

Ilık Hidromekanik Derin Çekme Prosesinde Optimum Şekillendirme Parametrelerinin Belirlenmesi

Doğan ACAR^{1*}, Mevlüt TÜRKÖZ², Murat DİLMEÇ³, Hüseyin Selçuk HALKACI², Hasan GEDİKLİ¹, Ömer Necati CORA¹

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

² Selçuk Üniversitesi, Konya

³ Necmettin Erbakan Üniversitesi

Özet

Bu çalışmada otomotiv sanayiinde taşıt ağırlığını azaltmak için giderek artan şekilde kullanılan alüminyum alaşımlarının şekillendirilmesinde kullanılan geleneksel yöntemlerin yerini almaya başlayan ılık hidromekanik derin çekme prosesinin kapsamlı bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Farklı eleman sayıları ve eleman formülasyonları, temasta bulunan bileşenler için farklı sürtünme katsayıları ve malzeme modelleri sistematik bir şekilde denenerek sonlu eleman modeli için en uygun tercihler ve değerler belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında ise, oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile ılık hidromekanik derin çekme işlemindeki takım sıcaklıklarının ve yükleme profillerinin (hidrolik basıncı ve baskı plakası kuvveti) en iyi şekillendirilebilirliği veren değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde, malzeme davranışını en iyi elastik-viskoplastik-termal malzeme modelinin yansıttığı belirlenmiştir. Coulomb sürtünme katsayıları sac-kalıp ara yüzeyi için 0.05, sac-baskı plakası için 0.05 ve sac-zımba sürtünme yüzeyleri arasında 0.25 olarak tespit edilmiştir. En iyi şekillendirmenin sağlanabilmesi için kalıp ve zımbaya ait sıcaklık değerleri sırasıyla 300 ve 25 °C olarak belirlenmiştir. Hidrolik basıncın baskı plakasının kuvvetine göre daha etkin bir parametre olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hidroşekillendirme; SEY; LS-Dyna; LS-OPT; Optimizasyon

Determination of Optimum Forming Parameters of Warm Hydromechanical Deep Drawing Process

Abstract

In current study, a comprehensive finite element modeling was established for warm hydromechanical deep drawing process which is a promising technique in forming of aluminum alloys that are expected to be increasingly exploited in automotive industry along with lightweighting efforts. Different number of elements and element formulations, coefficients of friction for contacting surfaces and material models were and optimum choices and values were determined. In the second part of the study, optimum tool temperature, and loading profiles (hydraulic pressure and blank holder force) were obtained parametrically to achieve highest formability in warm hydromechanical deep drawing process by using established FE model. As a result, elastic-viscoplastic-thermal material model was found to be reflecting the material behavior better compared to other material models utilized. Coulomb friction coefficient for contacting surfaces blank-die, blank-blank holder and blank-punch were determined as 0.05, 0.05 and 0.25, respectively. Optimal temperatures values for die and punch were determined as 300 and 25°C, respectively when highest formability is taken into

account. Hydraulic pressure was found to be more effective on formability than blank holder force.

Keywords: Hydroforming; FEM; LS-Dyna; LS-OPT; Optimization

[*dgnacar@ktu.edu.tr](mailto:dgnacar@ktu.edu.tr)

1. GİRİŞ

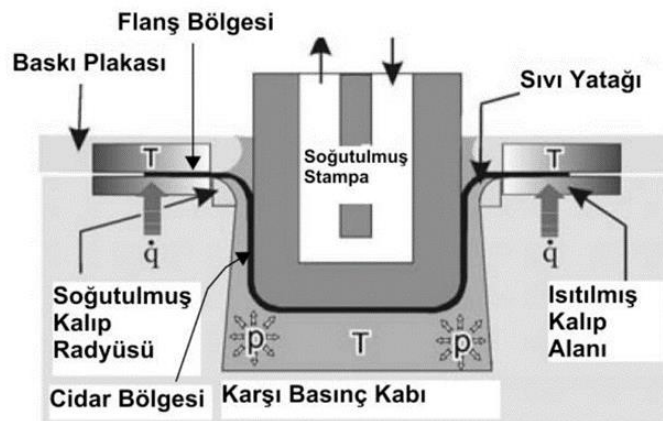
Tüm dünyada fosil yakıtların tüketimi ve CO₂ gazı emisyonları 1973 yılındaki büyük petrol krizinden bu yana sürekli olarak artmaktadır (Merrill 2007). Enerji piyasası denetleme kurulu (EPDK) tarafından hazırlanan rapora göre 2010-2012 yılları arasında ülkemizde ham petrolün temin edilmesinde yerli kaynakların kullanımında azalma olurken, ihtiyacın karşılanmasında ithalata yönelme gerçekleşmiş ve toplam ham petrol tüketimi yaklaşık %12 artış göstermiştir (D. K. P. P. D. Başkanlığı 2013). Buna karşın, son 10-20 yılda artan rekabet koşulları ve çevresel düzenlemeler (hava kirliliği ve küresel ısınma karşıtı yasal düzenlemeler) otomotiv firmalarını daha hafif, daha az yakıt tüketen, daha az CO₂ emisyonu açığa çıkaran ve mukavemet/ağırlık oranı daha yüksek araçlar üretmeye sevk etmiştir. Bu yüzden üreticiler, hafif ağırlıklı malzemeler, alaşımlar ve kompozit malzeme kullanımının arttırmak ve/veya bu malzemelerin kullanıldığı yerlerde ağırlık optimizasyonu yaparak daha hafif ve fonksiyonel yapılar elde etmek zorundadırlar (Koç 2008).

Hem literatürde hem de sanayide motorlu taşıtların gövdelerinde düşük karbonlu çelik (DKÇ) gibi otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan malzemelerin yerine alüminyum gibi daha hafif malzemelerin kullanılması ile ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur. Schultz, taşıt ağırlığının %10 azaltılması halinde yakıt tüketiminin % 6-8 azaltılabileceğini belirtmiştir (Schultz&Abraham 2009). DKÇ yerine alüminyum kullanılması halinde araç ağırlığında % 40-60 azalma elde edilebilmektedir. Ancak alüminyum alaşımlarının içerisindeki yüksek alaşım yüzdeleri sebebiyle oda sıcaklığındaki şekillendirilebilirlikleri sınırlıdır (Novotny&Geiger 2003, Shah 2011). Bundan dolayı, oda sıcaklığının üzerinde ancak yeniden kristalleşme sıcaklığının (Al alaşımları için 230-330 °C) altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilen ılık şekillendirme (İŞ) yöntemi bu alaşımların şekillendirilmesinde büyük önem arz etmektedir (Bobbert et al. 2001, Novotny&Geiger 2003). İŞ'nin katkısıyla, şekillendirme kuvvetleri azalmakta ve aktif hale gelen ek kayma düzlemleri yardımıyla malzemelerin şekillendirilebilirliği (sünekliği) artmaktadır (Shah 2011). Ayrıca bu yöntemle

yapılan sac şekillendirme işlemlerinde daha yüksek kap derinlikleri de elde edilebilmektedir (Li&Ghosh 2004). Alüminyum alaşımlarının oda sıcaklığındaki şekillendirilmesindeki bariyeri aşmak için kullanılan bir diğer yöntem ise şekillendirmenin zımba ilerlemesine karşı olarak hidrolik basıncının kullanıldığı hidroşekillendirme (HŞ) metodudur (Schmoeckel et al. 1999, Koç 2008). Son yıllarda, hem IŞ hem de HŞ yöntemlerinin avantaj ve özelliklerinin bir araya getirildiği ve hafif alaşımların şekillendirilmesinde ılık şekillendirilmesinde ılık hidromekanik derin çekme (IHDC) yöntemi ön plana çıkmıştır (Şekil 1).

IHDC yöntemi başlı başına, alüminyum gibi hafif malzemelerin şekillendirilebilirliğinde önemli bir artış sağlasa da daha yüksek ve başarılı şekillendirme işlemi için prosesi etkileyen parametrelerin etkileri ve en iyi şekillendirilebilirliği veren proses parametreleri belirlenmelidir. Choi et al (2008) başarılı bir IHDC işlemi için proses boyunca kontrol edilmesi gereken değişkenleri zımba ve kalıp sıcaklıkları, hidrolik basıncı ve baskı plakası kuvveti olarak belirlemişlerdir. Aynı araştırmacılar, kalıp ve zımba üzerindeki sıcaklık dağılımını belirlemek için adaptif-izotermal sonlu elemanlar analizine bağlı bir yöntem geliştirmişleridir. Başka bir çalışmada ise yine sıcaklık parametresini literatürdeki deneysel verilerden yararlanarak analitik olarak incelemişlerdir (Choi et al. 2007). Bir diğer çalışmada HB ve BPK değerleri, bulanık mantık algoritması ile oluşturulmuş bir alt program sonlu elemanlar kodu ile eş çalıştırılarak belirlenmiştir (Choi et al. 2007). Altan et al (2004) HB ve BPK değerlerini adaptif sonlu elemanlar yöntemini kullanarak elde etmişlerdir.

Bu çalışma kapsamında, en iyi şekillendirilebilirliği veren takım sıcaklık dağılımı ve HB ve BPK yükleme profillerinin şekillendirilebilirliğe etkileri şekillendirilen AA5754-O sacı üzerindeki kalınlık dağılımı esas alınarak sayısal olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Sayısal çalışmalarda LS-DYNA (LSTC Corp., Livermore, CA, ABD) ticari sonlu elemanlar yazılımı ve onunla eş çalışan optimizasyon modülü LS-OPT kullanılmıştır (Hallquist 2007).



Şekil 1. Ilık hidromekanik derin çekme prosesinin şematik gösterimi (Groche et al. 2002)

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR ve DEĞERLENDİRME

2.1. Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

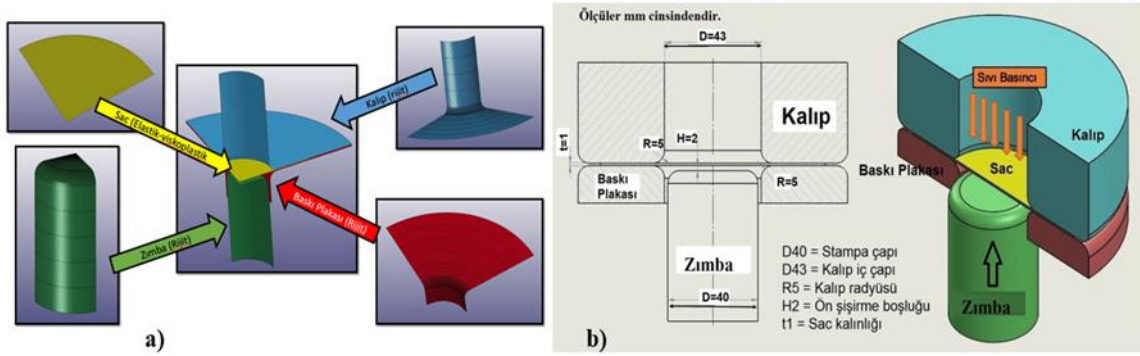
İlık hidromekanik derin çekme prosesinin sonlu eleman modeli sırasıyla sac, kalıp, baskı plakası ve zımba olmak üzere dört ana parçadan oluşmaktadır. Bu parçalar ile oluşturulan sonlu elman modeli ve boyutlar Şekil 2’de verilmiştir. Sonlu eleman modeli hazırlanırken sistemin aksenal simetrik geometrisinden faydalanarak çeyrek model hazırlanmıştır. Proses süresince yüksek miktarda deformasyona uğrayan sac elastik-viskoplastik olarak tanımlanırken diğer parçalar rijit olarak tanımlanmıştır. Parçaların modellenmesinde eleman tipi olarak *Belytschko-Tsay* (eleman tipi 2) ve tam integrasyonlu (*fully integrated – eleman tipi 16*) kabuk elemanlar denenmiştir. Kabuk elemanların kalınlığı boyunca 7 integrasyon noktası tanımlanmıştır. *Belytschko-Tsay* eleman formülasyonu daha hızlı sonuç vermişse de tam integrasyonlu eleman formülasyonunun malzeme davranışını daha iyi yansıttığı görülmüştür. Tam integrasyonlu elemanın daha iyi sonuç vermesinin temel nedeni, kabuk elemanların eğilme davranışını daha iyi yansıtabilmesidir. Kalıp, baskı plakası ve zımba sırasıyla 1600, 1536, 1600 sabit eleman sayılarından oluşurken, sac için 1000-25000 arasında eleman sayısı denenerak ağ örgüsü (*mesh*) yakınsaklık analizleri sonucunda optimum eleman sayısı yaklaşık 12000 olarak belirlenmiştir (Şekil 3). Bu değerlendirme için sac üzerindeki sabit bir noktadaki maksimum von Mises gerilme değerleri dikkate alınmıştır.

Kalıbın tüm serbestlik dereceleri (her üç eksen üzerindeki ötelenme ve dönmeler) sınırlandırılmıştır. Zımba ve baskı plakası için ise sadece z-ekseni doğrultusunda harekete müsaade edilmiştir. Sac üzerine simetri sınır koşulları tanımlanmış ve sac, baskı plakası ile kalıp arasında baskı plakası kuvveti yardımıyla tutulmuştur. Hidrolik basıncı uygularken, akışkanı modellemek (katı-sıvı etkileşimi: Fluid-Structure Interaction) yerine sac üzerinde tanımlanan bir bölgeye hidrolik basınç olarak uygulanmıştır. Takımlar ve sac için başlangıç ve sınır koşulları Şekil 4’te verilmiştir.

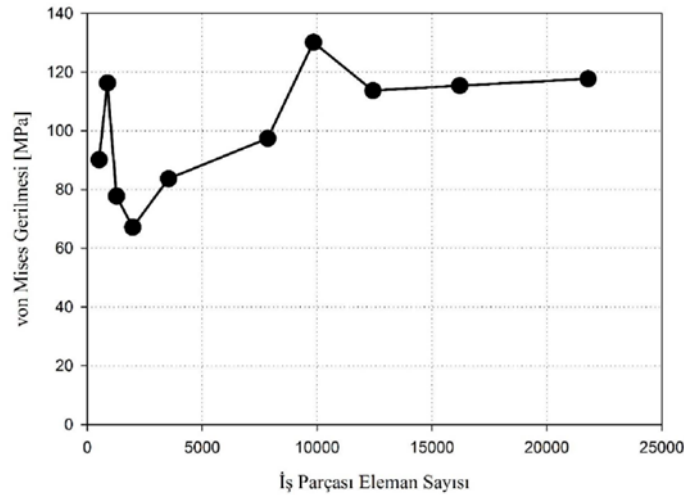
Sac-kalıp, sac-baskı plakası ve sac-zımba olmak üzere üç adet temas yüzey çifti belirlenmiştir. Bu yüzey çiftleri arasında belirlenen Coulomb sürtünme katsayıları çeşitli denemeler sonucunda sırasıyla 0.05, 0.05 ve 0.25 olarak belirlenmiştir. Temas algoritması olarak forming-one-way-surface-to-surface, automatic-single-surface ve automatic-surface-to-surface algoritmaları ile yapılan denemeler sonucunda forming-one-way-surface-to-surface algoritmasının temas davranışını en iyi bir şekilde yansıttığı görülmüştür. İlgili literatür incelendiğinde, Piecewise linear plasticity, Power-law plasticity, Johnson-Cook ve Elastik-viskoplastik-termal malzeme modellerinin kullanıldığı görülmüştür. Bu malzeme

modellerinden ilk ikisinin kullanımı için sac üzerinde homojen bir sıcaklık dağılımı gerekmektedir. Bu çalışmada ise kalıp ve parça üzerindeki sıcaklıklar homojen olmadığından Johnson-Cook ve Elastik-viskoplastik-termal malzeme modellerinin kullanımı tercih edilmiştir. Her iki malzeme modeliyle de başarılı sonuçlar elde edilse de elastik-viskoplastik-termal malzeme modeli doğrudan farklı sıcaklıklarda elde edilen akma eğrilerini kullanmaya imkân sağladığından deneysel sonuçlara daha yakın değerler elde edilmiştir (Şekil 5).

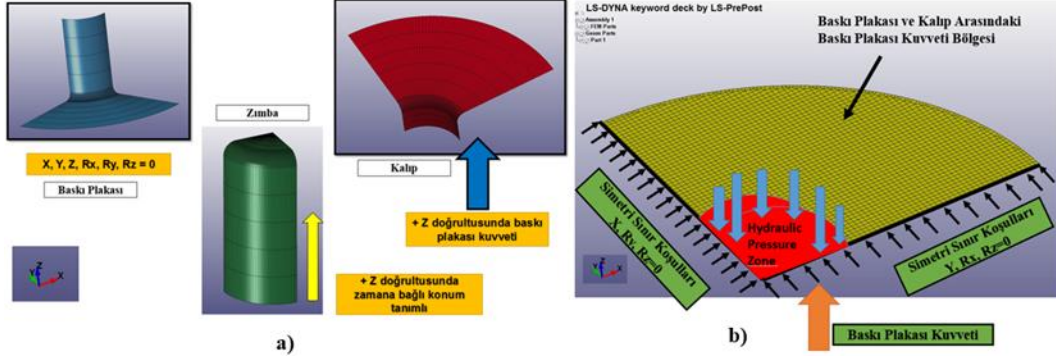
Tüm bu çalışmaların sonunda hazırlanan sonlu elman modelinin doğrulaması şekillendirilmiş bir kap üzerindeki bir kesitten alınan ölçüler ile sayısal analiz sonucunda elde edilen değerler karşılaştırılarak yapılmıştır. Şekil 5'ten de görülebileceği gibi hem deneysel hem de sayısal veriler yüksek oranda uyum göstermektedir.



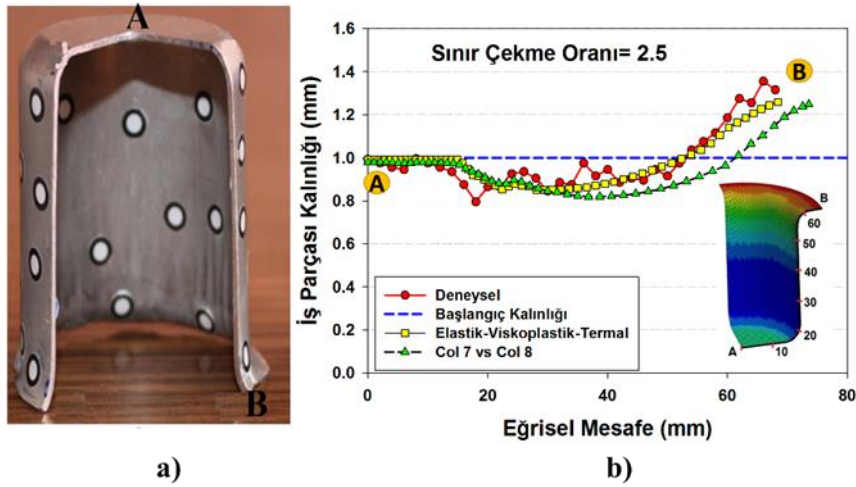
Şekil 2. a) Sonlu eleman modeli, b) Model geometrisi ve ölçüler



Şekil 3. Sac için kullanılan eleman sayısının sonuçlara etkisi



Şekil 4. Başlangıç ve sınır koşulları: a) Baskı plakası, zımba ve kalıp için; b) Sac için

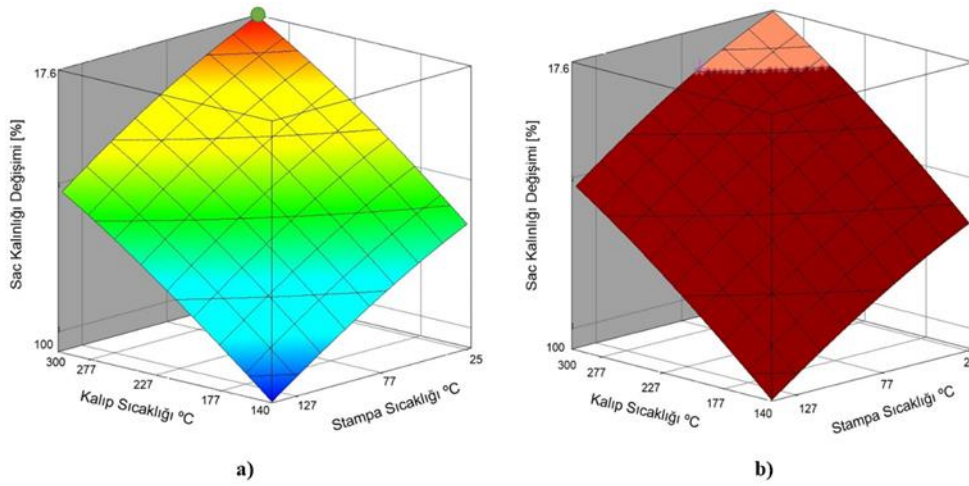


Şekil 5. a) Deneysel numunesi, b) Sonlu eleman modelinin doğrulaması için deneysel ve sayısal kalınlık dağılımlarının karşılaştırılması

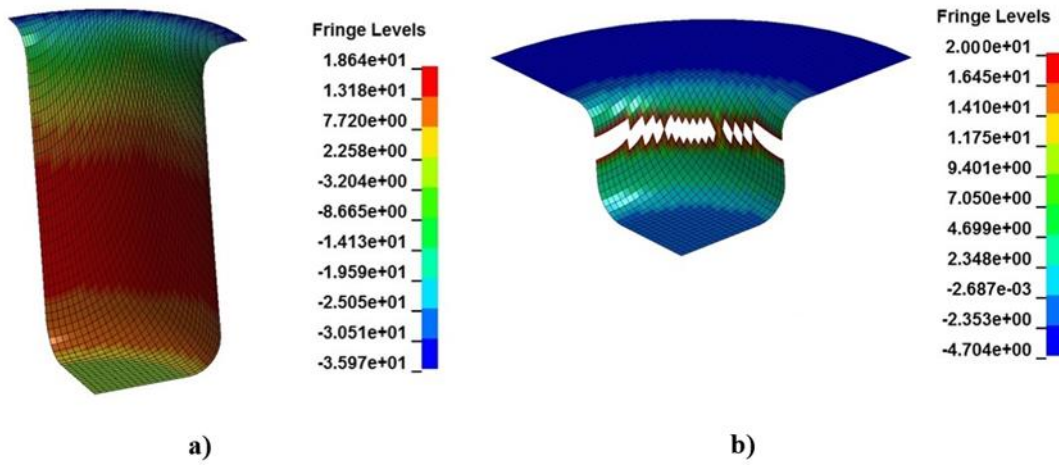
2.2. Sıcaklık Optimizasyonu

Çalışmanın bu kısmında, en iyi şekillendirmenin sağlandığı kalıp, baskı plakası ve zımba sıcaklıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla sıcaklık optimizasyonunda diğer tüm parametreler sabit iken sadece kalıplar ve zımba üzerindeki sıcaklık değerleri değişken olarak ele alınmıştır. Sacın başlangıç sıcaklığı oda sıcaklığı (25 °C) olarak kabul edilirken, kalıp üzerindeki sıcaklık aralığı 140-300 °C ve zımba üzerindeki sıcaklık aralığı 25-140 °C olarak kabul edilmiştir. AA5754-O alüminyum alaşımının yeniden kristalleşme sıcaklığına göre belirlenen bu değerler LS-DYNA programında parametrik olarak tanımlanmış ve LS-OPT programında 10 farklı örnekleme noktasında analiz edilmiştir. Analizler değerlendirilirken sac üzerinde yırtılma gerçekleşmeden elde edilen maksimum sac incelme yüzdesi kriter olarak ele alınmıştır. Yapılan analizler sonucunda Şekil 6'da verilen tepki yüzeyleri elde edilmiştir. Şekil 6.a'dan görülebileceği gibi sacda yırtılma olmadan sac üzerindeki maksimum incelme

kalıp sıcaklığı 300 °C ve zımba sıcaklığı 25 °C iken gerçekleşmiştir. Şekil 6.b'de ise aynı yüzey grafik üzerinde biri açık renkli diğeri koyu renkli iki bölge tespit edilmiştir. Bu bölgelerden açık renkli olanı şekillendirmenin güvenli olduğu bölgeyi temsil ederken koyu renkli bölge şekillendirmenin riskli olduğu bölgedir. Bu yorumu doğrulamak amacıyla her iki bölgeden birer adet kalıp-zımba sıcaklıkları kombinasyonu ile analizler gerçekleştirilmiştir. Güvenli bölgeden 260 °C kalıp, 25 °C zımba sıcaklığı çifti seçilirken riskli bölgeden 140 °C kalıp ve 25 °C zımba sıcaklığı çifti seçilmiştir. Yapılan iki analizin sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7.a'da güvenli bölgede yapılan analiz 45 mm zımba ilerlemesinde başarılı bir şekillendirme ile sonuçlanmıştır. Ancak, riskli bölgede gerçekleştirilen analiz 17.5 mm zımba ilerlemesinde daha şekillendirme işlemi tamamlanmadan sac yırtılmıştır.



Şekil 6. a) Kalıp ve zımba için yapılan sıcaklık optimizasyonu sonuçları b) Kalıp ve zımba için yapılan sıcaklık optimizasyonu sınır değerleri (müsaade edilebilir incelleme: açık renkli bölge; riskli bölge: koyu renkli bölge)



Şekil 7. Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen ılık hidromekanik derin çekme işlemi ve yüzde kalınlık dağılımı a) 260 °C kalıp ve 25 °C zımba sıcaklığında (başarılı şekillendirme), b) 140 °C kalıp ve 25°C zımba sıcaklığında (yetersiz şekillendirme ve hasar)

2.3. Yükleme Profillerinin Şekillendirme Üzerindeki Etkisi

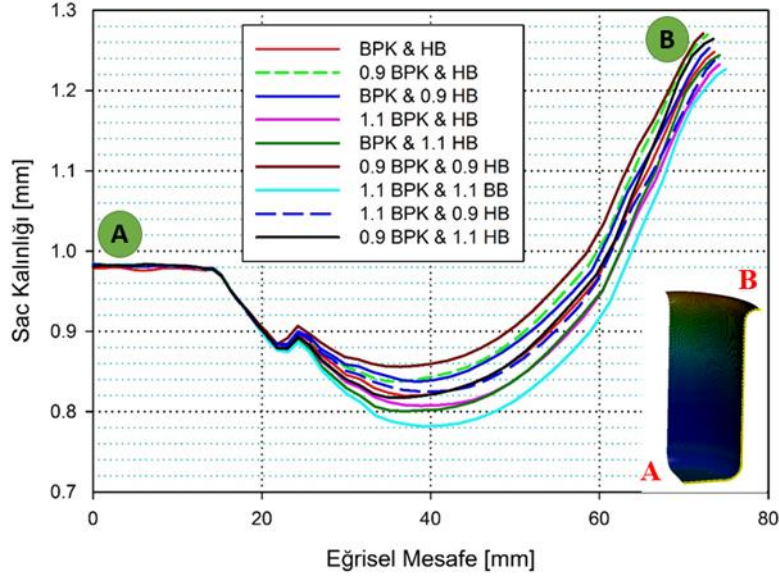
IHDÇ ile başarılı bir şekillendirme yapabilmek için ayrıca proses parametrelerinin, proses ve şekillendirilen parça üzerindeki etkilerini tam olarak bilinmesi gerekir. BPK ve HB yükleme profilleri IHDÇ prosesinin en önemli parametrelerindedir.

BPK ve HB'nin proses ve şekillendirilen parça üzerindeki etkilerini incelemek için şekillendirilmiş sacların kalınlıklarının yükleme profillerine bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. Bu amaçla, ilk önce mevcut başarılı şekillendirme yapılabilen BPK ve HB yükleme profili çiftlerinden bir tanesi seçilmiştir. Seçilen BPK ve HB yükleme profilleri 1.1 ve 0.9 katsayıları ile çarpılarak profillerin \pm %10 değiştirilmeleri halindeki değerleri belirlenmiştir. Ardından mevcut ve yeni profiller ile BPK-HB çiftleri oluşturularak 9 farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan bu profil çiftleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1'de verilen 9 farklı analiz gerçekleştirildikten sonra şekillendirilmiş sacların merkezinden kenarına olan eğrisel mesafe boyunca alınan kalınlık değişimleri karşılaştırılmıştır. Aynı çaptaki sacdan aynı derinlikteki kap çekilirken sacdaki inceleme miktarının minimum olduğu durumda uygulanan yükleme çiftinin en iyi şekillendirmeyi veren profiller olduğu kabul edilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde, 0.9 BPK & 0.9 HB yükleme profili çifti ile şekillendirilen kap üzerindeki kalınlık dağılımı minimum incelemeyle gerçekleşmiş, dolayısıyla en iyi şekillendirmeyi vermiştir. Bu durumda, hem BPK hem de HB yükleme profilleri aynı ölçüde azaltıldığında şekillendirilebilirlik daha fazla artmaktadır.

Çizelge 1. Analizlerde kullanılan farklı yükleme profili çiftleri

Analiz No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Yükleme Profilleri	BPK HB	0.9BPK HB	BPK 0.9HB	1.1BPK HB	BPK 1.1HB	0.9BPK 0.9HB	1.1BPK 1.1HB	1.1BPK 0.9HB	0.9BPK 1.1HB



Şekil 8. BPK ve HB'nin şekillendirilmiş sac üzerindeki birleştirilmiş etkisi

3. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında başarılı bir ılık hidromekanik derin çekme işlemi için detaylı bir sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Sonlu eleman modelinin oluşturulmasında, temas algoritması için forming-one-way-surface-to-surface, malzeme modeli için elastik-viskoplastik termal, eleman formülasyonu için tam integrasyonlu kabuk eleman en iyi sonucu veren parametreler olarak belirlenmiştir. Temasta bulunan yüzeylerden sac-kalıp, sac-baskı plakası ve sac-zımba için Coulomb sürtünme katsayıları sırasıyla katsayısı 0.05, 0.05 ve 0.25 olarak elde edilmiştir. Maksimum şekillendirilebilirlik için yapılan sıcaklık optimizasyonu sonucunda kalıp sıcaklığının 300 °C ve zımba sıcaklığının 25 °C olması halinde en iyi şekillendirme elde edilmiştir. Yükleme profilleri değerlendirmeye alındığında hem BPK hem de HB yükleme profillerinin birlikte azaltılmasıyla şekillendirilmiş sac üzerinde minimum incelme ile maksimum şekillendirilebilirlik elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 112M913 numaralı ve “Ilık Hidromekanik Derin Çekmede Sıcaklık, Hidrolik Basıncı Ve Baskı Plakası Kuvvetinin Proses Ve Üretilen Parçalara Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Altan T (2004). Tube and sheet hydroforming - new development in equipment, tooling and process simulation. In: *2nd Annual North American Hydroforming Conference*. Ontario, Canada
- T. C. E. P. D. K. P. P. D. Başkanlığı (2013). Petrol Piyasası Sektör Raporu
- Bobbert S, Novotny S., Vahl M.&Geiger M. (2001). Process strategies for sheet metal hydroforming of lightweight components. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* **215**(7): 967-976
- Choi H, Koç M & Ni J (2007). Determination of Optimal Loading Profiles in Warm Hydroforming of Lightweight Materials. *Journal of materials processing technology* **190**(1): 230-242
- Choi H, Koç M & Ni J (2007). A Study on the Analytical Modeling for Warm Hydro-mechanical Deep Drawing of Lightweight Materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **47**(11): 1752-1766
- Groche P, Huber R, J D & Schmoeckel D (2002). Hydromechanical Deep Drawing of Aluminum Alloys at Elevated Temperatures. *CIRP Annals-Manufacturing Technologies* **51**(CIRP Annuals): 215-218
- Hallquist J O (2007). LS-DYNA Keyword User's Manual. Livermore Software Technology Corporation. Livermore, CA, USA
- Koç M, Cora Ö N (2008) Introduction and the state of the art of hydroforming. (Ed: M Koç) *Hydroforming for Advanced Manufacturing*. Woodhead Publishing Ltd. Cambridge England
- Li D & Ghosh A K (2004). Biaxial Warm Forming Behavior of Aluminum Sheet Alloys. *Journal of Materials Processing Technology* **145**(3): 281-293.
- Merrill K R (2007). The Oil Crisis of 1973-1974: A Brief History with Documents., Bedford/St. Martin's, USA
- Novotny S & Geiger M (2003). Process Design for Hydroforming of Lightweight Metal Sheets at Elevated Temperatures. *Journal of materials processing technology* **138**(1-3): 594-599
- Schmoeckel D , Hielscher C, Huber R & Geiger M (1999). Metal Forming of Tubes and Sheets with Liquid and Other Flexible Media. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **48**(2): 497-513
- Schultz R A & Abraham A K (2009). Metallic Material Trends for North American Light Vehicles. In: *Great Designs in Steel*, Michigan
- Shah M K (2011). Material Characterization and Forming of Light Weight Alloys at Elevated Temperature, The Ohio State University.