SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE EKAP İŞLEMİNDE SÜRTÜNME KATSAYISI, SICAKLIK VE MESH SAYISININ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ VE FARKLI MALZEMELER İLE KIYASLANMASI

Arş. Gör. Kerim ÖZBEYAZ
Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
kerim.ozbeyaz@marmara.edu.tr

Doç. Dr. Aykut KENTLİ
Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
akentli@marmara.edu.tr

Dr. Öğr. Üyesi Hasan KAYA
Kocaeli Üniversitesi, Asım Kocabıyık MYO, Makine Programı
hasan.kaya@kocaeli.edu.tr

Özet

Sonlu Elemanlar Yöntemi günümüz akademik çalışmalarında ve sanayide yüksek doğruluğu ve hassasiyeti ile sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Yaygın olarak kullanılan Aşırı plastik deformasyon (APD) yöntemlerinden birisi olan Eş Kanallı Açısal Presleme (EKAP) yöntemi; malzemelerin mikroyapılarında yönlenmelere ve tanecik boyutlarında incelmelere sebep olması nedeniyle mekanik özelliklerinde önemli iyileşmelere neden olmaktadır. Bu çalışma da EKAP işleminin sonlu elemanlar yöntemi ile farklı parametreler kullanılarak analizi yapılacaktır. Bu parametreler deney koşullarını belirleme de öncelikli etkenler olup sıcaklık, sürtünme katsayısı ve mesh sayısı olarak belirlenmiştir. Elde edilecek olan sonuçlar literatürde ki değer sonuçlar ile karşılaştırılarak analizlerin doğrulanması yapılacaktır. Bu çalışma için yüksek korozyon dayanımı, hafifliği ve iyi soğuk şekillendirilebilme özellikleri nedeniyle sanayide yaygın kullanım alanına sahip AA6082 alaşımı tercih edilmiştir. Kalıp olarak da özel olarak tasarlanmış olan hexa-EKAP kalıp kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: APD, EKAP, Sonlu Elemanlar Yöntemi

INVESTIGATION OF THE EFFECTS of THE FRICTION, TEMPERATURE and NUMBER of MESH IN THE ECAP PROCESS by THE FINITE ELEMENT METHOD and COMPARISON of DIFFERENT MATERIALS

Abstract

Finite Element Method has been started to be used frequently in today's academic studies and industry with its high accuracy and precision. One of the most commonly used Severe Plastic Deformation (sPD) methods is the Equal Channel Angular Pressing (ECAP) method; In the microstructures of materials, it leads to significant improvements in the mechanical properties due to the orientation and production of ultrafine grain particles. In this study, ECAP process will be analyzed by using different parameters with finite element method. These parameters are the primary factors determining the experimental conditions and the temperature, friction coefficient and mesh count are determined. The results will be compared and also verified with the results in the literatüre. Due to its high corrosion resistance, light weight and good cold forming properties, AA6082 alloy has been preferred in this study. The mold is preferred as specially designed hexa-die.

Keywords: SPD, ECAP, Finite Element Analysis

1. GİRİŞ

Sanayinin önlenemeyen hızlı gelişimi ile doğada bulunan malzemelerin kendi özellikleriyle kullanılması yerine iyileştirilerek kullanımı ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda ilk olarak alaşımlar, plastik malzemeler ve kompozit malzemeler kullanılmış ve hızla yaygınlaşmıştır. Ancak bu malzemelerin

üretimi esnasında karşılaşılan üretim zorlukları, maddi külfetleri başka arayışlara sebep olmuş ve bu alanda birçok çalışma yapılmıştır. Göz ardı edilemeyecek sonuçlar ve kazımlar elde edilen bu yöntemlerden bir tanesi de Aşırı Plastik Deformasyon (APD) yöntemidir (Valiev et al. 2016). Özellikle 90'lı yılların başlarında Ruslar tarafından çalışılmış ve farklı uygulamaları literatüre sunulmuştur (VERLINDEN 2018). APD yöntemi malzemelerin mikro taneciklerine yüksek gerilmeler uygulanması sonucu; taneciklerde meydana gelen şekillenmeler ve yönelmeler ile malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileşmeler sağlamaktadır. İlk çalışmalarda 100-1000 nanometre (nm) boyutları arasında tanecik yapıları elde edilebilmiş ve bu boyutlara sahip tanecikler elde edebilmek amacıyla çeşitli yöntemler denenmiştir. Malzemelerin özelliklerinde istenilen iyileştirmelerin yapılabilmesi amacıyla aşılması gereken bir sonra ki adım ise elde edilebilen bu aşırı ince tanecikli malzemelerin içerisinde büsbütün homojen olarak dağılabilmesi ve makul seviyede eş eksenli olacak şekilde; tane sınırlarının çoğunluğunda, yönelme açılarının arttırılması gerekmekteydi. (Lapovok, 2005)Bu hedefler doğrultusunda; Yüksek Basınçlı Burma (HPT), Bükümlü Ekstrüzyon (TE), Birikmeli Rulo Yapıştırma (ARB), Döngüsel Ekstrüzyon ve Sıkıştırma (CEC) gibi birçok APD yöntemi uygulanmıştır. (Kocich et al. 2010) (VERLINDEN 2018), (Valiev et al. 2007), (Sepahi-Boroujeni et al., 2015), (Mathieu, et al., 2006), (Shahbaz, et al., 2011), (Faraji et al. 2012), (Zangiabadi, et al., 2011), (Kim, et al., 2013), (Shamsborhan, et al., 2014), (Faraji et al. 2012), (Kocich, et al., 2014). Bu yöntemlerden en çok dikkat çeken ve yaygın kullanıma sahip olan yöntem ise Eş Kanallı Açısal Presleme (EKAP) olarak adlandırılan yöntemdir. (Hasan Kaya 2013) Bu yöntem; malzemelerin, yeniden kristalleşme sıcaklığının altında olmak koşuluyla (katı olarak), 90° -135° kavis açısı aralığındaki bir kalıp kanalından preslenmesi işlemidir. İlk olarak Segal ve arkadaşları tarafından uygulanan bu yöntem malzemelerin mekanik özelliklerinde %20'ler civarında iyileştirmeler sağlamıştır. (Segal, 1977) Özellikle Alüminyum ve alaşımları gibi şekillenebilirlik (formability) özelliği yüksek ve gevrek olmayan malzemelerde denenmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

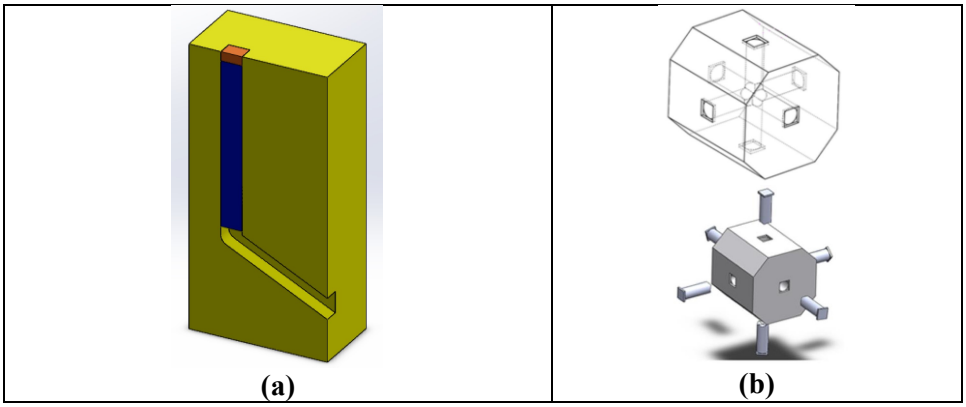
Yapılan ve devam eden deneysel çalışma ve araştırmaların en büyük dezavantajı maliyetlerinin çoğunlukla yüksek olması, uzun zaman alması ve ilk tasarımından sonra genellikle revizyonlara ihtiyaç duymasıdır. Özellikle günümüz ekonomi şartları da göz önüne alındığında deneysel çalışmaların bu olumsuz yönlerinin azaltılması büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda geliştirilen Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) Yöntemi bu olumsuzlukları minimuma indirmiştir. FEA, bilinen matematiksel hesapların fiziksel şartlara göre ifade edilerek elde edilen karmaşık problemlerin, parçalara ayrıştırılarak kolayca tam sonucun elde edilebildiği çoğunlukla bilgisayar ortamında çözüm aranan simülasyon yöntemidir. Sınır ve uygulama koşullarının doğru seçilmesi ve doğru analiz yöntemleri ile yüksek doğrulukta sonuçlar vermekte, böylelikle de daha az deney ile sonuçlar elde edilerek hem ekonomik hem de daha hızlı sonuçlar elde edilebildiği gibi tasarım aşamasında ön görülemeyen olumsuzlukların giderilmesine de öncülük etmesi ile günümüz bilgisayar çağında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu kadar yaygın kullanım alanına sahip olması ile sürekli iyileştirilen ve gelişen bu yöntem uygulama alanlarına göre de ayrı ayrı özel yazılımlar barındırmaktadır. Deform 3D (Deform Integrated F2F3) yazılımı da FEA yöntemine dayanan, karmaşık metal şekillendirme işlemlerinin üç boyutlu akışını ve endüstriyel şekillendirme işlemlerinde malzeme akışını pratik ve verimli olarak hesaplayabilmek amacıyla tasarlanmış güçlü bir simülasyon programıdır. Endüstriyel uygulamada yirmi yıldan fazla bir süredir doğru ve sağlam olduğunu kanıtlamıştır. Simülasyon motoru, büyük deformasyon malzemesi akışını ve termal davranışı yüksek hassasiyetle tahmin edebilmektedir. (YILDIRIM et al. 2015), (Hasan Kaya 2013)

2. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmanın amacı EKAP işlemi için önemli olan parametrelerden mesh sayısı, sürtünme katsayısı ve sıcaklık parametrelerinin etkilerinin, farklı malzemeler ve kalıplar için incelenmesi ve karşılaştırılmasının yapılarak ileride yapılacak çalışmalar için gerekli ön bilgilerin doğrulanması, önemli olan parametrelerde gerekli iyileştirmelere öncülük etmesidir. Bu kapsamda presleme işlemlerinde ki avantajları göz önünden bulundurularak Deform 3D (Deform Integrated F2F3) yazılımı kullanılmıştır. Simülasyonlar için kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Mesh sayısı belirlenirken yazılımın önerileri dikkate alınmıştır. Yine sıcaklık değerlerinin belirlenmesinde EKAP işlemi sırasında tercih edilen malzemeler için muhtemel çalışma sıcaklığı olan 200 C^{o} ile oda sıcaklığı seçilmiştir. Böylece ısıtmanın etkisinin daha bariz olarak karşılaştırılması hedeflenmiştir. Yine EKAP işlemi esnasında

sürtünmelerin etkisini gözlemleyebilmek amacıyla ideal sayılabilecek olan sürtünmesiz ortam (F_c=0,000001), yağlayıcı kullanımı (F_c=0,1) ve kalıp ile numune sürtünme ortamında (F_c=0,4) olacak şekilde değerler seçilmiş ve karşılaştırılmaların yapılması amaçlanmıştır. Yapılan analizler için seçilen kalıplardan ilki standart kalıp özelliklerine sahip olan Tablo1-a'da gösterilen 120° kavis açılı kalıp diğeri ise rotasyonların uygulanmasında büyük kalaylık sağlayacak şekilde özel olarak tasarlanmış olan Hexa-EKAP kalıbıdır (Tablo 1b). Malzeme olarak ise literatürde EKAP işlemi için elverişli özelliklere sahip ve sıklıkla çalışılmış olan Alüminyum alaşımları tercih edilmiştir. Böylelikle yapılan simülasyonların doğrulanması literatür ile kıyaslanabilecek ve çalışmaların doğruluğu sağlanmış olacaktır.

Tablo 1. Kullanılan Kalıp Çizimleri **(a)** 120° kavis açılı standart EKAP Kalıbı **(b)** Hexa-EKAP Kalıbı



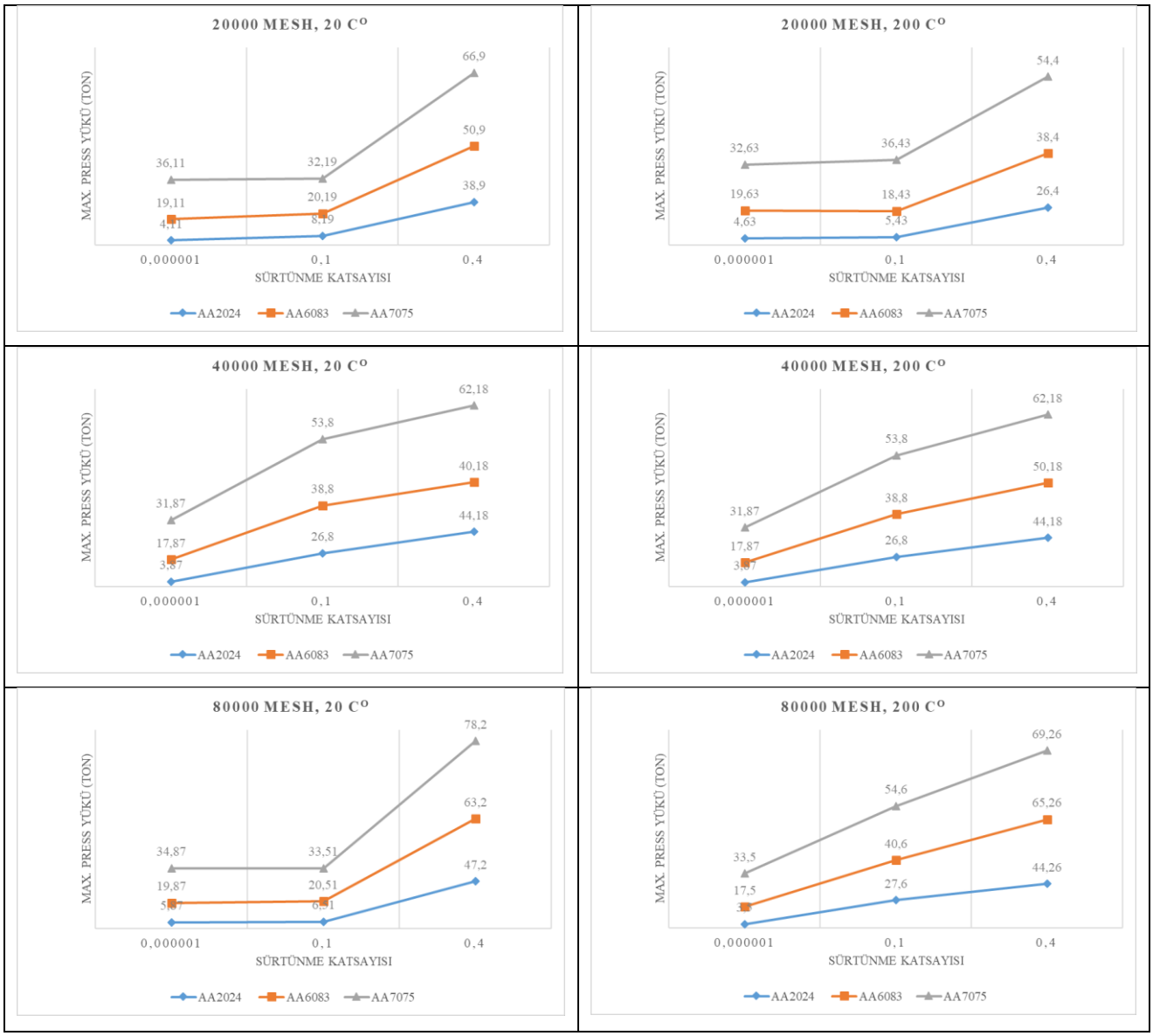
Tablo 2'de verilen parametreler kullanılarak 108 adet simülasyon yapılmıştır. Bu yapılan analizlerin 18 tanesi doğrulama için referans tercih edilmiş ve sonuçları literatürde yapılan çalışmalar ile kıyaslanmıştır. Yapılan analizlerin sonucunda pres yükü ve etkin gerinim değerleri kıyaslama verileri olarak kullanılmıştır.

Tablo 2. Simülasyon Parametreleri

#	Mesh Sayısı	Sıcaklık	Sürtünme Katsayısı	Kalıp	Malzeme
P1	20000	20 C°	0,000001	120° kavis açılı EKAP kalıbı	AA2024
P2	40000	200 C°	0,1	Hexa-EKAP kalıbı	AA6063
P3	80000	---	0,4	---	AA7075

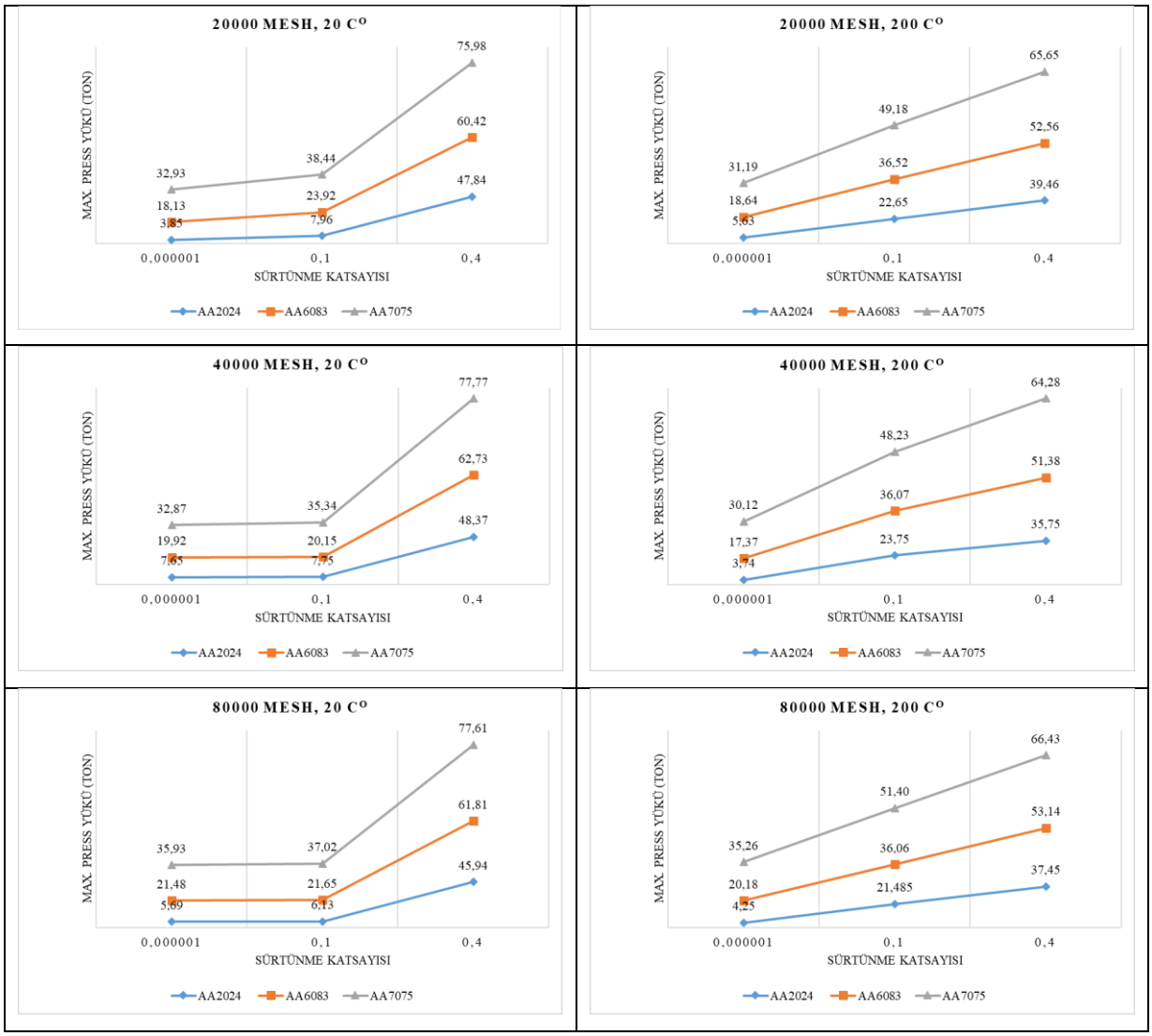
3. SONUÇ

Yapılan bu analizlerden elde edilen veriler ışığında beklenildiği üzere sürtünme katsayısın ve sıcaklığın pres yükünü doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir. Öyle ki; presleme için gerekli maximum yük için, aynı mesh sayısı ve sıcaklıkta yaklaşık 50 ton gibi yüksek bir fark gözlemlenmiştir. Pres yükünü doğrudan etkileyen bir diğer parametrenin ise sıcaklık için ise pres yükünde %70 civarında azalmalar olmuştur. APD deformasyon yöntemlerin doğası gereği malzemeler yeniden kristalleşme sıcaklıklarının üzerinde işlem uygulanmamalıdır. Dolayısıyla yükten kazanımın gerekli olduğu durumlarda uygun yağlayıcılar ve malzemenin işlem öncesinde ısıtılması kaçınılmaz bir sonuç olarak elde edilmiştir. Figür 1'de Max. Pres yükünün farklı malzemeler için, aynı mesh sayısında ve farklı sıcaklıklarda, 120° kavis açılı standart EKAP Kalıbından elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması bulunmaktadır. Figür 2'de ise Hexa-EKAP Kalıbı Max. Pres Yükünün Mesh sayısı ve sıcaklığa bağlı, farklı malzemeler için değişim grafikleri verilişlir. Bu iki figürde yer alan grafikler ve literatür sonuçlarına göre düşük sıcaklıklarda ve yağlayıcı kullanılmayan diğer bir ifade ile sürtünme katsayısı yüksek olan durumlarda daha yüksek pres yüklerine ihtiyaç duyulduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 25 120º kavis açılı standart EKAP Kalıbı Max. Pres Yükünün Mesh sayısı ve sıcaklığa bağlı farklı malzemeler için değişim grafikleri

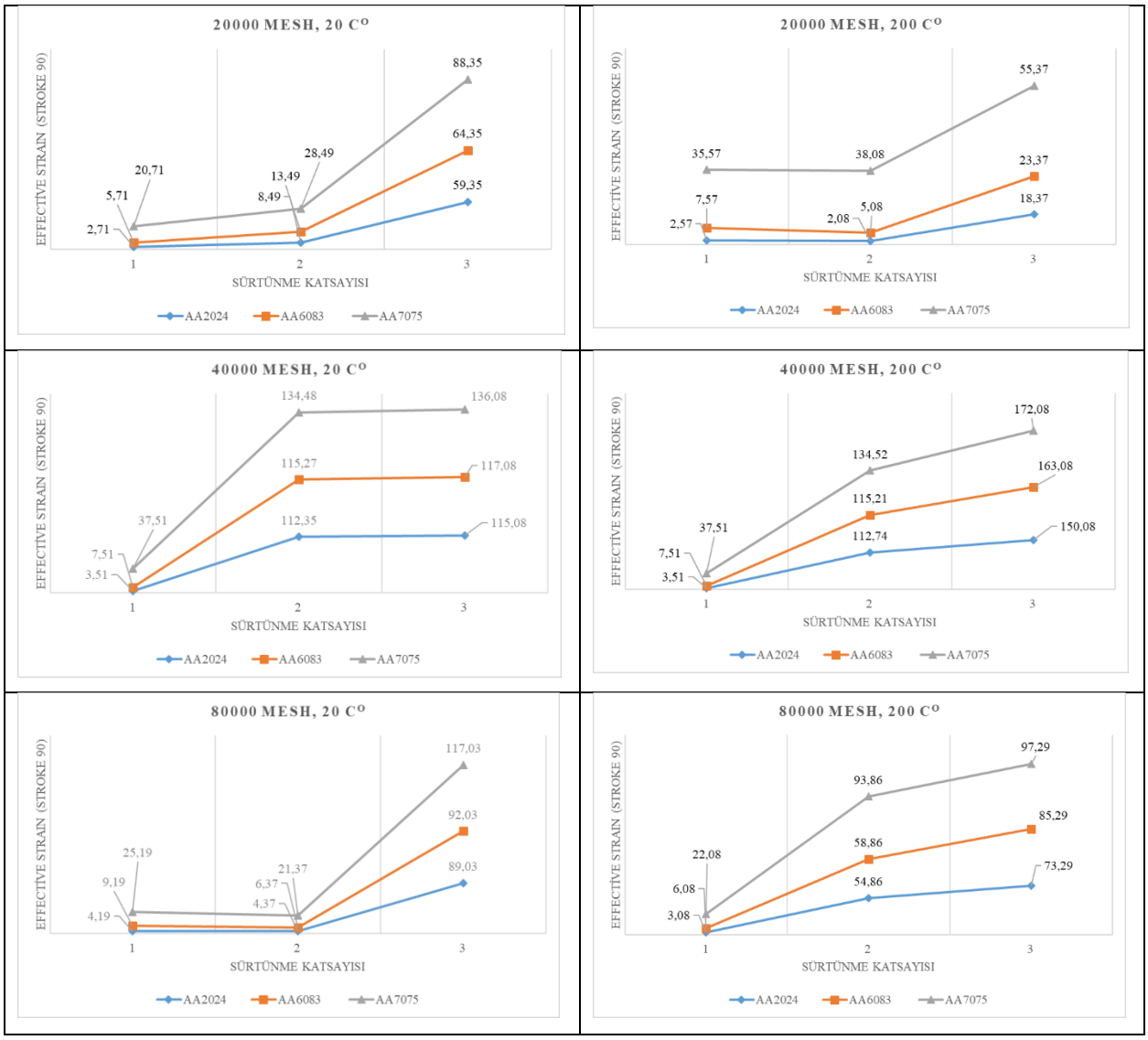
APD yöntemi olarak EKAP işleminin temel sebebi malzemelerin mekanik özelliklerinde iyileştirmeler elde edilebilmesidir. Yapılan analizler sonucunda etkin gerinim eğrisi ile sertlik eğrileri arasında paralellikler olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle bu analizlerde malzeme özelliklerinde ki değişimin karşılaştırılabilmesi amacıyla etkin gerinim değerleri elde edilerek kıyaslanmıştır. Figür 3 ve Figür4'te de görüldüğü gibi sürtünme katsayısının artması ile malzemelerin etkin gerinim değerlerinde her iki kalıp için artış olmuştur. Bunun nedeni ise sürtünme ile uygulanan kuvvetin artması buna bağlı olarak ikincil fazlardaki taneciklerin çökelmeleri ve tane boyutlarının küçülmeleri olarak açıklanabilmektedir. Nitekim APD yönteminin temel amacı olan 100-1000 nm boyutlarda tanecikler elde edilebilmesi için tanecik başına yüksek gerinimler uygulanması gerekmektedir. Uygulanan yük miktarı arttıkça kalıbın kavis açısına da bağlı olarak taneciklere daha fazla gerinim uygulanarak hem tanecikler arasındaki boşluklar azaltılmış olacak hemde küçülen taneciklerde öngörülebilen yönlenmeler elde edilebilecektir. Bu iki durumda malzemelerin özelliklerinde göz ardı edilemeyecek değerlerde iyileşmelere neden olacaktır.



Şekil 26 Hexa-EKAP Kalıbı Max. Pres Yükünün Mesh sayısı ve sıcaklığa bağlı, farklı malzemeler için değişim grafikleri

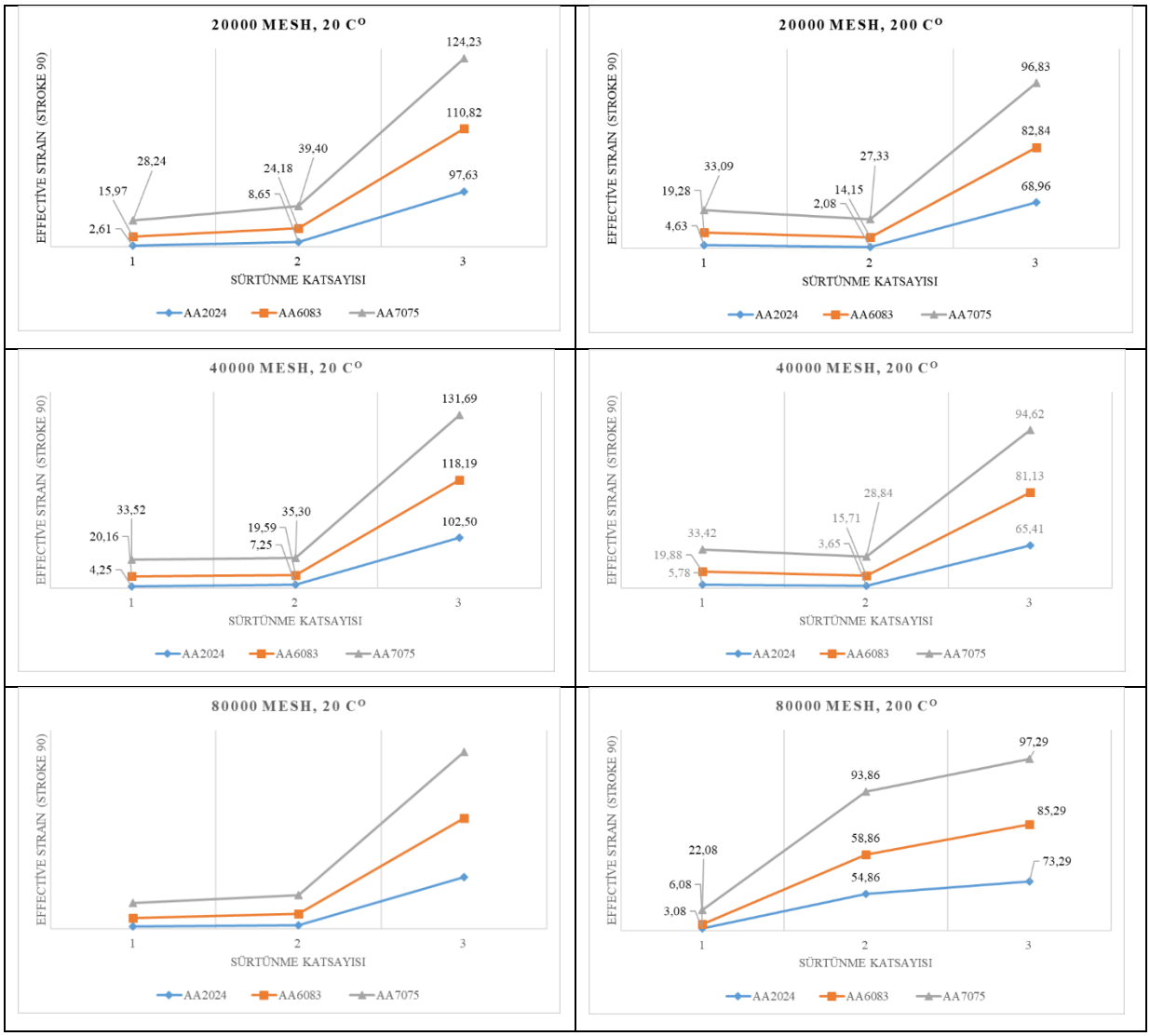
Figür 3 ve Figür 4'te gösterilen her iki kalıp için Etkin Gerinim değerinin mesh sayısı ve sıcaklığa bağlı olarak, farklı malzemeler için değişim grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerden açıkça görülmektedir ki; malzemelerin mekanik özelliklerinde ki artış için kıyas olarak kullanılabilecek olan Etkin Gerinim değerleri Hexa-EKAP kalıbında daha yüksek oranlarda artış göstermiştir. Bunun nedeni ise Hexa-EKAP kalıbının kavis açısının 90 ° olmasıdır. Böylelikle taneciklerin daha fazla yönelmeler sağlanabilmiş ve her bir aşırı küçük taneciğe aynı pres yükü altında daha yüksek değerde gerinimler uygulanabilmiştir.

Mesh sayısının etkisi incelendiğinde ise düşük mesh sayılarında sonuçların birbirine yakın çıktığı gözlemlenmiştir. Bu yakın değerler ise yapılan varsayımlar sonucunda meydana gelen hataların daha yüksek olduğu kanısı uyandırmıştır. Yeterli mesh sayısına ulaşıldığında ise sonuçların daha keskin olarak değiştiği sonucuna varılmıştır. Ancak yine de doğru mesh sayısına ulaştıktan sonra daha yüksek sayılarda mesh atmak sadece zaman kaybına sebep olduğu bazı grafiklerde ki 40000 ile 80000 mesh sayılarında ki artışların yakın olmasından gözlemlenebilmiştir.



Şekil 27 120° kavis açılı standart EKAP Kalıbı için Etkin Gerinim değerinin mesh sayısı ve sıcaklığa bağlı olarak, farklı malzemeler için değişim grafikleri (Grafiklerde yer yatay eksende ki 1,2 ve 3 değerleri P1., P2. ve P3. Parametrini göstermektedir.)

Malzeme olarak kıyaslama yapıldığında ise her malzeme aynı parametreler altında aynı etkiyi göstermiştir. Daha sert olan malzemeler için daha fazla pres yükü gerekli olmuş, fakat mekanik özelliklerindeki kazanımlar hakkında artış olması dışında bağıntı gözlemlenmemiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar doğrultusunda yeni tasarlanacak olan kalıbın etkin çalışma parametreleri daha doğru seçilebilecektir. Böylelikle daha hızlı ve daha az hatayla tasarımlar yapılabilecektir.



Şekil 28 Hexa-EKAP Kalıbı için Etkin Gerinim değerinin mesh sayısı ve sıcaklığa bağlı olarak, farklı malzemeler için değişim grafikleri (Grafiklerde yer yatay eksende ki 1,2 ve 3 değerleri P1., P2. ve P3. Parametrini göstermektedir.)

KAYNAKLAR

Faraji, Ghader, Alireza Babaei, Mahmoud Mosavi Mashadi, and Karen Abrinia. 2012. "Parallel Tubular Channel Angular Pressing (PTCAP) as a New Severe Plastic Deformation Method for Cylindrical Tubes." *Materials Letters* 77(19–20): 82–85. http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2011.06.039.

Hasan Kaya. 2013. "EŞİT KANAL AÇISAL PRESLEME (EKAP) VE YARI KATI İŞLEMLE ÜRETİLEN AA7075 ALAŞIMININ MİKROYAPI, SERTLİK VE YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ." KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ FEN.

Kim, Kyung Jin, and Hyun Deog Cho. 2013. "Characteristics of Plastic Deformation of Commercially Pure Aluminum in Half Channel Angular Extrusion (HCAE)." *Journal of the Korean Society of Precision Engineering* 30(1): 120–27.

Kocich, Radim et al. 2010. "Twist Channel Angular Pressing (TCAP) as a Method for Increasing the Efficiency of SPD." *Materials Science and Engineering A* 527(23): 6386–92.

Kocich, Radim, Adéla Macháčková, and Lenka Kunčická. 2014. "Twist Channel Multi-Angular Pressing (TCMAP) as a New SPD Process: Numerical and Experimental Study." *Materials Science and Engineering A* 612: 445–55.

Lapovok, R. Ye. 2005. "The Role of Back-Pressure in Equal Channel Angular Extrusion." *Journal of Materials*