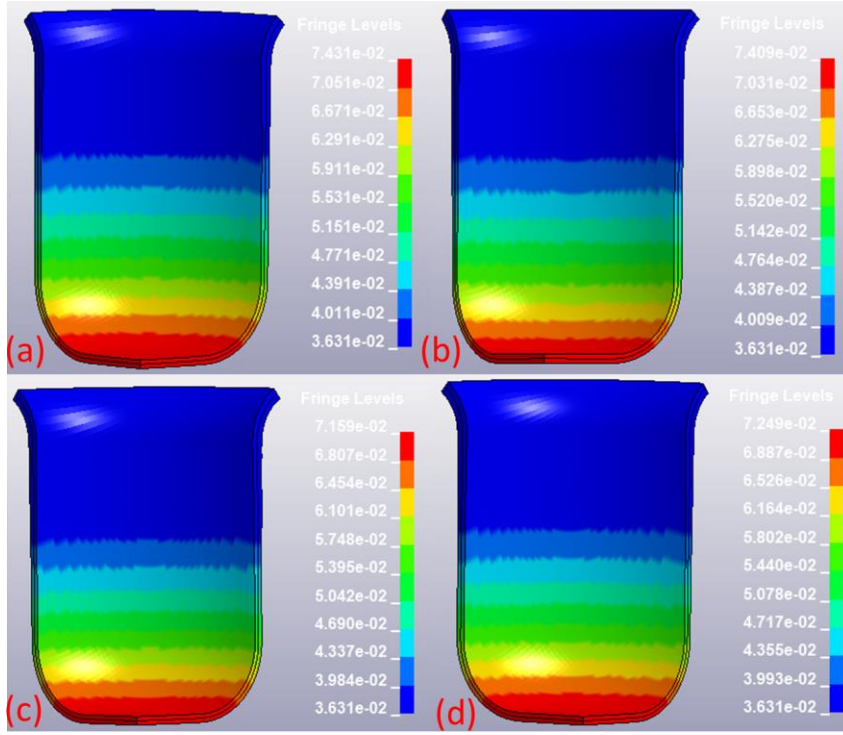
deneylerinden [12] elde edilen sac kalınlık verileri ile sayısal analizden elde edilen kalınlık verilerinin karşılaştırılması ile yapılmıştır. Şekil 2'den görülebileceği üzere sayısal ve deneysel sonuçlar büyük ölçüde uyum göstermiştir. Bu durum SEM ile yapılan sayısal çözümün yakınsaklığını teyit etmektedir.



Şekil 2. Kalınlık değişimlerinin karşılaştırılması (Comparison of thickness variations)

Şekil 3'te 300 °C sıcaklıkta 0,78 MPa, 1,18 MPa, 1,57 MPa ve 2,35 MPa baskı plakası basınçlarında ve 2,4 mm/s ve 7,8 mm/s zimba hızlarında yapılan sayısal analizler sonucunda elde edilen ılık derin çekilen kap yükseklikleri gösterilmiştir. Şekil 3'te verilen maksimum ve minimum kap yüksekliği

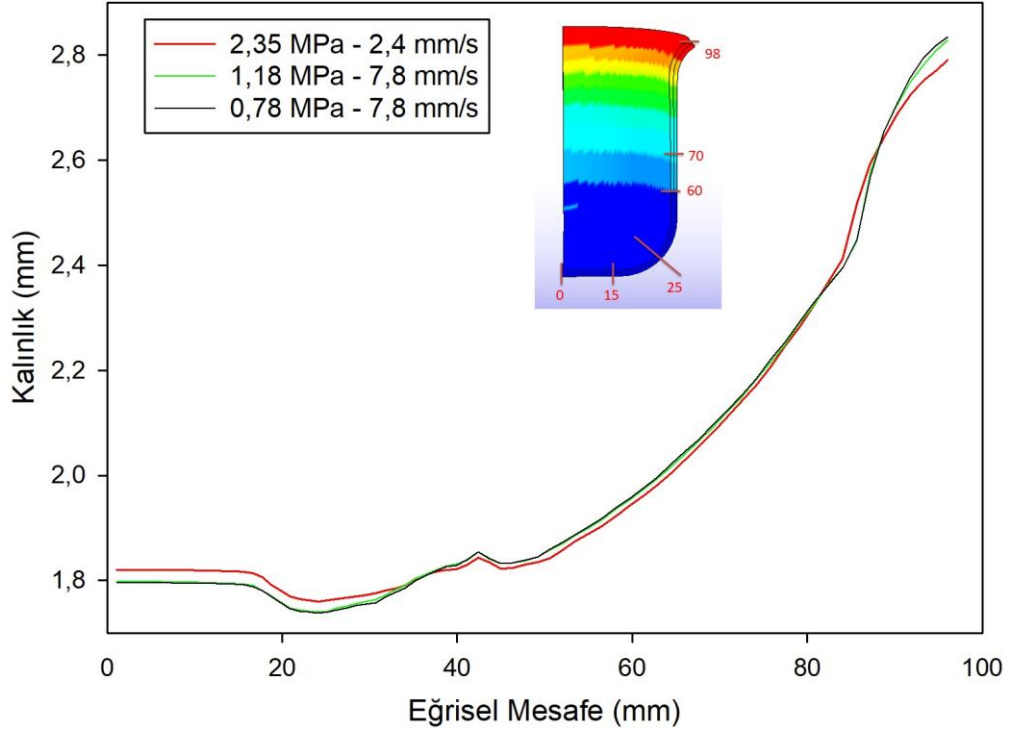
değerlerinin birimi LS-Dyna birim tercihi nedeniyle metre olarak gösterilmiştir. 4 farklı analiz sonucu incelendiğinde yırtılma ve marullanma olmadan elde edilen en büyük kap yüksekliği 0,78 MPa baskı plakası basıncı ve 7,8 mm/s zimba hızı koşulu için 74,31 mm olarak elde edilmiştir.



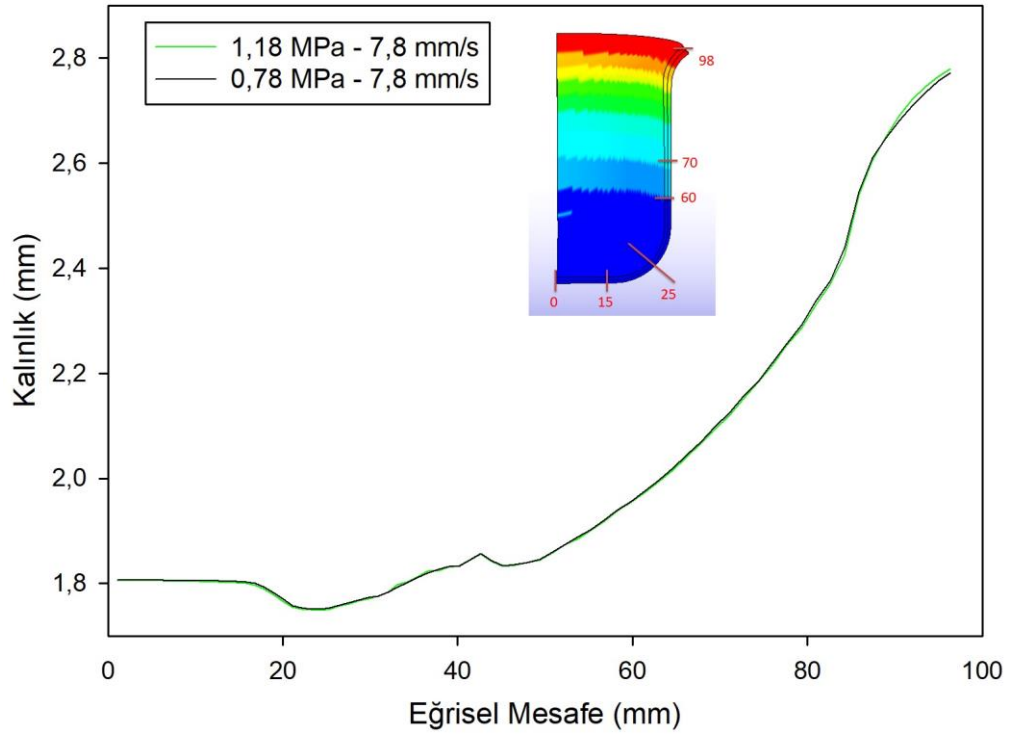
Şekil 3. 300 °C sıcaklık için kap yüksekliklerinin karşılaştırılması a) 0,78 MPa basınç ve 7,8 mm/s zımba hızı b) 1,18 MPa basınç ve 7,8 mm/s zımba hızı c) 1,57 MPa basınç ve 2,4 mm/s zımba hızı d) 2,35 MPa basınç ve 2,4 mm/s zımba hızı (Renk skalasındaki birim metre cinsindedir.) (Comparison of cup heights for 300 °C temperature a) 0.78 MPa pressure and 7.8 mm/s punch speed, b) 1.18 MPa pressure and 7.8 mm/s punch speed, c) 1.57 MPa pressure and 2.4 mm/s punch speed, d) 2.35 MPa pressure and 2.4 mm/s punch speed (Unit in fringe levels are meter.))

İlık derin çekme işleminde sac kalınlığı değişimine sıcaklık, baskı plakası basıncı ve zımba hızının etkisini görebilmek için 225 °C, 250 °C, 275 °C ve 300 °C sıcaklıklarda, 0.78, 1.18, 1.57 ve 2.35 MPa baskı plakası basınçlarında, 2,4 ve 7,8 mm/s zımba hızlarında SEA gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen sac cidar kalınlığı değerleri Şekil 4,5,6 ve 7’de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde sac kalınlığının zımba tabanından itibaren zımba radyüsüne yaklaştıkça azaldığı ve radyüs bounca incelenin devam ettiği, köşelerde ani incelemelerle birlikte köşelerden sonra boyun verme bölgesinin oluştuğu görülmüştür. Boyun verme bölgesini takiben derin çekilen sacın üst kısmına gidildikçe kalınlaşmaların arttığı anlaşılmıştır. Literatürde derin çekme işlemi sonrası saclarda zımba radyüsünde oluşan kalınlık azalma, çekilen kapların üst kısımlarında kalınlaşma ve boyunlaşma bölgeleri olduğu belirtilmiştir [24] ve elde edilen sac kalınlığı değişim literatür ile uyumludur. Demirci vd. [25] baskı plakası

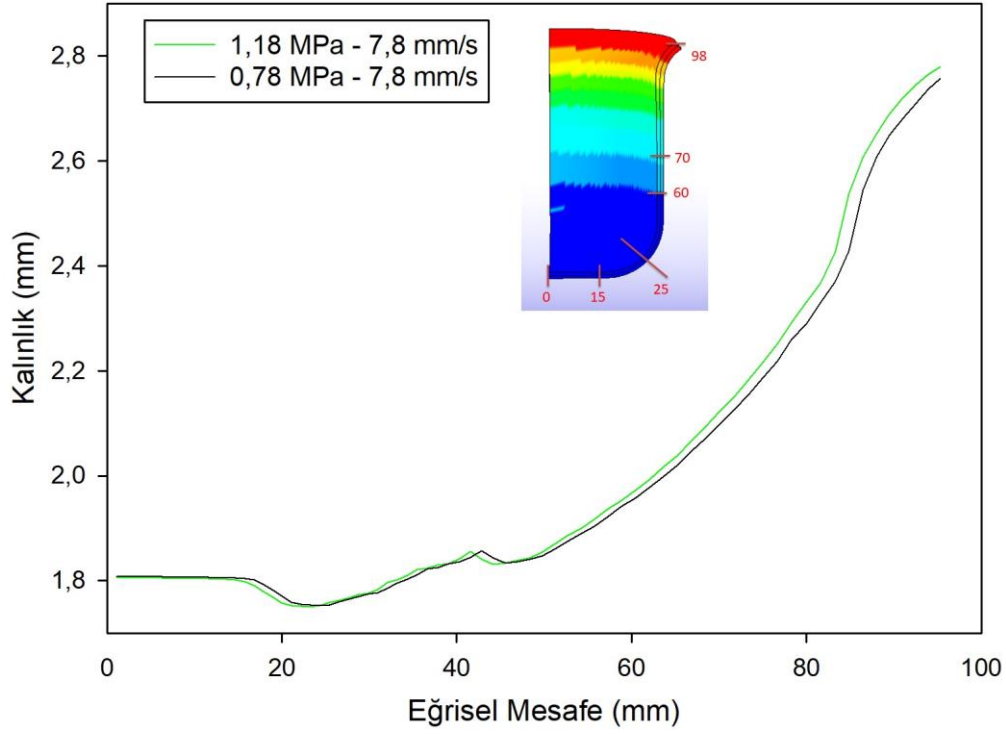
basıncının sac kalınlığına etkisini incelemiştir. Çalışmalarında değişen baskı plakası basınçlarının sac kalınlığı değişimi için anlamlı bir farklılığa yol açmadığını belirtmişlerdir. Zımba radyüsü bölgesi hariç diğer bölgelerde sac kalınlığı değişimi baskı plakası basıncı, zımba hızı ve sıcaklık değerlerinden yeteri kadar etkilenmemiştir. Bütün parametreler göz önüne alındığında sac kalınlığı değişimini etkileyen en önemli parametrenin zımba hızı olduğu belirlenmiştir. 300 °C yapılan analizler incelendiğinde zımba hızı arttıkça sac kalınlığının azalacağı sonucuna varılmıştır. Alüminyum alaşımları ılık şekillendirme sıcaklıklarında pozitif şekil değiştirme hassasiyetine sahiptir [26]. Zımba hızı arttıkça pozitif şekil değiştirme hassasiyetinin sebep olduğu boyunlaşma hatasının olma ihtimali artmaktadır. Sac kalınlığının düşmesi boyunlaşma kusuruna sebebiyet vermektedir. Buradan çıkan sonuçla sac kalınlığının değişimi üzerine en etkili parametre olarak zımba hızı belirlenmiştir.



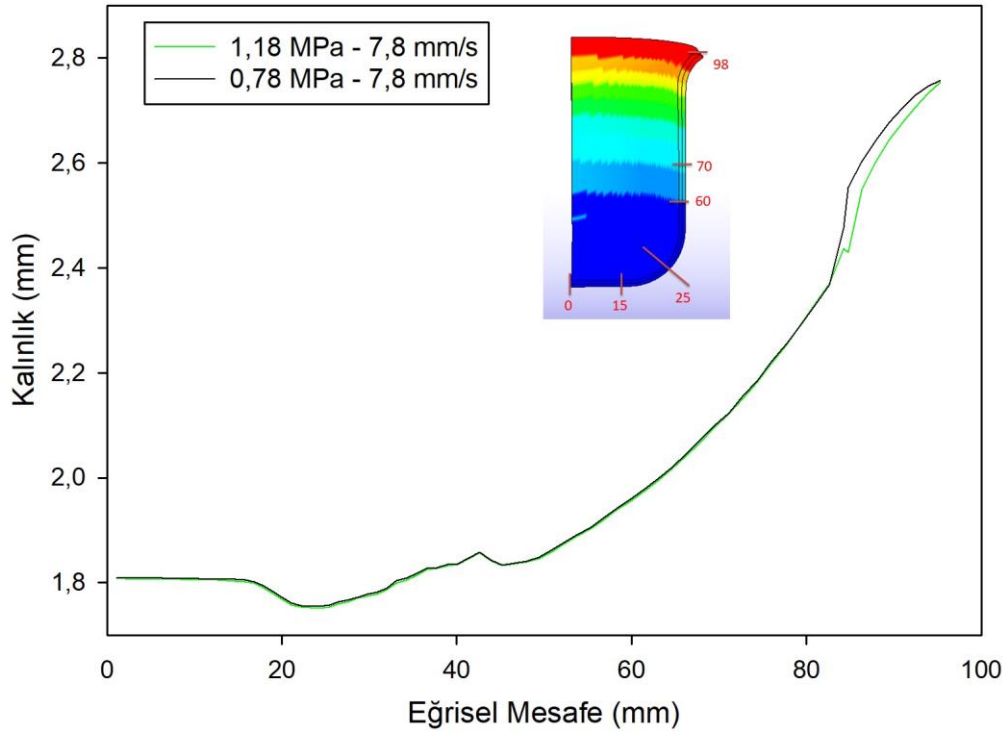
Şekil 4. 300°C sıcaklık için kalınlık değişimi grafiği (Thickness variation graph for 300°C temperature)



Şekil 5. 275°C sıcaklık için kalınlık değişimi grafiği (Thickness variation graph for 275°C temperature)



Şekil 6. 250°C sıcaklık için kalınlık değişimi grafiği (Thickness variation graph for 250°C temperature)



Şekil 7. 225°C sıcaklık için kalınlık değişimi grafiği (Thickness variation graph for 225°C temperature)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada Al 5754-O alaşımının derin çekilebilirliği 2,3 derin çekme oranında ılık şekillendirme sıcaklıklarında incelenmiştir. Ilık derin çekme işlemi için kapsamlı bir sayısal model hazırlanmıştır. SEM'ndeki temas algoritması, malzeme modeli ve kabuk elemanlar uyum

sağlamıştır. Giriş parametresi olarak sıcaklık, zımba hızı ve baskı plakası basıncı değerleri, çıkış parametresi olarak derin çekme kusurları ve cidar kalınlığı değişimi parametreleri incelenmiştir. Zımba sıcaklığı 25 °C olarak sabit alınmış, kalıp sıcaklığı ve sac sıcaklıkları analiz sıcaklığına göre 225 °C, 250 °C, 275 °C ve 300 °C olarak değiştirilmiştir. Baskı plakası basıncı analizlerde

0,78 MPa, 1,18 MPa, 1,57 MPa ve 2,35 MPa olarak değiştirilmiştir. 2,4 mm/s ve 7,8 mm/s zımba hızlarında analizler yapılarak zımba hızının ılık derin çekilebilirliğe etkisi araştırılmıştır. Bütün analizlerde saclar marullanma ve yırtılma kusuru olmadan başarıyla çekilmiştir. Maksimum şekillendirilebilirlik kalıp ve sac sıcaklığının 300 °C ve zımba sıcaklığının 25 °C olması halinde elde edilmiştir. Ek olarak 300 °C sıcaklıkta 74,31 mm değeri ile en yüksek kap yüksekliğinde derin çekme analizi yapılmıştır. Bu nedenle 300 °C sıcaklık en uygun ılık derin çekme sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Zımba hızının elde edilen kaptaki incelmeye etki eden en önemli parametre olduğu saptanmıştır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mehmet Emin ÇETİN: Analizleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He performed the analysis, analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] G. Palumbo and L. Tricarico, "Numerical and experimental investigations on the Warm Deep Drawing process of circular aluminum alloy specimens," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 184, no. 1–3, pp. 115–123, 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.024.
- [2] M. H. Cetin, A. Ugur, O. Yigit, H. Gokkaya, and E. Arcaklioglu, "Development of Forming Temperature Curves for Warm Deep Drawing Process Under Non-isothermal Conditions," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 40, no. 9, pp. 2763–2784, 2015, doi: 10.1007/s13369-015-1756-0.
- [3] D. Acar, M. Turkoz, H. Gedikli, H. S. Halkaci, and O. N. Cora, "Warm Hydromechanical Deep Drawing of AA 5754-O and Optimization of Process Parameters," *J. Eng. Mater. Technol. Trans. ASME*, vol. 140, no. 1, 2018, doi: 10.1115/1.4037524.
- [4] H. Gedikli, Ö. N. Cora, and M. Koç, "Comparative investigations on numerical modeling for warm hydroforming of AA5754-O aluminum sheet alloy," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 5, pp. 2650–2662, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2011.01.025.
- [5] E. Öztürk, M. Türköz, H. S. Halkacı, and M. Koç, "Determination of optimal loading profiles in hydromechanical deep drawing process using integrated adaptive finite element analysis and fuzzy control approach," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 88, no. 9–12, pp. 2443–2459, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8912-x.
- [6] G. Altuntaş and B. Bostan, "Metallurgical characterization of natural aging effects on pre-deformed Al 7075/T651 alloy during retrogression and re-aging heat treatment," *Kov. Mater.*, vol. 60, no. 4, pp. 209–222, 2022, doi: 10.31577/km.2022.4.209.
- [7] D. H. Jang and W. J. Kim, "Warm Temperature Deformation Behavior and Processing Maps of 5182 and 7075 Aluminum Alloy Sheets with Fine Grains," *Met. Mater. Int.*, vol. 24, no. 3, pp. 455–463, 2018, doi: 10.1007/s12540-018-0061-3.
- [8] W. C. Xiao, B. Y. Wang, Y. Kang, W. P. Ma, and X. F. Tang, "Deep drawing of aluminum alloy 7075 using hot stamping," *Rare Met.*, vol. 36, no. 6, pp. 485–493, 2017, doi: 10.1007/s12598-017-0919-4.
- [9] M. Halkaci, M. Türköz, M. Dilmeç, S. Halkaci, and B. Dağhan, "Increasing the limiting drawing ratio of AA 5754 aluminum sheet by hydromechanical deep drawing process," *Proc. 10th Int. Conf. Technol. Plast. ICTP 2011*, no. November 2017, pp. 472–476, 2011.
- [10] H. Laurent, R. Greze, M. C. Oliveira, L. F. Menezes, P. Y. Manach, and J. L. Alves, "Numerical study of springback using the split-ring test for an AA5754 aluminum alloy," *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 46, no. 9, pp. 751–759, 2010, doi: 10.1016/j.finel.2010.04.004.

- [11] M. Ciemiorek, A. Ambroziak, K. Majchrowicz, M. Lewandowska, and J. Goliński, "Ductility and formability of ultrafine-grained 5754 aluminium alloy under various strain rates and temperatures," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 848, no. May, pp. 0–7, 2022, doi: 10.1016/j.msea.2022.143375.
- [12] M. H. Çetin, "İlık Derin Çekme Prosesi İçin Şekillendirme Sıcaklıklarının Belirlenmesi Ve Karakterizasyonu," *Karabük Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü, Doktora Tezi*, 2015.
- [13] A. H. van den Boogaard and J. Huétink, "Simulation of aluminium sheet forming at elevated temperatures," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 195, no. 48–49, pp. 6691–6709, 2006, doi: 10.1016/j.cma.2005.05.054.
- [14] H. S. Kim, M. Koç, and J. Ni, "Determination of proper temperature distribution for warm forming of aluminum sheet materials," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 128, no. 3, pp. 622–633, 2006, doi: 10.1115/1.2162913.
- [15] D. Ghaffari Tari, M. J. Worswick, and S. Winkler, "Experimental studies of deep drawing of AZ31B magnesium alloy sheet under various thermal conditions," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 8, pp. 1337–1347, 2013, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.01.028.
- [16] H. Laurent, J. Coër, P. Y. Manach, M. C. Oliveira, and L. F. Menezes, "Experimental and numerical studies on the warm deep drawing of an Al-Mg alloy," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 93, pp. 59–72, 2015, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2015.01.009.
- [17] P. J. Bolt, N. A. P. M. Lamboo, and P. J. C. M. Rozier, "Feasibility of warm drawing of aluminium products," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 115, no. 1, pp. 118–121, 2001, doi: 10.1016/S0924-0136(01)00743-9.
- [18] S. Kaya, G. Spampinato, and T. Altan, "An Experimental Study on Nonisothermal Deep Drawing Process Using Aluminum and Magnesium Alloys," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 130, no. 6, Dec. 2008, doi: 10.1115/1.2975228.
- [19] A. Vasco *et al.*, "Analysis of the influence of process parameters in the deep drawing of a cylindrical cup Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering in Production Systems Speciality," 2012.
- [20] Q. F. Chang, D. Y. Li, Y. H. Peng, and X. Q. Zeng, "Experimental and numerical study of warm deep drawing of AZ31 magnesium alloy sheet," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 47, no. 3–4, pp. 436–443, 2007, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2006.06.013.
- [21] O. Çavuşoğlu and H. Gürün, "Deformasyon hizinin DP600 ve DP780 sac malzemelerin mekanik özelliklerine ve derin çekme işlemine etkilerinin incelenmesi," *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, vol. 29, no. 4, pp. 777–784, 2014, doi: 10.17341/gummdf.76140.
- [22] E. ESENER, E. SÖNMEZ, and M. FIRAT, "Metal Şekillendirme Proseslerinde Sac Açınım Geometrisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Geliştirilmesi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 6, no. 1, pp. 79–89, 2018, doi: 10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.319383.
- [23] M. Rodriguez-Millan, D. Garcia-Gonzalez, A. Rusinek, and A. Arias, "Influence of stress state on the mechanical impact and deformation behaviors of aluminum alloys," *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 7, 2018, doi: 10.3390/met8070520.
- [24] M. Colgan and J. Monaghan, "Deep drawing process: Analysis and experiment," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 132, no. 1–3, pp. 35–41, 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00253-4.
- [25] H. Ibrahim Demirci, M. Yaşar, K. Demiray, and M. Karali, "The theoretical and experimental investigation of blank holder forces plate effect in deep drawing process of AL 1050 material," *Mater. Des.*, vol. 29, no. 2, pp. 526–532, 2008, doi: 10.1016/j.matdes.2007.01.008.
- [26] D. Li and A. Ghosh, "Tensile deformation behavior of aluminum alloys at warm forming temperatures," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 352, no. 1–2, pp. 279–286, 2003, doi: 10.1016/S0921-5093(02)00915-2.