



AA 6013 ALAŞIMININ HALKA BASMA TESTİ VE SONLU ELEMAN ANALİZİ

Salim Çam¹, Hasan Sofuoğlu² ve Ömer Necati Cora³

¹Erzincan Üniversitesi, Erzincan

^{2,3}Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

ABSTRACT

The interface friction between the workpiece and dies is among the factors that significantly affect deformation load, metal flow, surface quality and microstructure of the product. Therefore, it is crucially important to understand frictional conditions between the workpiece and dies. The ring compression test has been widely to analyze interface friction and for testing lubricants. This study, aimed for investigating the friction conditions of AA 6013 aluminum alloy which is commonly used in automotive industry. Standard ring shaped (Ratio of outer diameter: inner diameter: height = 6:3:2) specimens were compressed under different deformation ratios, and a novel approach was used to determine the coefficient of friction at the interface of die and workpiece. After experimental work, the distance between barreled and not barreled surfaces along material flow direction was measured by image processing. The finite element model was then established and constant friction coefficient (Coulomb friction coefficient) was used at interface. Several runs were performed along with different coefficient of friction values to match the experimental and numerical results, and consequently to determine the coefficient of friction experienced at die-workpiece interface.

ÖZET

Kalıp ve iş parçası arasındaki sürtünme, metal şekillendirme işlemlerinde deformasyon yükünü, metal akışını, yüzey kalitesini ve malzemenin iç yapısını etkileyen faktörlerdendir. Bu durum, kalıp ve iş parçası arasındaki sürtünmenin anlaşılmasını zorunlu kılmaktadır. Halka basma testi, ara yüzey sürtünmesini incelemek ve yağlayıcıları test etmek için yaygın olarak kullanılır. Bu çalışmada, özellikle otomotiv endüstrisi tarafından yoğun olarak kullanılan AA 6013 alaşımının sürtünme durumlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, ilgili alaşımdan halka şeklinde üretilen, standart boyut ölçülerine sahip (dış çap: iç çap: yükseklik = 6:3:2) numunelere oda şartlarında farklı deformasyon oranlarında basma testleri tatbik edilmiş ve sürtünme katsayısının belirlenmesi için yeni bir yöntem kullanılmıştır. Halka basma testleri gerçekleştirildikten sonra, bombeleşmeyen yüzey ile bombeleşen yüzey arasındaki akma yönündeki mesafe resim işleme (image processing) yöntemiyle ölçülmüştür. Daha sonra ise, halka basma testinin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Modellemede, Coulomb sürtünme modeli kullanılmıştır ve farklı sürtünme katsayıları ile analizler gerçekleştirilmiştir. Bombeleşmeyen yüzey ile bombeleşen yüzey arasındaki akma yönündeki mesafenin deneysel verilerle uyum sağladığı durumdaki sürtünme katsayısı, o işlem için iş parçası ve kalıplar arasında oluşan sürtünme katsayısı olarak tanımlanmıştır.

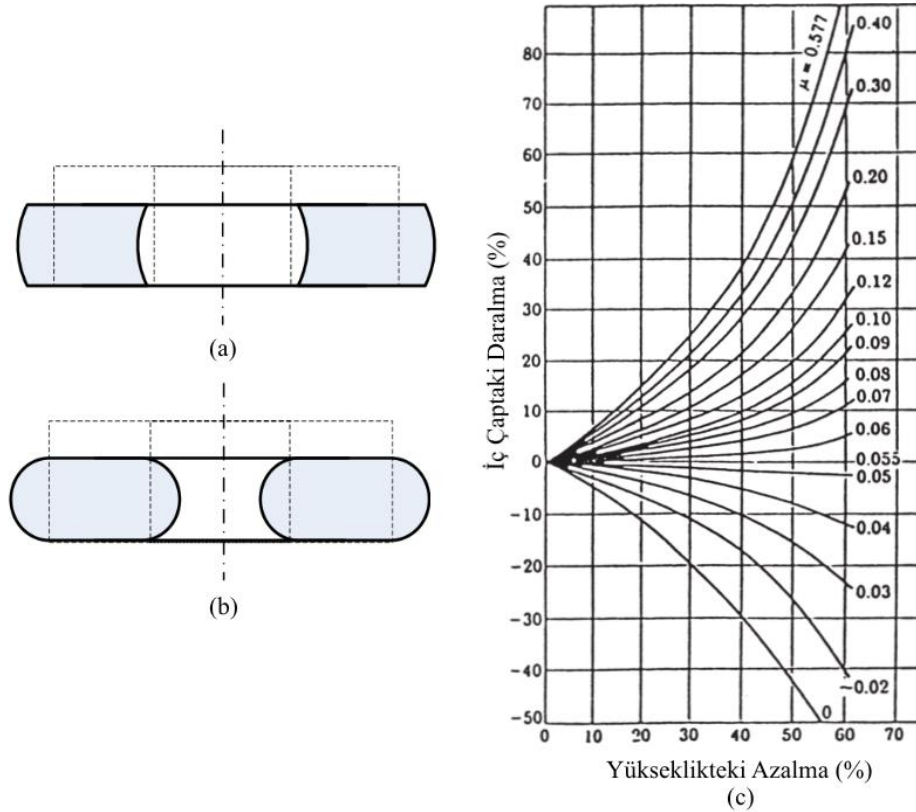
GİRİŞ

Metal şekillendirme işlemlerinin temel amacı, ürünün mümkün olduğunca istenilen nihaî geometriye yakın imal edilmesidir. Bu durum literatürde nihaî geometriye yakın imalat (near-net shape manufacturing) veya nihaî imalat (net-shape manufacturing) olarak adlandırılmaktadır. Ürünün nihaî şekline etki eden faktörlerden biri olan kalıplar ve iş parçası arasındaki sürtünme katsayısı ise deformasyon yükünü, metal akışını, yüzey kalitesini ve ürünün iç yapısını etkilemektedir ve bu durum sürtünme katsayısının doğru olarak anlaşılmasını zorunlu kılmaktadır [1]. Literatürde sürtünme katsayısının tayin edilmesinde en yaygın olarak Coulomb sürtünme teorisi ve sabit kayma sürtünme kullanılmaktadır. Bu teoriler sırası ile aşağıdaki denklemlerle ifade edilmektedir;

$$\tau = \mu\sigma_n$$

$$\tau = mk$$

Yukarıdaki denklemlerde τ sürtünme (kayma) gerilmesini, σ_n normal gerilmeyi, k akmadaki kayma gerilmesini, μ Coulomb sürtünme katsayısını ve m sürtünme faktörünü ifade etmektedir. Sürtünme gerilmesi daha çok normal gerilmeye bağlı olduğundan Coulomb sürtünme teorisinin kullanılması daha isabetli sonuçlar vermektedir. Öte yandan, kayma sürtünme teorisinin kullanılması da işlem kolaylığı sağlamaktadır [2]. Sürtünme katsayısının belirlenmesi için birçok deneysel yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden biri olan halka basma testi, Kunogi tarafından ortaya konmuş [3], Male ve Cockcroft'un yöntemi geliştirilmesiyle birlikte yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [4]. Halka basma testinde numune ile kalıp yüzeyleri arasındaki sürtünme katsayısı düşük ise iç çap genişlemekte (Şekil 1a) ve sürtünme katsayısının artması ile birlikte iç çap Şekil 1b'deki gibi daralmaktadır.



Şekil 1. Halka basma testi; (a) düşük sürtünme katsayısı, (b) yüksek sürtünme katsayısı, (c) genelleştirilmiş sürtünme kalibrasyon eğrileri [1]

Male ve Cockcroft sürtünme katsayısı ve iç çaptaki değişim arasındaki ilişkiyi kullanarak Şekil 1c'de gösterildiği gibi genelleştirilmiş sürtünme kalibrasyon eğrilerini oluşturmuşlardır [4]. Kalibrasyon eğrilerini oluşturmak için analitik ve sayısal yöntemler bulunmaktadır. Sayısal yöntemler içerisinde, sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık geometriler ve sınır şartları için işlem kolaylığı sağladığından daha fazla tercih edilmektedir [5,6].

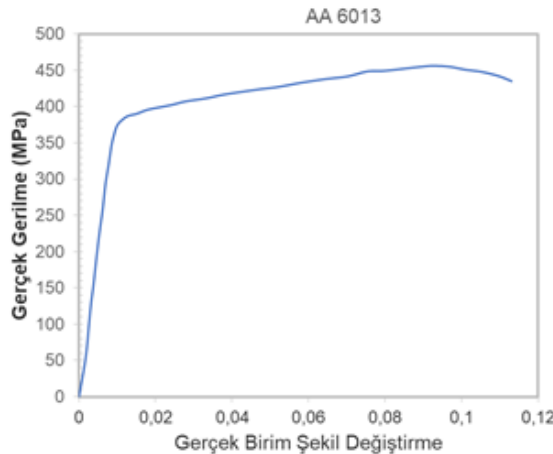
Literatürde halka basma testi ile alakalı birçok yayın bulunmaktadır. Sofuoğlu ve arkadaşları fiziksel modelleme tekniği ve sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yaptıkları çalışmalarda malzeme özelliklerinin, deformasyon hızının ve bombeleşmenin sürtünme kalibrasyon eğrilerine olan etkisini incelemişler; malzeme tipi ve test şartları göz önünde bulundurulmadan genelleştirilmiş sürtünme kalibrasyon eğrilerinin kullanılmasının güvenilir olmadığı sonucuna ulaşmışlardır [1,5,7]. Bir başka çalışmada ise 950 °C'nin altında, sürtünme faktörünün sıcaklığın artışı ile birlikte arttığı, deformasyon hızının sürtünme üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir [8]. Robinson ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada ise halka basma testi ile farklı yağlayıcılar kullanılarak sürtünme katsayıları tayin edilmiştir [9]. Shahriari ve arkadaşları sıcaklık, yağlayıcı ve kalıp malzemesi çeşidinin, Nimonic 115 süper alaşımından oluşturulmuş halka basma numunesinde oluşan sürtünme katsayısı üzerine olan etkisini incelemişler, mika içeren yağlayıcı kullanıldığında sürtünme katsayısını 0,3 civarında belirlemişlerdir [10]. Yüzey pürüzlülüğünün ve malzemenin dayanımının sürtünmeye olan etkisi ise Cristino ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır. Yapılan çalışmada sürtünme katsayısının yüzey pürüzlülüğünün artması ile arttığı belirtilmiştir [11].

Bu çalışmada iş parçası olarak AA 6013 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Yüksek mukavemetli bir alüminyum alaşımı olan AA 6013, şekillendirilebilirliğinin yüksek oluşu, basma özelliğinin ve korozyon dayanımının iyi oluşu sebebiyle otomotiv ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [12]. Dolayısıyla, bu malzemelerin sürtünme katsayılarının doğru olarak tespit edilmesi ilgili alaşımdan üretilecek parçaların şekillendirme süreçlerinin hassas bir şekilde ortaya konması ve özellikle temas halindeki çalışma koşullarının anlaşılması açısından önem arz etmektedir.

YAPILAN ÇALIŞMALAR

Halka Basma Testleri

İş parçası olarak kullanılan AA 6013 alüminyum alaşımının gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğrisi Şekil 2'de, mekanik özellikleri Tablo 1'de ve kimyasal bileşimi Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 2. AA6013 alaşımının gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme eğrisi [13]

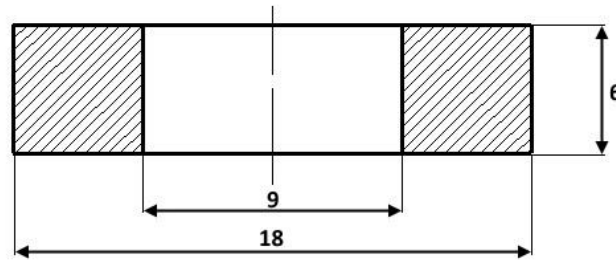
Tablo 1. Malzemeye ait mekanik özellikler [13]

| AA 6013 | |
|---------|------|
| E (GPa) | 68 |
| ν | 0.28 |

Tablo 2. AA 6013 alaşımının kimyasal bileşenleri (% Ağırlık)

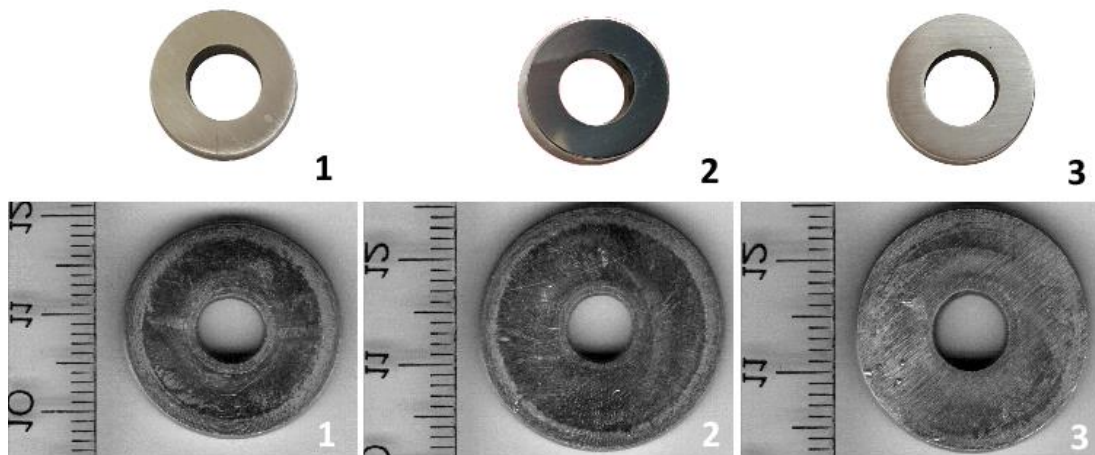
| | Al | Mg | Si | Cu | Mn | Fe | Diğer |
|---------|-----------|---------|---------|---------|---------|------|-------|
| AA 6013 | 94.8-97.8 | 0.8-1.2 | 0.6-1.0 | 0.6-1.1 | 0.2-0.8 | ≤0.5 | 0.15 |

Male ve Cockcroft [4] tarafından önerilen standart halka geometrisinde (6:3:2) belirtilen oranlara uygun olarak 18x9x6 mm boyutlarında 3 farklı alüminyum basma testi numunesi imal edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Basma testi numunelerinin ölçüleri (boyutlar mm cinsindedir.)

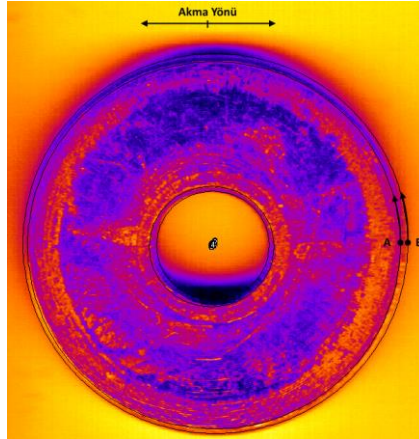
Testler öncesinde, numunelerin alt ve üst yüzeyleri sırası ile 800,1000 ve 1200 mesh'lik zımparalarla zımparalanmıştır. İmal edilen 3 numuneden 2 numaralı numuneye ek olarak alümina ile parlatma işlemi uygulanmıştır. Numuneler daha sonra alkole daldırılarak kurutulmuştur. Numuneler, daha sonra 60 kN kapasiteli bir hidrolik pres ile başlangıç yüksekliklerinin %40-55'i arasında değişen oranlarda basılarak deforme edilmiştir. Şekil 4'te basma numunesinin ilk hali ve basma işlemi sonrasındaki geometriler görülmektedir.



Şekil 4. Basma numunelerinin ilk (üstte) ve son halleri (altta)

Basma işlemi sonrasında deforme olan numunelerin iç çap ve dış çapındaki değişiklikleri hassas olarak belirleyebilmek için ImageJ görüntü işleme yazılımı kullanılmıştır. Şekil 5'de

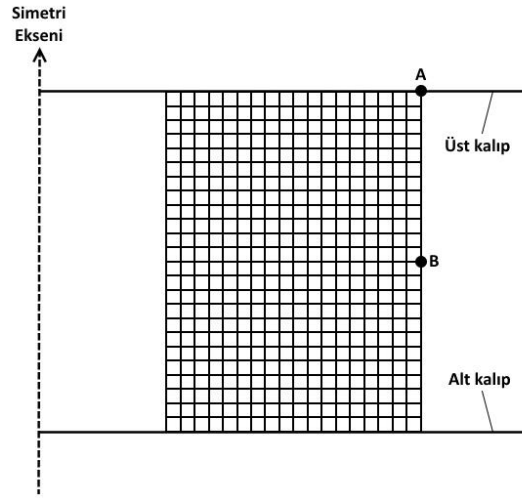
dış çapta meydana gelen bombenin ölçümü gösterilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde A ve B noktaları arasındaki mesafe referans alınmıştır.



Şekil 5. Numunedeki bombelenme ölçümünde referans alınan A ve B noktalarının konumları

Sonlu Elemanlar Analizi

Halka basma işleminin sonlu elemanlar modeli, numunenin aksel simetrisi göz önünde bulundurularak iki boyutlu olarak, ABAQUS ticari paket programı kullanılarak oluşturulmuştur. Alt ve üst kalıp rijit olarak modellenmiştir. Modelde 0.25x0.25 mm boyutlarında, 475 adet, dört düğüm noktalı aksel simetrik bir eleman olan CAX4R kullanılmıştır.



Şekil 6. Halka basma testinin 2 boyutlu sonlu elemanlar modeli

Sayısal analizler, deneyler ile aynı deformasyon oranlarında ve farklı sürtünme katsayıları tatbik edilerek gerçekleştirilmiştir. A ve B noktalarının son konumları, test ve sayısal analiz sonuçlarında örtüştüğünde, sayısal analizde girdi olarak kullanılan Coulomb sürtünme katsayısının değeri, basma testinde kalıp ile numune arasında gerçekleşen sürtünme katsayısı olarak kabul edilmiştir.

SONUÇLAR

Deneysel Sonuçlar

AA6013 alaşımı kullanılarak gerçekleştirilen basma testleri sonucunda test numunelerinin ölçülerinde meydana gelen değişimler Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Halka basma testi numunelerinin ölçülerinde meydana gelen değişimler

| | AA 6013 | | |
|---|---------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| İç çaptaki değişim (%) | 29 | 32 | 27 |
| Dış çaptaki değişim (%) | 23 | 30 | 23 |
| Yükseklikteki değişim (%) | 45 | 52 | 46 |
| A ve B noktaları arasındaki mesafe (mm) | 0,36 | 0,43 | 0,29 |

Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

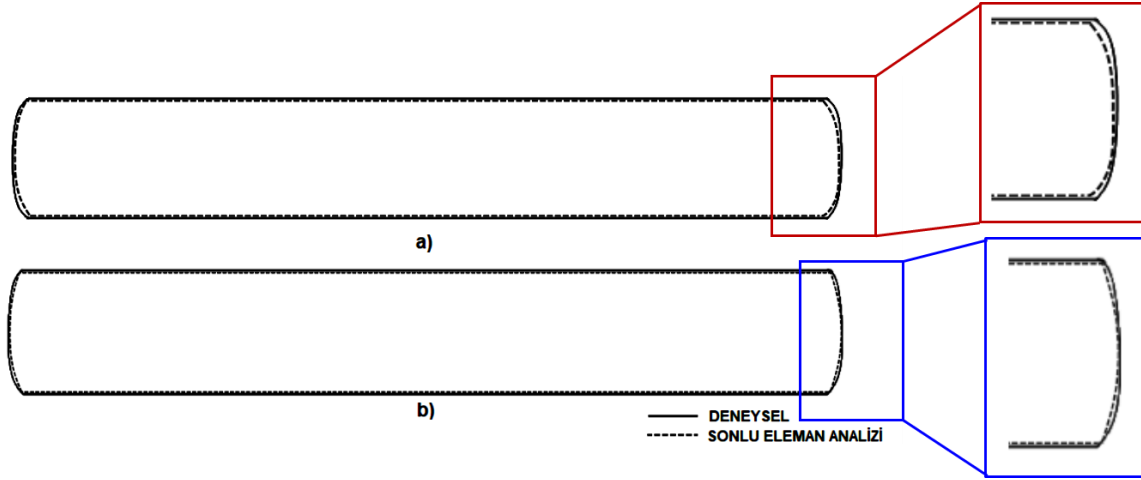
Deneysel çalışma sonrasında basılan numuneler resim işlemeye tabi tutularak A ve B noktaları arasındaki akma yönündeki mesafe ölçülmüştür. Sonlu elemanlar analizlerinde de bu değerlerin elde edilebilmesi için farklı sürtünme katsayıları için analizler yapılmıştır. Tablo 4, deneysel verilerle uyum içinde olan sonlu eleman analizlerinde kullanılan sürtünme katsayılarını göstermektedir.

Tablo 4. Sonlu eleman analizleri ile benzeşim sonucu elde edilen sürtünme katsayıları

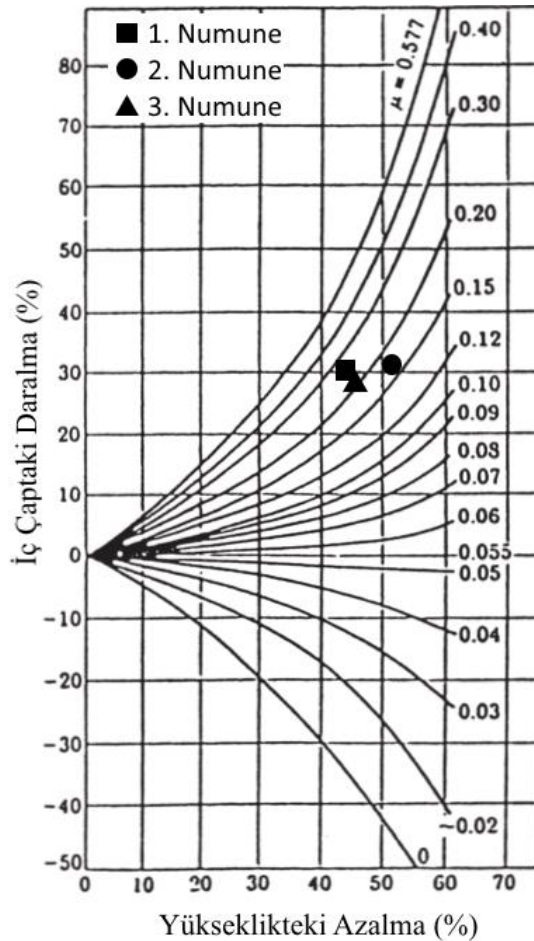
| Test No: | AA 6013 | | |
|------------------------------|---------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Sürtünme Katsayısı (μ) | 0,35 | 0,20 | 0,31 |

Basma testi sonrasında numunelerin önden görüşlerinin fotoğrafı çekilmiş ve fotoğraflar analiz için dönüştürüldükten (binarization) sonra numune sınırları belirlenmiştir. Bu görüntü daha sonra, sonlu elemanlar analizinden elde edilen görüntü ile boyutlar açısından karşılaştırılmıştır. Teste tabi tutulmuş numuneler ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen nihai geometrilerin önden görüşünün birbiri üzerine konulduğu durum Şekil 7’de görülmektedir. Sonlu eleman analizlerinin testler sonunda elde edilen nihai geometriye oldukça yakın olduğu görülmektedir. 2 nolu numunenin (%52 deformasyon, $\mu_{analiz}=0,2$) sonlu eleman analiz sonucunda elde edilen geometrinin gerçek geometriye, 1 nolu numuneye (%52 deformasyon, $\mu_{analiz}=0,35$) kıyasla daha yüksek oranda benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu husus, artan sürtünme katsayısının bombeleşmeyi arttırmasına bağlanmıştır. Numunelerden elde edilen % iç çap ve yükseklik değişimi sonuçlarının genelleştirilmiş sürtünme kalibrasyon eğrilerindeki konumları ise Şekil 8’de verilmiştir. Sürtünme kalibrasyon eğrilerinden elde edilen sürtünme katsayılarının, sonlu eleman analizleri ile benzeşimler sonucu elde edilen sürtünme katsayılarına göre düşük kaldığı tespit edilmiştir. Örneğin, 1 nolu numune için sonlu eleman analizleri ile test sonrası numune geometrisinin benzeşimine dayalı

olarak elde edilen sürtünme katsayısı 0,35 olarak belirlemişken, kalibrasyon eğrilerinde bu değer yaklaşık 0,26 olarak elde edilmiştir. Benzer durumlar, diğer numuneler için de geçerlidir. Bu husus, literatürde yer alan genelleştirilmiş kalibrasyon eğrilerinin her malzeme için kullanımının doğru olmayacağı sonucunu doğrulamıştır.



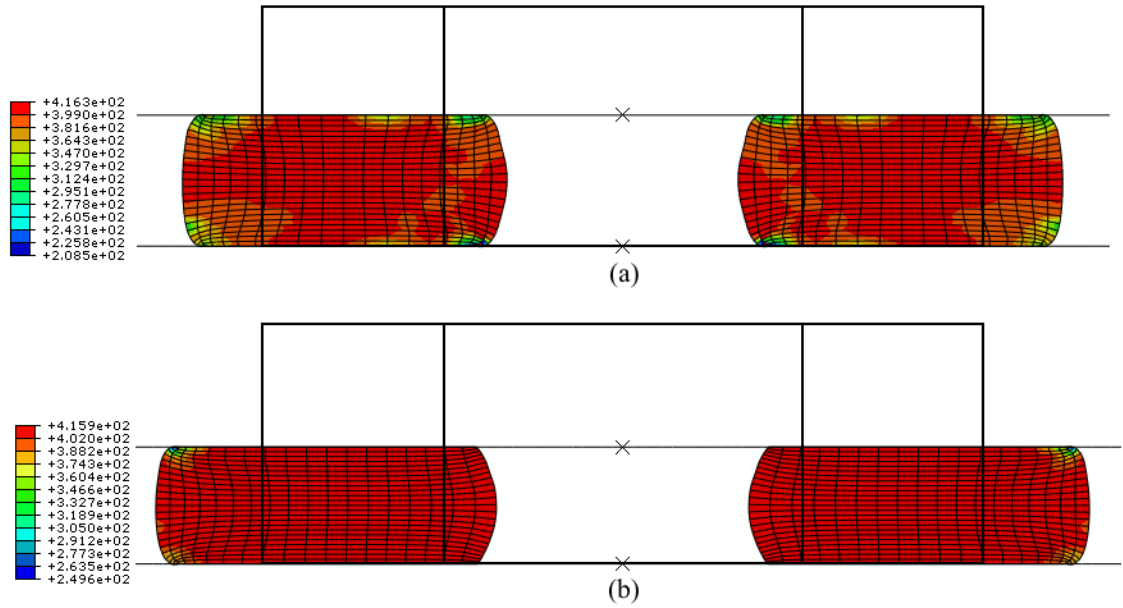
Şekil 7. Numuneler için nihai geometrilerin karşılaştırılması; (a) 1. numune, (b) 2. Numune



Şekil 8. Sayısal analizler yardımıyla elde edilen sonuçların genelleştirilmiş sürtünme kalibrasyon eğrileri üzerinde gösterilmesi

Basma işlemi sonucunda numunelerde meydana gelen von Mises eşdeğer gerilmeleri ile alt ve üst kalıpla temas olan bölgelerde meydana gelen kuvvet değerleri sayısal analizlerden elde edilmiştir. Birinci ve üçüncü numuneden elde edilen deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar

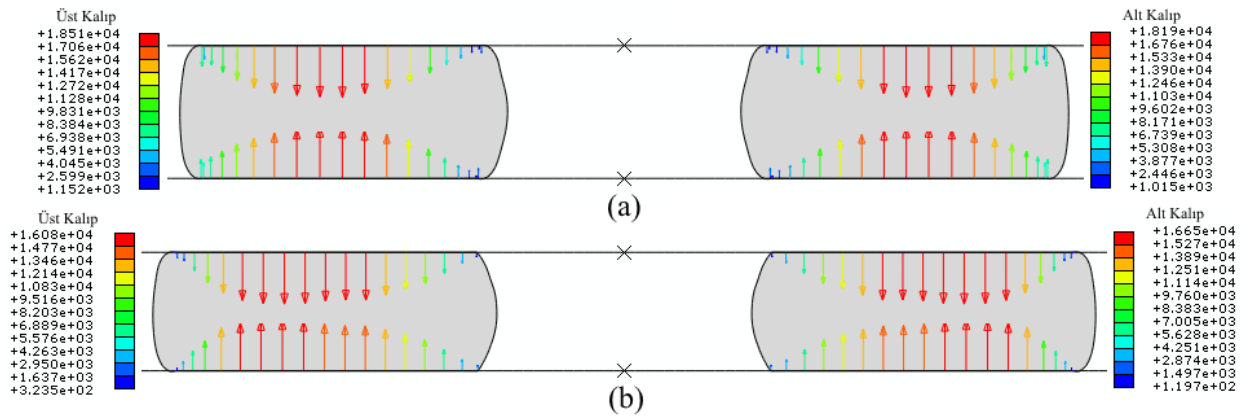
analizi sonuçları birbirine yakın olduğundan, karşılaştırmalar birinci numune ile ikinci numune arasında yapılmıştır.



Şekil 9. Basma testinin sayısal analizinde numunelerde meydana gelen von Mises eşdeğer gerilmesinin dağılımı; (a) 1. numune, (b) 2. numune

Şekil 9’da halka testi numunelerinin başlangıçtaki boyutları (kalın siyah çizgiler) ile test sonunda numunede elde edilen von Mises eşdeğer gerilmeleri gösterilmiştir. Bu şekilden de görülebileceği gibi, sürtünme katsayısının göreceli olarak yüksek oluşundan dolayı tüm numunelerin iç çapında daralma meydana gelmiştir. Birinci ve üçüncü numunede akış çizgileri karşılıklı olarak yönlenmişken ikinci numunede akış çizgileri deliğin bulunduğu tarafa yönlenmiştir.

Şekil 10’da ise, birinci ve ikinci numune ile alt ve üst kalıp arasında meydana gelen temas kuvvetinin değişimi verilmiştir. İkinci numunenin yüzeyine uygulanan ekstra parlatma işlemi nedeniyle sürtünme katsayısının düşük olmasına sebebiyet vermiş; bu da 2. Numunenin şekillendirilmesi sırasındaki meydana gelen maksimum kuvvetin birinci numuneye göre daha düşük kalmasına yol açmıştır



Şekil 10. Alt ve üst kalıp ile numuneler arasında meydana gelen temas kuvveti değerleri; (a) 1. numune, (b) 2. numune

SONUÇLAR

Bu çalışmada AA 6013 alüminyum alaşımından üretilen halka şeklindeki numunelere farklı deformasyon oranlarında halka basma testi uygulanmış ve aynı işleme ait sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Testler sonunda numuneler üzerinde bombeleşmeyen yüzey ile bombeleşen yüzey arasında akma yönündeki mesafe yeni bir yöntem kullanılarak resim işleme yazılımı yardımıyla belirlenmiş ve sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Deneysel çalışma ve sonlu elemanlar analizi sonucunda, deformasyon oranına ve yüzey işlemlerine bağlı olarak alüminyum için iş parçası ve kalıplar arasındaki sürtünme katsayısı 0,20-0,31 arasında değerler aldığı tespit edilmiştir. Öte yandan, test edilen numuneler üzerinden ölçülen % iç çap ve yükseklik değişimlerinin genelleştirilmiş sürtünme kalibrasyon eğrilerine konulmasıyla elde edilen sürtünme katsayılarının, sonlu eleman analizleri ile benzeşim sonucu elde edilen sürtünme katsayılarına göre %50'ye varan farklılıklar gösterdiği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] H. Sofuoğlu, Physical Modeling and Finite Element Analysis of Friction Encountered in Large Deformation Processes, Ph. D. Thesis, Texas Tech University, 1993.
- [2] M.S. Joun, H.G. Moon, I.S. Choi, M.C. Lee, B.Y. Jun, Effects of friction laws on metal forming processes, Tribol. Int. 42 (2009) 311–319. doi:10.1016/j.triboint.2008.06.012.
- [3] K. Mahito, A New Method of Cold Extrusion, Trans. Japan Soc. Mech. Eng. 23 (1956) 742–749. doi:10.1248/cpb.37.3229.
- [4] A.T. Male, M.G. Cockcroft, A method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation, J. Inst. Met. (1964) 38–48. doi:10.1016/0043-1648(66)90161-X.
- [5] H. Sofuoğlu, J. Rasty, On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test, Tribol. Int. 32 (1999) 327–335. doi:10.1016/S0301-679X(99)00055-9.
- [6] Y. Zhu, W. Zeng, X. Ma, Q. Tai, Z. Li, X. Li, Determination of the friction factor of Ti-6Al-4V titanium alloy in hot forging by means of ring-compression test using FEM, Tribol. Int. 44 (2011) 2074–2080. doi:10.1016/j.triboint.2011.07.001.
- [7] H. Sofuoğlu, H. Gedikli, J. Rasty, Determination of Friction Coefficient by Employing the Ring Compression Test, J. Eng. Mater. Technol. 123 (2001) 338. doi:10.1115/1.1369601.
- [8] L.X. Li, D.S. Peng, J.A. Liu, Z.Q. Liu, Y. Jiang, Experimental study of the lubrication behavior of A5 glass lubricant by means of the ring compression test, J. Mater. Process. Technol. 102 (2000) 138–142. doi:10.1016/S0924-0136(99)00415-X.
- [9] T. Robinson, H. Ou, C.G. Armstrong, Study on ring compression test using physical modeling and FE simulation, J. Mater. Process. Technol. 153–154 (2004) 54–59. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.045.
- [10] D. Shahriari, A. Amiri, M.H. Sadeghi, Study on hot ring compression test of Nimonic 115 superalloy using experimental observations and 3D FEM simulation, J. Mater. Eng. Perform. 19 (2010) 633–642. doi:10.1007/s11665-009-9522-7.
- [11] V.A.M. Cristino, P.A.R. Rosa, P.A.F. Martins, Surface roughness and material strength of tribo-pairs in ring compression tests, Tribol. Int. 44 (2011) 134–143. doi:10.1016/j.triboint.2010.10.002.
- [12] M.R.W.S. Abdala, J.C. Garcia de Blas, C. Barbosa, O. Acselrad, Thermoelectrical power analysis of precipitation in 6013 aluminum alloy, Mater. Charact. 59 (2008) 271–277. doi:10.1016/j.matchar.2007.01.005.
- [13] U. Ozdemir, Y. Cinar, Determination of Elastic Plastic Fracture Determination of Elastic Plastic Fracture Toughness Parameters for a Compact Tension Specimen Using the Finite Element Method, Materialprufung. (2012). doi:10.3139/120.110345.