

Eşit Kanallı Açısal Presleme Yönteminde Kanal Açılarının ve İç Köşe Kavisinin Deformasyona Etkisinin Sonlu Elemanlar Metodu ile İncelenmesi

Erhan BAYSAL¹ ORCID 0000-0002-2767-8722

Oğuz KOÇAR*² ORCID 0000-0002-1928-4301

Nergizhan ANAÇ² ORCID 0000-0001-6738-9741

Ferudun DARICI² ORCID 0000-0003-2036-6387

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Alaplı Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Zonguldak

²Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

Geliş tarihi: 13.07.2023

Kabul tarihi: 29.09.2023

Atıf şekli/ How to cite: BAYSAL, E., KAÇAR, O., ANAÇ, N., DARICI, F., (2023). Eşit Kanallı Açısal Presleme Yönteminde Kanal Açılarının ve İç Köşe Kavisinin Deformasyona Etkisinin Sonlu Elemanlar Metodu ile İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(3), 859-873.

Öz

Aşırı plastik deformasyona maruz bırakılma işlemi, malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla ultra ince tanelerin oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Aşırı plastik deformasyon yöntemlerinden biri olan Eşit Kanallı Açısal Presleme (EKAP) yöntemi de malzeme kesitinde herhangi bir değişiklik olmadan, malzemenin kayma gerilmelerine maruz kalması sonucu mekanik özelliklerin iyileşmesine imkân sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntemle malzemelerin mekanik özelliklerin daha da artması hem işlem parametrelerine ve hem de işlem parametrelerinin optimizasyonuna bağlıdır. Özellikle, malzemenin kanal içerisinden geçişi sırasında kalıp açıları kritik öneme sahiptir. Bu açıları, uygulanacak olan kuvvet ve deformasyon miktarı üzerinde doğrudan etkilidir. Deneysel süreç başlamadan malzemede meydana gelebilecek deformasyonu önceden tahmin etmek sürecin doğru ilerlemesi açısından çok önemlidir. Bu çalışmada tane boyutu üzerinde en etkili parametrelerden olan kanal açısı, dış kavis açısı ve iç köşe kavis değeri dikkate alınmıştır. Kanal açısı (Φ) 90° ve 120° , dış kavis açısı (ψ) 0° ve 20° , iç köşe kavis değerleri ise 0, 2, 4, 6, 8, 10 mm olarak alınmıştır. Kalıp ile numune arasındaki temas şekli, sürtünmesiz olarak kabul edilerek numunenin uğradığı deformasyon miktarı tespit edilmiş ve gerekli olan kuvvet değeri hesaplanmıştır. Elde edilen verilere göre en yüksek gerilme değeri $\Phi=90^\circ$, $\psi=20^\circ$ ve $r=0$ mm olan modelde gözlenmiştir. Kanal açısının artırılması kuvvet değerini azaltırken deformasyon miktarını da düşürmektedir. İç köşe kavis değerinin artması $\Phi=90^\circ$ kanal açısı için gerilme değerlerinde önemli değişiklikler göstermesine rağmen $\Phi=120^\circ$ kanal açısı için kayda değer değişiklikler gözlenmemiştir.

Anahtar Kelimeler: Eşit kanallı açısal presleme (EKAP), Sonlu elemanlar modeli (SEM), Aşırı plastik deformasyon (APD), Mekanik özellikler

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Oğuz KOÇAR, oguz.kocar@yahoo.com.tr

Investigation of the Effect of Channel Angles and Corner Radius on Deformation in Equal Channel Angular Pressing Method by Finite Element Method

Abstract

The process of subjecting to severe plastic deformation enables the formation of ultra-fine grains in order to enhance the mechanical properties of the material. Equal Channel Angular Pressing (ECAP), which is one of the methods of extreme plastic deformation, is a technique that allows the improvement of mechanical properties by subjecting the material to shear stresses without any change in the material cross-section. The improvement of mechanical properties in materials through this method is dependent on both the process parameters and the optimization of these parameters. In particular, the die angles are of critical importance during the passage of the material through the channel. These angles directly influence the applied force and the amount of deformation that will occur. Predicting the deformation that may occur in the material prior to the start of the experimental process is crucial for the proper progression of the process. In this study, the channel angle, outer corner angle, and inner corner radius value, which are among the most influential parameters on grain size, have been taken into account. The channel angle (Φ) has been set to 90° and 120° , the outer corner angle (ψ) to 0° and 20° , and the inner corner radius values to 0, 2, 4, 6, 8, and 10 mm. The contact between the die and the sample is assumed to be frictionless, and the amount of deformation undergone by the sample has been determined, and the required force value has been calculated. According to the obtained data, the highest stress value was observed in the model with $\Phi=90^\circ$, $\psi=20^\circ$, and $r=0$ mm. Increasing the channel angle reduces the force value while also decreasing the amount of deformation. Increasing the inner corner radius value results in significant changes in stress values for the $\Phi=90^\circ$ channel angle, but no significant changes were observed for the $\Phi=120^\circ$ channel angle.

Keywords: Equal channel angular pressing (ECAP), Finite element analysis (FEM), Severe plastic deformation (SPD), Mechanical properties

1. GİRİŞ

Endüstride önemli rol oynayan çelik ve alaşımlarına alternatif olarak Al ve Mg alaşımları gibi performansı yüksek ve ağırlığı azaltacak malzemelere ihtiyaç her geçen gün artmaktadır [1-3]. Hafif malzemelerin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar devam ederken bir yandan da malzeme üretim metodlarının, üretimden sonra uygulanan farklı ısıl işlemlerin ve şekillendirme işlemlerinin malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılabilirliği araştırılmaktadır [4,5].

Hafif metallerde mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde en çok kullanılan yöntemler yaşlandırma ve termomekanik işlemdir. Yaşlandırma ile matris içinde ikincil faz partikülleri tane sınırlarında çökelti oluşturur ve dislokasyon hareketlerini engelleyerek malzemenin mukavemetini artırır [6]. Plastik deformasyon ve yeniden kristalleşmenin kombinasyonu olan

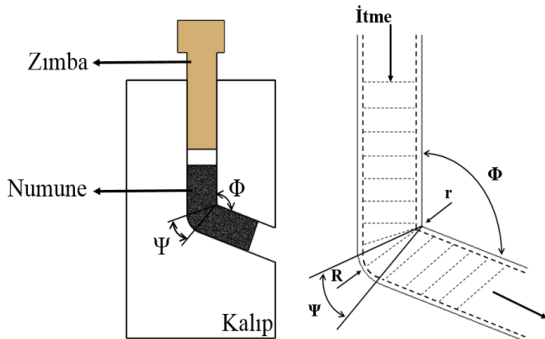
termomekanik işlem ise malzemenin iç yapısında tane boyutunu inceltmek mukavemeti artırmaktadır [7]. Fakat termomekanik işlemler ile $10\ \mu\text{m}$ 'den daha küçük tane boyutları üretilmesi zordur [8]. Bu yöntemler sonunda ulaşılabilecek tane büyüklüğü; uygulanan deformasyon, süneklilik ve malzemenin kesit alanındaki değişiklikler nedeniyle sınırlı seviyede kalmaktadır. Termomekanik işlemler ile tane boyutlarının inceltilmesi sonrasında ısıl işlem uygulanması maliyeti de artırmaktadır. Bu nedenlerle $1\ \mu\text{m}$ altı ultra yapısına ulaşmak için geleneksel yöntemlerin (ekstrüzyon, haddeleme, dövme) dışında yeni proseslerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır [9]. Son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanan "Aşırı Plastik Deformasyon (APD)" yöntemi, malzeme boyutlarında herhangi bir değişiklik oluşturmadan yüksek oranda deformasyon uygulamaya imkân tanımaktadır. APD yöntemleri, sahip olduğu mükemmel tane inceltme kabiliyeti ile ultra ince taneli yapı elde edilmesi, özellikle Al alaşımlarının

mukavemet ve tokluğunun artırılmasında başarılı olması sayesinde büyük ilgi görmüştür [10-15].

APD yöntemlerinden biri olan Eşit Kanallı Açısal Presleme (EKAP) yöntemi, kesit değişikliği olmadan yüksek dayanım ve tokluğa sahip, artırılmış süper plastiklik gibi ultra ince taneli yapıların üretilmesinde etkili bir yöntemdir [16-18]. EKAP işlemi için bir kalıp, itme kuvveti için bir hidrolik pres ve gerektiğinde ısıtıcı bir fırın gereklidir. Hazırlanan numune kalıbın içine yerleştirildikten sonra zımba sayesinde kalıbın diğer tarafına doğru itilir. Numune kalıp kanalındaki açılı bölgeden geçtiğinde, yüksek miktarda kayma gerinmesine maruz kalır. Oluşan bu gerilme, ultra ince taneli bir yapı oluşumuna neden olmaktadır [19-21].

EKAP yönteminin etkilerinin incelenmesi iki farklı başlık altında incelenebilir. Birincisi EKAP yönteminin farklı malzemelerde (titanyum [22-24], alüminyum [25-27], magnezyum [28,29], çelik [30,31], pirinç [32], altın [33], kompozit [34-36]) iç yapıya olan etkisinin incelenmesidir. İkincisi ise EKAP işlem parametrelerinin (kanal açısı (Φ) ve dış kavis açısı (ψ), rota, geçiş sayısı, işlem sıcaklığı, kalıp şekilleri) optimizasyonuna ve tane inceliği üzerine etkilerinin incelenmesidir.

Deformasyon sırasında gerilmenin parça içinde homojen dağılmasını kontrol eden ana parametre, iç ve dış köşe yarıçapları (sırasıyla R ve r) ile tanımlanan Ψ açısıdır. Kanal açısı (Φ ise mekanik davranış ve sertlik değerinin yanı sıra malzemedeki mikroyapısal değişiklikler, malzeme akışı ve gerinim homojenliğinde büyük öneme sahiptir [37].

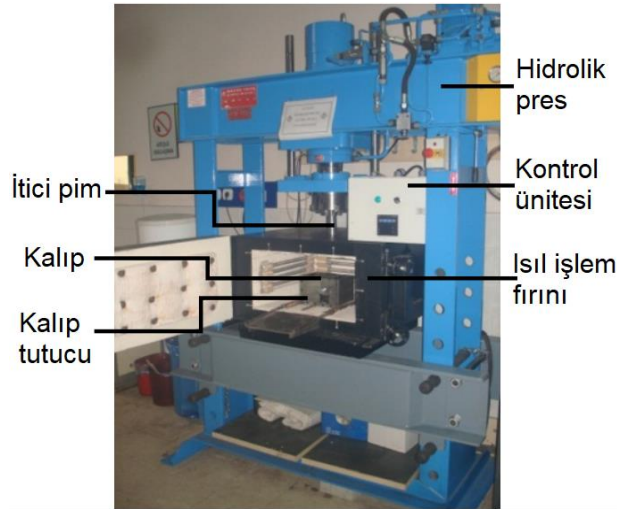


Şekil 1. EKAP şematik gösterimi ve kalıp açıları

Özyürek ve arkadaşları üç farklı kanal açısının (75° , 90° ve 120°) AA7075 deformasyonu sırasında oluşturduğu gerilme değerlerini incelemişlerdir. Sonuç olarak kanal açısı arttıkça gerilmenin azaldığını ve 120° kanal açısına sahip kalıpta deformasyon işlemi sırasında kalıp dirsek kısmında boşluk oluştuğunu belirtmişlerdir [38]. Fadhil ve arkadaşları, deformasyon davranışı ve gerinim dağılımının kalıp geometrisi ve işleme parametrelerinden etkilendiğini belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, kalıp iç köşe (0, 3, 4, 5 ve 8 mm) ve dış köşe (0, 10, 12, 14, 15 ve 20 mm) kavislerini değiştirmişlerdir. İç ve dış köşe kavis arttıkça ortalama maksimum gerilme ve gerinim önemli ölçüde azalmıştır. Sonlu elemanlar modeli ile alınan sonuçlar A356 alüminyum alaşımı malzeme için maksimum gerilme/ gerinme ve eşdeğer gerilme/gerinme için en iyi kalıp kavis değerlerinin $r=4$ mm, $R=12$ mm olduğu belirtilmiştir [39]. Diğer bir çalışmada $\Phi=90^\circ$ ve $\psi=10^\circ$ olmak üzere sürtünme katsayılarının (0, 0.05, 0.075 ve 0.1) etkileri Von-Mises akma kriterine göre değerlendirilmiştir. Deneysel ve sonlu elemanlar metoduyla elde edilen kuvvet-yol ile maksimum yük sonuçları karşılaştırılmış ve uyumlu oldukları belirlenmiştir. Sürtünme kuvvetinin artmasıyla malzemeyi kalıp içinde ittirmek için gerekli kuvvetin arttığı ve aralarında iyi bir korelasyon olduğunu tespit edilmiştir [40]. Kapoor ve arkadaşları, AZ61 Mg alaşımı için sonlu elemanlar metodu kullanarak EKAP işlem ve kalıp tasarım parametrelerini incelemişlerdir. Kanal açısı ve köşe kavisini literatürde tavsiye edilen $\Phi=90^\circ$ ve $\psi=20^\circ$ olarak almış ve tek geçiş sayısı kullanmışlardır. İşlem sırasındaki gerekli kuvvet, gerinim ve sıcaklık değerleri elde edilmiştir. En düşük kanal açısı, malzeme üzerinde en yüksek sıcaklık etkisini ve deformasyon bölgesinde en yüksek gerilme/gerinimi oluşturmuştur. Ayrıca kanal açısı ve köşe kavis arttıkça kayma gerilmesinin azaldığı belirtilmiştir [41]. Samsudin ve arkadaşları, AZ80 Mg alaşımında kanal açısının gerinim dağılımına etkisini incelemişlerdir. Bunun için $\Phi=90^\circ$ ve dış kanal kavis 8 mm, iç kanal kavis 4 mm ve $\Phi=120^\circ$ dış kanal kavis 11 mm, iç kanal kavis 7 mm olarak kalıbı tasarlamışlardır. Kanal açısı 90° olduğunda gerilmenin daha yüksek olduğu ve her iki kanal açısı içinde köşe kavis büyüdükçe gerilme/gerinimin azaldığı belirtilmiştir [42]. Bir

diğer çalışmada ise üç farklı kanal açısı (90°, 110° ve 120°), dış/iç kalıp kavisi 16/4 mm ve farklı hidrostatik basınç değerleri altında gerinme değerleri incelenmiştir [43].

Literatür çalışmaları değerlendirildiğinde, EKAP yönteminde işlem parametrelerinin etkisinin gerilme/gerinme, sıcaklık, deformasyon ve kuvvet üzerindeki etkilerinin çoğunlukla sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelendiği belirlenmiştir. Plastik deformasyona etkileri sebebiyle iç ve dış kavis açıları aynı kombinasyonla farklı oranlarda alınarak sonlu elemanlar metodu incelemesi yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada EKAP işleminde kalıp içerisinde malzeme akışını en çok etkileyen kanal açısı (90° ve 120°), dış kavis açısı (0° ve 20°) ve iç kavis değerleri (0-2-4-6-8-10 mm) değiştirilerek etkileri incelenmiştir. Gerilme, kuvvet-yol değerleri ve belli noktalarda tanımlanan plastik deformasyon değerleri karşılaştırılarak genel bir değerlendirme yapılmıştır.



2. MATERYAL VE METOT

2.1. Eşit Kanallı Açısal Presleme (EKAP)

Yöntem, esas olarak malzemenin kanal içerisinde ilerlemesi prensibine dayanır. Zımba tarafından itilen malzeme, kalıbın köşe noktasında yoğun bir plastik deformasyona uğratılır. Yoğun plastik deformasyon neticesinde malzeme içyapısında tane boyutları küçülür ve mekanik özelliklerde iyileşme elde edilir.

2.1.1. Deney Ekipmanları

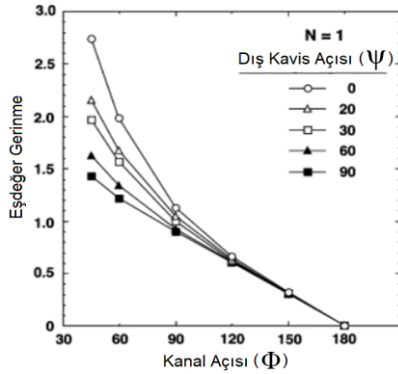
İşlem ekipmanları; zımbanın kanal içerisinde hareketini sağlayan bir pres, gerekli itmeyi sağlayan itici uç, EKAP kalıbı ve işlemin oda sıcaklığından farklı bir sıcaklıkta gerçekleşmesi halinde kalıbı ısıtan bir fırın ya da fişek rezistanslardan oluşur (Şekil 2).



Şekil 2. EKAP deney düzeneği [44,45]

Malzemede etkili bir tane inceltme için EKAP parametrelerinin seçimi oldukça önemlidir. Bu parametreler kanal açısı, dış kavis açısı, sıcaklık, geçiş sayısı, presleme hızı ve uygulanan rotasyondur. Kanal açılarına bağlı olarak yapılan çalışmalarda keskin kanal köşelerinin malzemede ölü bölgenin artmasına yol açtığı belirtilmiştir [46]. Bu sebeple kalıp modelleri oluşturulurken kanal

açısı ve dış kavis açısının kombinasyonu önemlidir. Şekil 3'te kanal ve dış kavis açısına bağlı olarak oluşan gerinme değerleri görülmektedir. Bu grafiğe göre kanal ve kavis açısının malzeme üzerinde oluşan gerinme ve dolayısıyla malzeme içyapısında tane incelmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır.



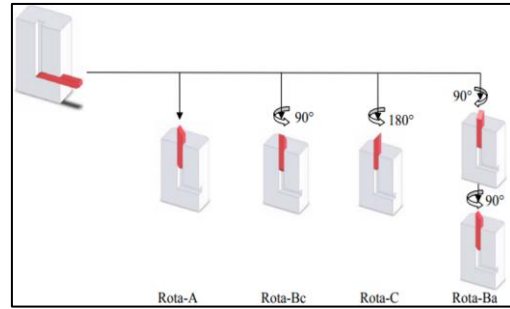
Şekil 3. Kalıp açılına bağlı eşdeğer gerinim grafiği

EKAP işlem sıcaklığı malzemenin süneklik ve kırılabilirlik özelliklerine göre belirlenmektedir. Sıcaklık artmasıyla malzemede yeniden kristalleşme ile tane büyümesi meydana geldiğinden oda sıcaklığında yapılan işleme göre mekanik özelliklerde düşme eğilimi görülür [47]. Geçiş sayısına bağlı olarak uygulanan plastik deformasyonun artışı ile birlikte daha iyi mekanik özellikler elde edilmektedir. Özellikle 1, 4 ve 8 geçiş sayılarında en yüksek akma ve çekme değerleri elde edilen çalışmalar bulunmaktadır [48-50].

Presleme hızına bağlı meydana gelen deformasyon şekilleri incelendiğinde presleme hızına bağlı önemli bir gelişmenin olmadığı fakat düşük presleme hızlarında daha dengeli tane yapısı elde edildiği ortaya konmuştur [51].

Uygulanan rotasyona bağlı tane boyutunda meydana gelen değişimler önemlidir. Genel olarak 4 rota üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır (Şekil 4). Fakat bu rotaların kombine edildiği farklı rota çalışmaları da bulunmaktadır [11,52]. Bu rotalardan A rotası için numune ilk geçişten sonra döndürülmeden diğer geçişlerini tamamlar. B_C rotasında ilk geçişten sonra numune her geçişte aynı

yönde 90° döndürülmektedir. C rotasında ilk geçişten sonra numune her geçişte 180° döndürülmektedir. B_A rotasında ise ilk geçişten sonra numune 90° döndürülür ve takip eden her geçişte bir önceki yön doğrultusuna ters olacak şekilde 90° döndürülerek geçiş sayısı tamamlanır. B_C rotası ortalama tane boyutu olarak en iyi değerleri sağlamaktadır ve yapılan çalışmalar B_C rotası üzerinde yoğunlaşmıştır [53].



Şekil 4. EKAP rotaları

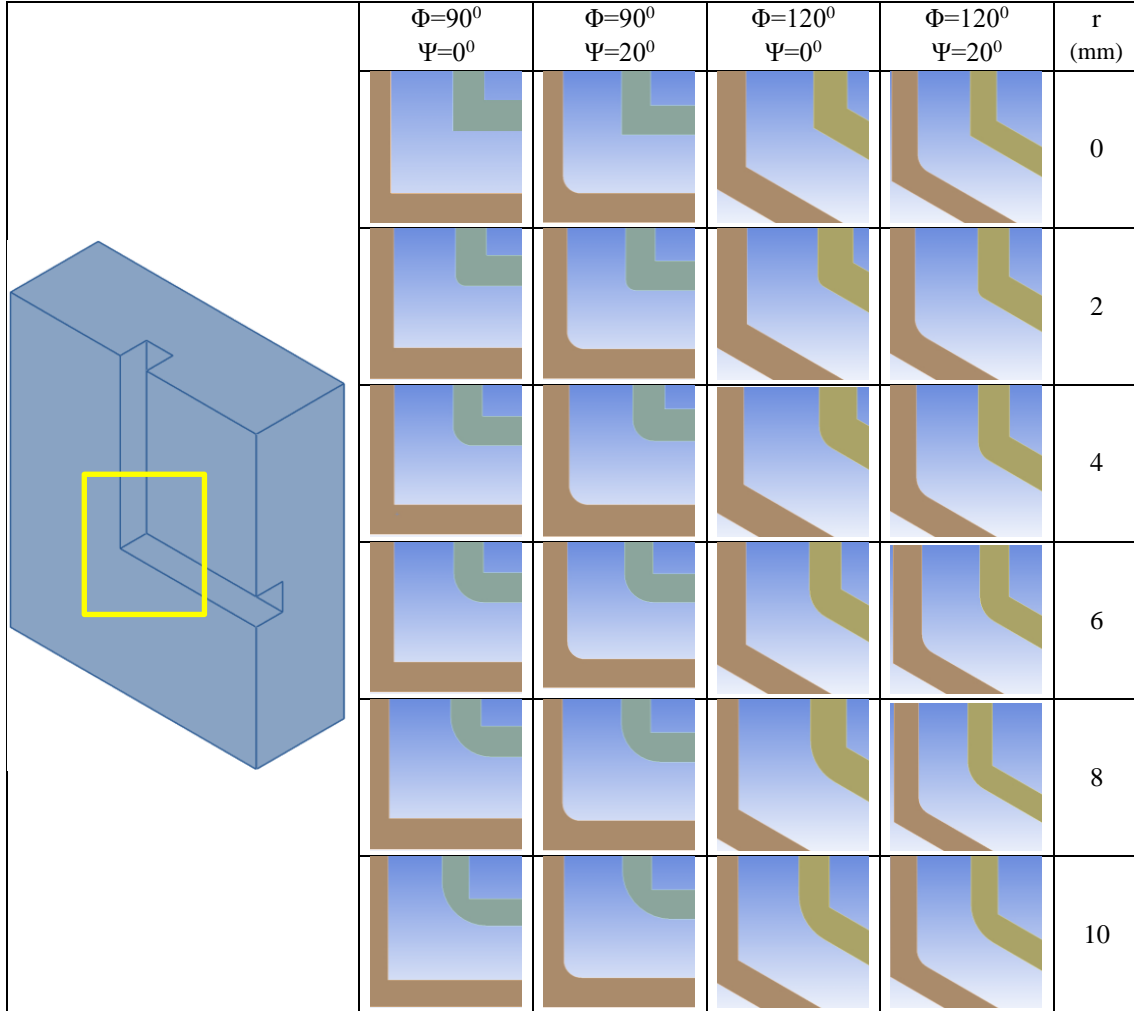
Bu parametrelerin belirlenmesi deneme yoluyla yapılmaktadır. Bu durum maliyetin artmasına neden olmaktadır. Bu yüzden malzemeye göre işlem parametrelerinin optimizasyonu ve sürecin doğasının anlaşılması için ayrıntılı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

2.2. Malzeme ve Kalıp Geometrisi

Çalışmada ANSYS malzeme kütüphanesinden kalıp malzemesi olarak çelik ve numune malzemesi olarak bakır alaşımı seçilmiştir. Malzeme özellikleri Çizelge 1'de belirtilmiştir. Numune boyutu 12x12x70 mm'dir. Analiz için kullanılan kalıp modelleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Dış kavis açısı tüm modellerde $\Psi=0^\circ$ ve $\Psi=20^\circ$ olarak belirlenmiş kanal açıları ise iki farklı değer olarak $\Phi=90^\circ$ ve $\Phi=120^\circ$ seçilmiştir. İki ayrı model için sadece iç köşe kavis (r) değeri değiştirilmiş ve bu değerler 0, 2, 4, 6, 8, 10 mm olarak alınmıştır.

Çizelge 1. Numune ve kalıp malzemesinin özellikleri

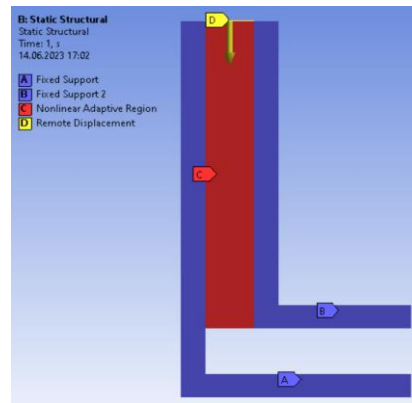
Malzeme	Elastisite modülü (GPa)	Akma mukavemeti (MPa)	Çekme mukavemeti (MPa)	Poisson oranı
Bakır Alaşımı	110	280	430	0,34
Çelik	200	250	460	0,30



Şekil 5. Kanal açılarının gösterimi

2.3. Sonlu Elemanlar Modeli

Bu çalışmada ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. İşlem süresini azaltmak ve hesapların hassasiyeti için kalıp modelleri 2 boyutlu olarak oluşturulmuştur. Kalıp malzemesi, numuneden daha az deformasyona uğradığı için kalıp rijit gövde olarak modellenmiştir. Bu nedenle kalıbın gerilme değerleri analiz edilmemiştir. Numunenin üst tarafından deplasman uygulanmıştır. Numune ile kalıp arasında sürtünmesiz temas şekli tercih edilmiştir. Şekil 6'da analiz için belirlenen sınır şartlarını gösteren örnek model verilmiştir.



Şekil 6. Örnek model

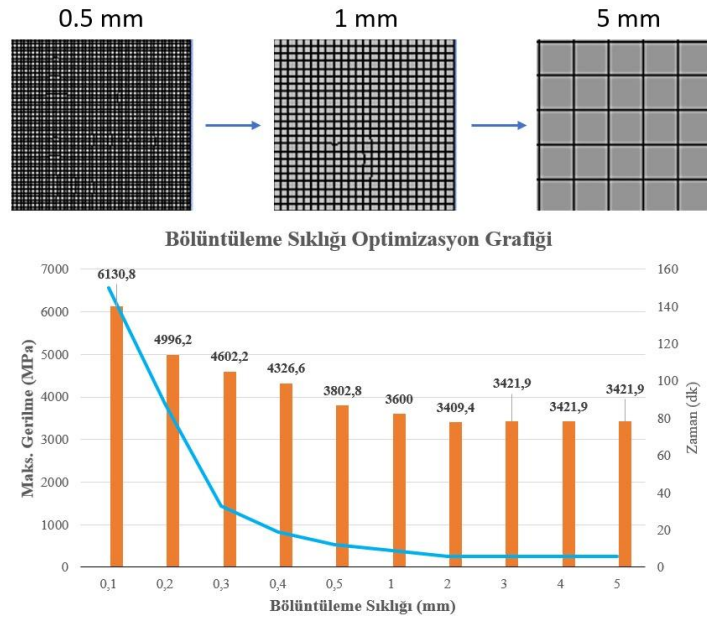
Sonlu elemanlar modelinde yapılan kabullerde numune kalıp sürtünmesi yağlayıcı kullanılmasından dolayı sıfır kabul edilmiştir. Üst taraftan zımba itme uygulayacağı için malzeme üst yüzeyi itme noktası olarak alınmıştır. Verilen deplasman değerli numune boyuna göre ve numunenin köşeden dönerek yatay düzlemde ilerleyebilecek şekilde belirlenmiştir.

2. TARTIŞMA VE SONUÇ

2.1. Sonlu Elemanlar Metodu Bölüntüleme Sayısının Optimizasyonu

Analizler sırasında numune malzemesine uygulanan bölüntüleme sıklığı çözümü etkilemektedir. Bu sebeple, farklı bölüntüleme büyüklüklerinin sonuca etkileri incelenerek bölüntüleme sıklığının optimizasyonu yapılmalıdır.

Yapılan optimizasyonda 0.1-5 mm bölüntüleme sıklıkları ile analizler gerçekleştirilmiş ve Şekil 7'de bölüntüleme sıklığının, gerilme ve analiz çözdürme süresi üzerindeki etkisi verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde özellikle 1 mm ve üzerindeki bölüntüleme sıklıklarında gerilme değerinin fazla değişmediği, 0.1-0.5 mm aralığında ise devamlı azaldığı belirlenmiştir. Özellikle 0.1 mm bölüntüleme aralığından 0.2 mm bölüntüleme aralığına geçildiğinde gerilme değerinde hızlı bir düşüş olmuştur. Bununla beraber bölüntüleme sıklığı azalırken analiz süreleri artmaktadır. 0.3 mm bölüntüleme sıklığından 0.2 mm bölüntüleme sıklığına geçiş ile analiz süresinin yaklaşık 3 katına ve 0.1 mm bölüntüleme sıklığına göre ise analiz süresinin beş katına çıktığı görülmüştür. Bütün değerlendirmeler dikkate alındığında bu çalışmada yapılan EKAP işleminde bölüntüleme sıklığı değeri 0.3 mm olarak kullanılmıştır.

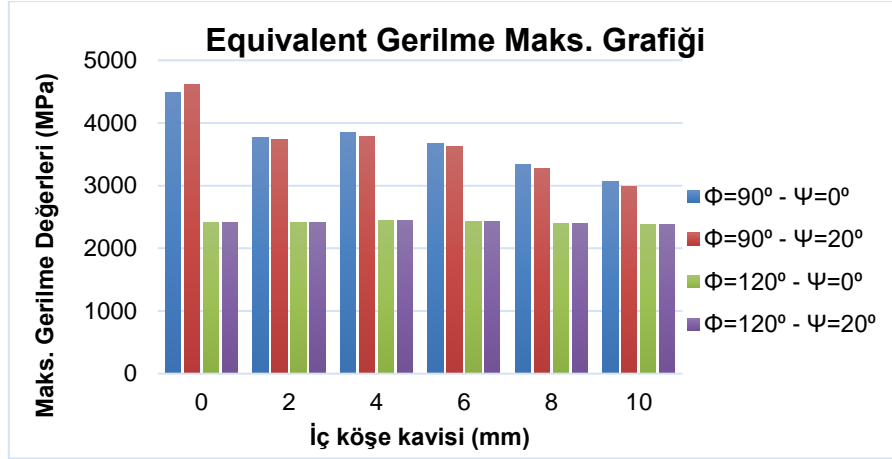


Şekil 7. Bölüntüleme sıklığının optimizasyonu

3.2. Gerilmenin Değerlendirmesi

Kanal açlarına bağlı olarak değişen maksimum gerilme değerleri Şekil 8'de verilmiştir. Kanal açısı 90° olan modelde iç kanal kavisi arttıkça gerilme değerleri düşme eğilimi göstermektedir. İç kanal kavisinin sıfır olduğu modelde maksimum gerilme

değeri elde edilirken dış köşe kavisinin değişmesi gerilme değerlerini fazla etkilememiştir. Kanal açısı 120° olan modelde ise iç kanal ve dış köşe kavisinin gerilmeye kayda değer bir etkisi görülmemiştir. Kanal açısı 90°'den 120°'ye artırıldığında ise gerilme değerlerinde önemli düşüşlerin meydana geldiği belirlenmiştir.



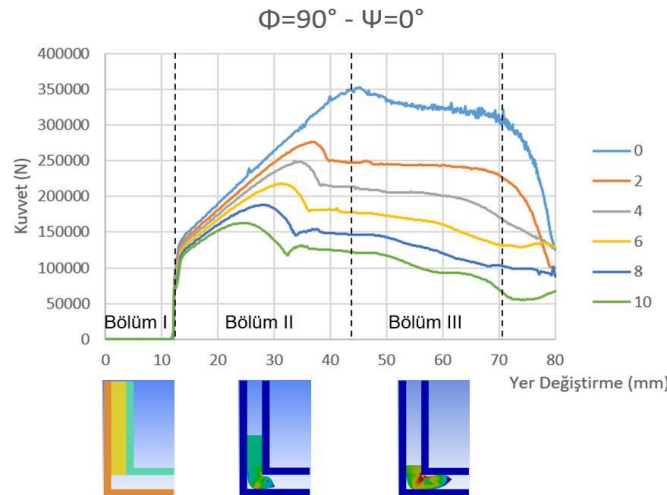
Şekil 8. Kanal açılara bağlı maksimum gerilme değerleri

3.3 Yol-kuvvet grafikleri

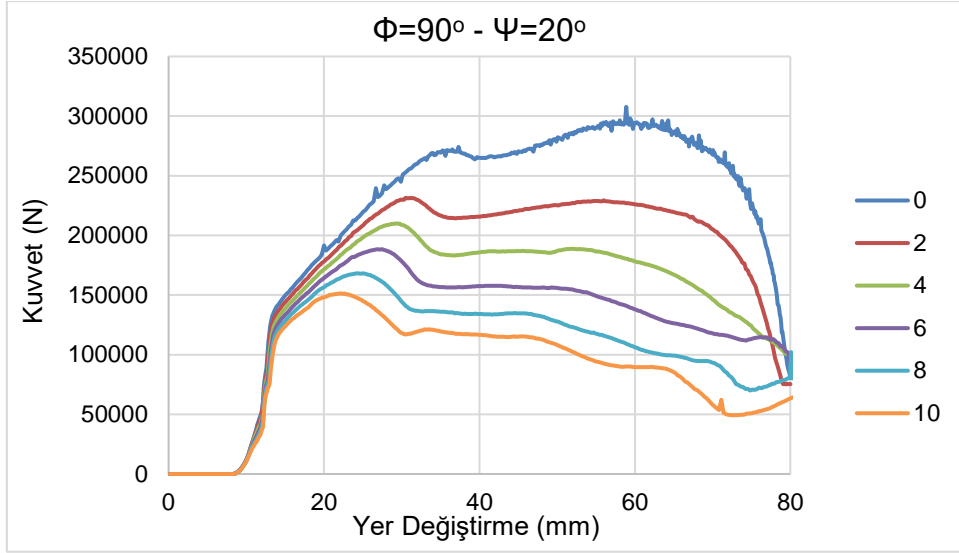
EKAP işlemi için uygun olan hidrolik pres seçimi için parçanın kalıptan geçirilmesinde gerekli olan kuvvetin bilinmesi gerekir. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak malzemeyi kalıptan geçirmek için gerekli olan kuvveti bulmak mümkündür. İç köşe kavisine bağlı olarak kuvvet değerinin değişimi Şekil 9'da gösterilmiştir. Bölüm 1'de malzeme köşe noktasına kadar herhangi bir engelle karşılaşmayacağı için kuvvet değerinde değişim görülmemektedir. Bölüm 2'de ise kalıp köşesiyle ilk temas gerçekleşmektedir. Malzeme kanal köşesini dönmekte zorlanırken geçişi sağlamak için

kuvvet değerinin artması gerekmektedir. Bölüm 3'te ise malzemenin yarısından fazlası kanal köşesini geçmiş ve kalan kısım için gerekli kuvvetin zamanla azaldığı görülmektedir. Kanal açısı 90°, dış kavis açısı ve iç köşe kavisini sıfır olduğunda gerekli itme kuvveti 352210 N olurken iç köşe kavis değerinin 10 mm'ye kadar artırılması gerekli itme kuvvetini 162900 N seviyelerine düşmüştür.

Şekil 10'da ise kanal açısı 90° ve dış kavis açısı 20° olduğundaki gerekli kuvvet değerleri verilmektedir. İç kavis sıfır olduğunda gerekli itme kuvveti 307700 N seviyelerini görürken iç kavis değeri artırıldıkça kuvvet değeri düşmektedir.



Şekil 9. Φ=900 - Ψ=00 olan kalıp modeline ait kuvvet-yol grafiği

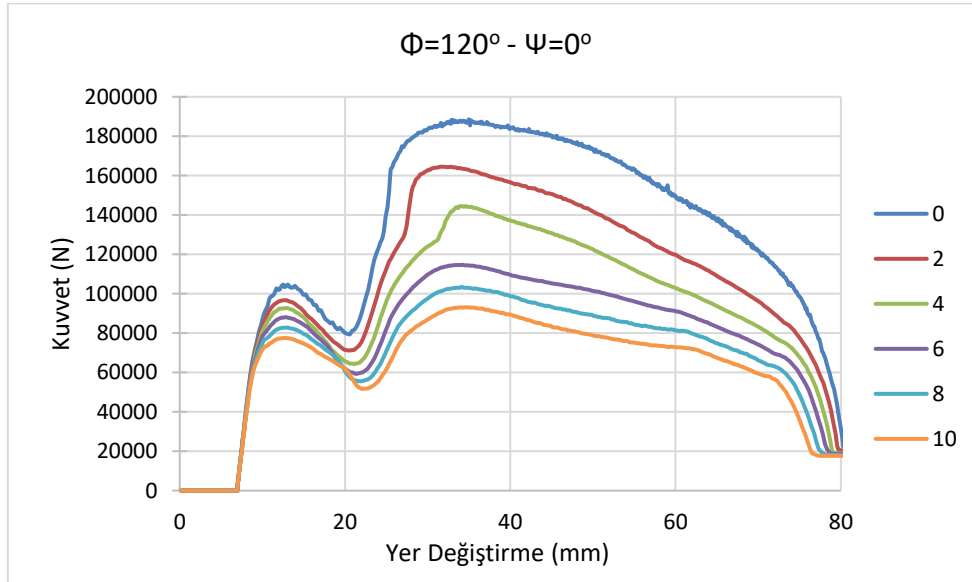


Şekil 10. $\Phi=90^\circ - \Psi=20^\circ$ olan kalıp modeline ait kuvvet-yol grafiği

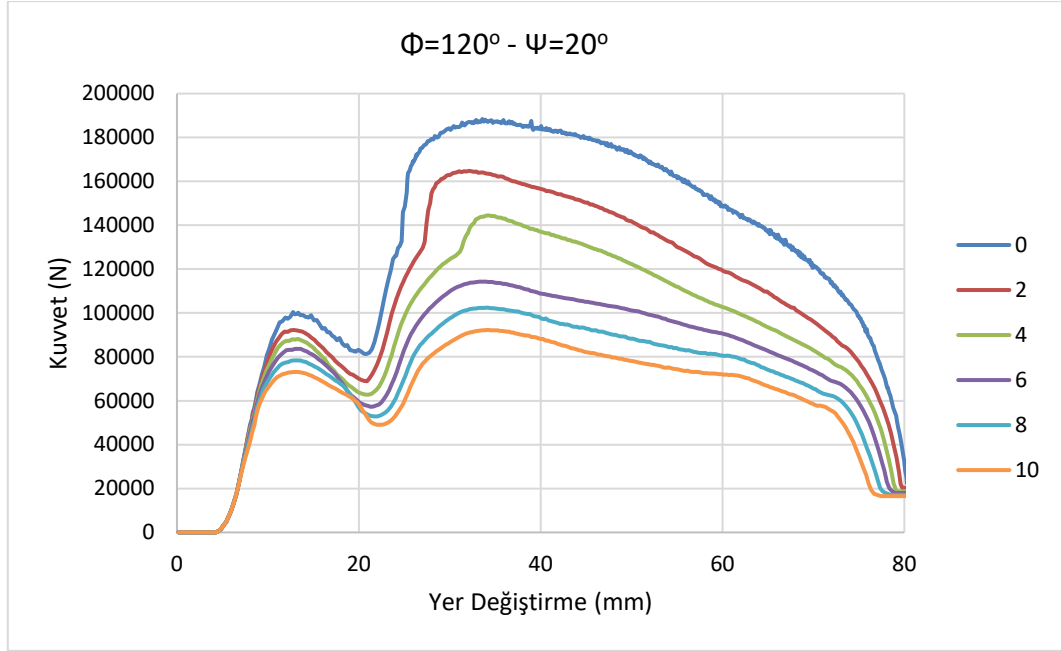
Şekil 11’de ise 120° kanal açısına sahip dış kavis açısı sıfır olan modelde gerekli itme kuvvet değerinin iç kavis değerine göre değişimi verilmiştir. İç kavis değeri arttıkça gerekli itme kuvveti ihtiyacı azalmaktadır. Burada ise kanal açısının artması sonucu numunenin köşe noktasını daha rahat döndüğü anlaşılmaktadır. Çünkü burada

gerekli itme kuvveti 200000 N seviyelerinin altında kalmaktadır.

Şekil 12’de dış kavis açısı 20° olduğunda ise iç kavisin değişimine bağlı itme kuvveti değerlerinde yine bir düşüş gözlenmiştir fakat dış kavis açısına bağlı olarak kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir.



Şekil 11. $\Phi=120^\circ - \Psi=0^\circ$ olan kalıp modeline ait kuvvet-yol grafiği



Şekil 12. $\Phi=120^\circ - \Psi=20^\circ$ olan kalıp modeline ait kuvvet-yol grafiği

Verilen modeller arasında maksimum kuvvet değerleri ayrıca Çizelge 2'de verilmiştir. Kanal açısının 90° dış kavis açısı 0° olan tasarım en fazla kuvvet gerektiren modeli ifade ederken dış kavis açısının artması gerekli kuvvet değerini 44510 N düşürmektedir. Kanal açısının 90° yerine 120° olarak seçilmesi gerekli kuvvet değerini yaklaşık yarı yarıya düşürmektedir. Kanal açısı 120° olan modelde kavis açısının artması ise gerekli kuvvet değerinde önemli bir azalma sağlamamıştır.

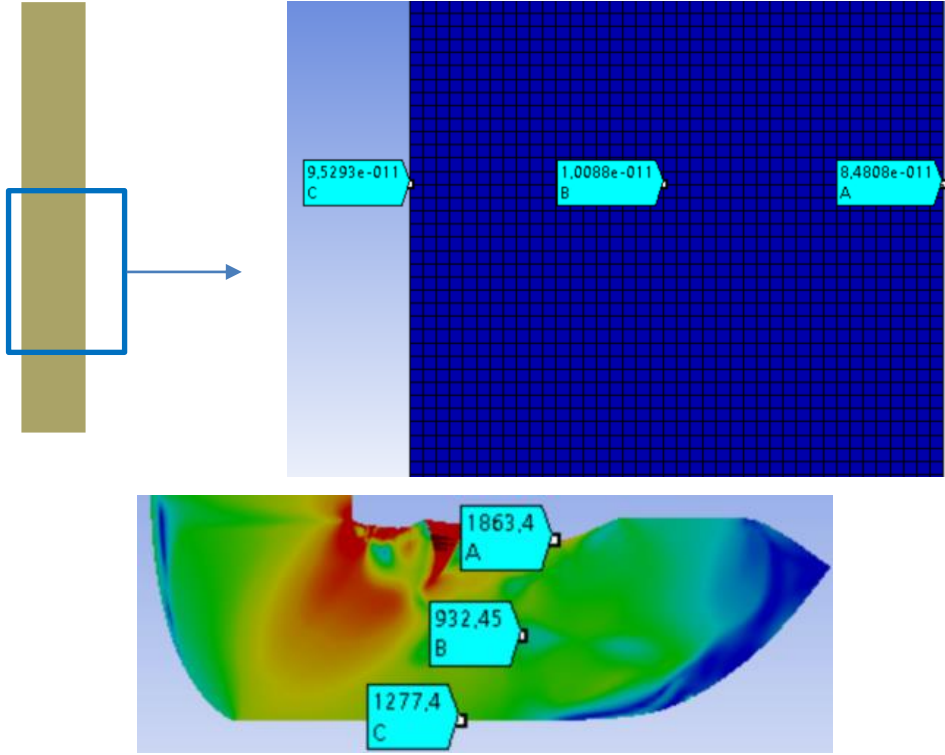
Çizelge 2. Modellere göre maksimum kuvvet değerleri

Kanal Açıları	Kuvvet Değerleri (N)
$\Phi=90^\circ - \Psi=0^\circ$	352210
$\Phi=90^\circ - \Psi=20^\circ$	307700
$\Phi=120^\circ - \Psi=0^\circ$	188600
$\Phi=120^\circ - \Psi=20^\circ$	188330

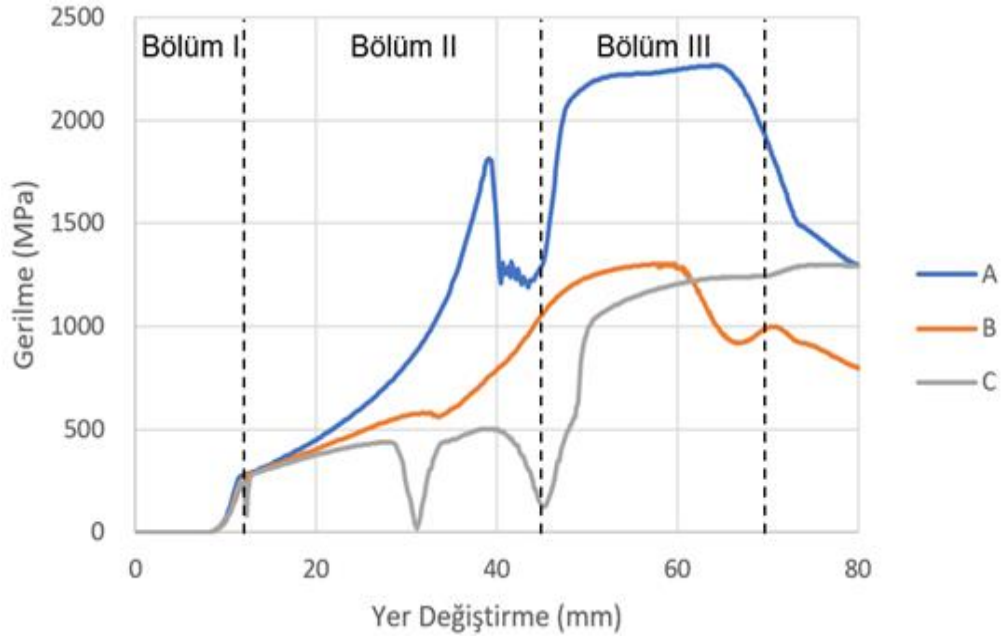
3.4. Noktasal Gerilme

Noktasal gerilme değerlerini belirlemek için gerilme değerinin en fazla olduğu $\Phi=90^\circ, \psi=20^\circ$ ve $r=0$ mm modeli seçilmiştir. Şekil 13'te belirtildiği gibi başlangıçta belirlenen A, B, C noktaları numunenin henüz işlem başlangıcında 0.1 sn sürede gösterdiği gerilme değerleridir. Plastik deformasyon esnasında A ve C noktalarında gerilme değerlerinin farklı olduğu gözükmemektedir. Bu durum aslında numunenin kenar bölgelerinde bir deformasyon farkı olduğunu ispatlamaktadır. EKAP işlemlerinde plastik deformasyonun daha homojen dağılımı için işlem parametrelerinden biri olan rotasyonun kullanılması gerekmektedir.

Şekil 14'te ise A, B ve C noktaları için toplam yer değiştirmeye bağlı gerilme değerleri verilmiştir. Grafikte A noktası en fazla gerilmeye maruz kalırken B noktası en az gerilme değeri gösteren nokta olarak belirlenmiştir.



Şekil 13. $\Phi=900$, $\psi=200$ ve $r=0$ mm modeli için noktasal gerilme değerlerinin gösterimi



Şekil 14. A, B ve C noktaları için gerilme - yer değişirme grafiği

Şekil 14'te gösterilen Bölüm 1'de numune kanal içerisinde dönme noktasına ilerlemekte ve 10 mm ilerlemeden sonra belirtilen noktalar için gerilme değerleri artmaya başlamaktadır. Bölüm 2'de ise A noktası kanal köşesine yaklaşmakta ve numune köşe noktasını dönmeye başlamıştır. Bölüm 2'nin sonuna doğru gerilme değerinde belirgin değişim olmaması köşe açısını döndüğü kısmı ifade eder. Bölüm 3'te artık A noktası köşe açısını dönmüş ve gerilme maksimum değerine ulaşmıştır.

B noktası konumu itibariyle orta noktada bulunmasından dolayı gerilme artışı daha düzgün bir eğri çizmiştir. 30 mm ile 60 mm arası B noktası köşe dönüşünü tamamlamıştır.

C noktası 50 mm'ye kadar dikey kanal yoluna malzemenin akması gerçekleştiğinden belli bölümlerde kalıp yüzeyine temas gerçekleşmemiş ve gerilme değeri sifıra kadar düşmüştür. 50 mm'den sonra köşe noktasını dönmeyi tamamlamış ve gerilme değeri kanal çıkışına kadar C noktasında artış göstermiştir.

4. SONUÇLAR

Yapılan çalışmada EKAP işleminde malzemede ince taneli yapı oluşunda önemli rol oynayan kanal açısı (90° ve 120°), dış kavis açısı (0° ve 20°) ve iç köşe kavisinin (0, 2, 4, 6, 8, 10 mm) etkileri incelenmiştir. EKAP işleminde en yüksek deformasyon kanal açısı 90°, dış kavis açısı 20° ve iç kavis 0 mm olan kalıpta elde edilmiştir. İtme kuvvetine göre değerlendirildiğinde kanal açısı 90°, dış kavis açısı 0° ve iç kavis 0 mm olan kalıptan malzemenin geçirilmesi için yaklaşık en az 35 ton (352210 N), kanal açısı 90°, dış kavis açısı 0° ve iç kavis 10 mm olan kalıpta ise yaklaşık 16 ton (162900 N) hidrolik prese gerek vardır.

Kanal açısı 90° yerine 120° alındığında kanal içerisinde malzeme akışı kolaylaştığı için itme kuvveti ve malzemede oluşan deformasyon azalmıştır. Kanal açısı 120° olduğunda dış kavis açısının ve iç kavis değerinin gerilme üzerinde etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Kanal açısı 90° olduğunda ise iç kavis değerinin artmasıyla birlikte malzeme üzerinde oluşan gerilme değeri önemli ölçüde azalmıştır. Malzemenin üç farklı

noktasındaki gerilme değişimleri incelendiğinde EKAP işlemi boyunca farklı deformasyonlara maruz kaldıkları belirlenmiştir. Malzemenin iç yapısında daha homojen bir tane yapısı için birden fazla geçiş sayısı yapılmalıdır.

Sonraki çalışmalarda kalıp, numune ve zımba arasındaki farklı sürtünme senaryoları da hesaba hesaplanarak sonlu elemanlar çözümleri yapılabilir.

5. KAYNAKLAR

1. Skiba, J., Kossakowska, J., Kulczyk, M., Pachla, W., Przybysz, S., Smalc-Koziorowska, J., Przybysz, M., 2020. The Impact of Severe Plastic Deformations Obtained By Hydrostatic Extrusion on the Machinability of Ultrafine-Grained AA5083 Alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 58, 1232-1240.
2. Mishra, B., Mohapatra, S.K., Ranjan, V., Maity, K., 2020. Equal Channel Angular Pressing of The Aluminium Alloy: A Numerical Investigation. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2173-2178.
3. Verlinden, B., 2018. Severe Plastic Deformation of Metals. *Metallurgical and Materials Engineering. The Netherlands Press, Amsterdam*, 166.
4. Mirzakhani, B., Payandeh, Y., 2015. Combination of Severe Plastic Deformation and Precipitation Hardening Processes Affecting The Mechanical Properties in Al-Mg-Si alloy. *Materials & Design*, 68, 127-133.
5. Mohapatra, S.K., Mishra, S.B., Joshi, K.K., Pradhan, S., 2019. Effect of the Hot Deformation on Mechanical and Wear Characteristics of the P/M AMC. *Materials Today. Proceedings*, 18, 5040-5047.
6. Demir, M., Tekin, O., Demir, A., 2020. T6 Yaşlandırma Isıl İşlemi Uygulanan Ekstrude AA 7075 Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Davranışları. *Academic Perspective Procedia*, 3, 763-771.
7. Güral, A., Tekeli, S., Aytaç, A., Türkan, M., 2012. Eşit Kanal-Açısız Presleme (Ekap) Yöntemiyle Aşırı Deformasyon Yapılmış 7075 Alüminyum Alaşımının Mikroyapısal

- Karakterizasyonu. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27.
8. Roven, H.J., Werenskiold, J.C., 2004. Conventional Light Alloys Towards the Bottom-A Physical Metallurgical Approach. In Proceedings of the Nanomat Conference, Oslo, 32-40.
 9. Baysal, E., Koçar, O., Kocaman, E., Köklü, U., 2022. An Overview of Deformation Path Shapes on Equal Channel Angular Pressing. *Metals*, 12, 1800.
 10. Segal, V., 1995. Materials processing by simple shear. *Materials Science and Engineering: A*, 197, 157-164.
 11. Furukawa, M., Horita, Z., Nemoto, M., Valiev, R.Z., Langdon, T.G., 1998. Factors Influencing The Flow and Hardness of Materials with Ultrafine Grain Sizes. *Philosophical Magazine A*, 78, 203-216.
 12. Harsha, R., Kulkarni, V.M., Babu, B.S., 2018. Severe Plastic Deformation-A Review. *Materials Today. Proceedings*, 5, 22340-22349.
 13. Langdon, T., 2008. Processing of Ultrafine-Grained Materials Using Severe Plastic Deformation: Potential for Achieving Exceptional Properties. *Revista de Metalurgia*, 44, 556-564.
 14. Wang, C., Li, F., Chen, B., Yuan, Z., Lu, H., 2012. Severe Plastic Deformation Techniques for Bulk Ultrafine-Grained Materials. *Rare Metal Materials and Engineering*, 41, 941-946.
 15. Valiev, R.Z., Langdon, T.G., 2006. Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement. *Progress In Materials Science*, 51, 881-981.
 16. Shin, D., Kim, Y.-S., Lavernia, E., 2001. Formation of Fine Cementite Precipitates By Static Annealing of Equal-Channel Angular Pressed Low-Carbon Steels. *Acta Materialia*, 49, 2387-2393.
 17. Chang, S.-Y., 2005. Ahn, B.-D., Hong, S.-K., Kamado, S., Kojima, Y., Shin, D.H. Tensile Deformation Characteristics of a Nano-Structured 5083 Al Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 386, 197-201.
 18. Xu, C., Furukawa, M., Horita, Z., Langdon, T.G., 2004. Severe Plastic Deformation as a Processing Tool for Developing Superplastic Metals. *Journal of Alloys and Compounds*, 378, 27-34.
 19. Valiev, R., Alexandrov, I., Zhu, Y., Lowe, T., 2002. Paradox of Strength and Ductility in Metals Processed by severe Plastic Deformation. *Journal of Materials Research*, 17, 5-8.
 20. Ivanisenko, Y., Wunderlich, R., Valiev, R., Fecht, H.-J., 2003. Annealing Behaviour of Nanostructured Carbon Steel Produced by Severe Plastic Deformation. *Scripta Materialia*, 49, 947-952.
 21. Alkorta, J., Sevillano, J.G., 2003. A Comparison of FEM and Upper-Bound Type Analysis of Equal-Channel Angular Pressing (ECAP). *Journal of Materials Processing Technology*, 141, 313-318.
 22. Koujalagi, M.B., Siddesha, H., 2021. ECAP of Titanium Alloy by Sever Plastic Deformation: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 71-77.
 23. Haase, C., Lapovok, R., Ng, H.P., Estrin, Y., 2012. Production of Ti-6Al-4V Billet Through Compaction of Blended Elemental Powders by Equal-Channel Angular Pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 550, 263-272.
 24. Li, Z., Cheng, X., 2007. Deformation Temperature and Postdeformation Annealing Effects on Severely Deformed TiNi Alloy by Equal Channel Angular Extrusion. *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*, 14, 533-537.
 25. Horita, Z., Fujinami, T., Nemoto, M., Langdon, T., 2001. Improvement of Mechanical Properties for Al Alloys Using Equal-Channel Angular Pressing. *Journal of Materials Processing Technology*, 117, 288-292.
 26. Llorca-Isern, N., Gonzalez, P., Luis-Pérez, C., Laborde, I., 2006. Severe Plastic Deformation of a Commercial Aluminium-Lithium Alloy (AA8090) by Equal Channel Angular Pressing. In Proceedings of the Materials Science Forum, 871-876.
 27. Jafarlou, D., Zalnezhad, E., Hassan, M., Ezazi, M., Mardi, N., Hamouda, A., Hamdi, M., Yoon, G., 2016. Severe Plastic Deformation of Tubular AA 6061 via Equal Channel Angular Pressing. *Materials & Design*, 90, 1124-1135.

28. Jahadi, R., Sedighi, M., Jahed, H., 2014. ECAP Effect on the Micro-Structure and Mechanical Properties of AM30 Magnesium Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 593, 178-184.
29. Figueiredo, R.B., Langdon, T.G., 2010. Grain Refinement and Mechanical Behavior of a Magnesium Alloy Processed by ECAP. *Journal of Materials Science*, 45, 4827-4836.
30. Huang, C., Yang, G., Gao, Y., Wu, S., Zhang, Z., 2008. Influence of Processing Temperature on the Microstructures and Tensile Properties of 304L Stainless Steel by ECAP. *Materials Science and Engineering: A*, 485, 643-650.
31. Fan, Z., Hao, T., Zhao, S., Luo, G., Liu, C., Fang, Q., 2013. The Microstructure and Mechanical Properties of T91 steel Processed by ECAP at Room Temperature. *Journal of Nuclear Materials*, 434, 417-421.
32. Radhi, H.N., Mohammed, M.T., Aljassani, A.M., 2021. Influence of ECAP Processing on Mechanical and Wear Properties of Brass Alloy. *Materials Today. Proceedings*, 44, 2399-2402.
33. Suzuki, T., Vinogradov, A., Hashimoto, S., 2004. Strength Enhancement and Deformation Behavior of Gold After Equal-Channel Angular Pressing. *Materials Transactions*, 45, 2200-2208.
34. Chen, W., Feng, P., Dong, L., Liu, B., Ren, S., Fu, Y., 2018. Experimental and Theoretical Analysis of Microstructural Evolution and Deformation Behaviors of Cuw Composites During Equal Channel Angular Pressing. *Materials & Design*, 142, 166-176.
35. Maziarz, W., Greger, M., Długosz, P., Dutkiewicz, J., Wójcik, A., Rogal, Ł., Stan-Głowińska, K., Hilser, O., Pastrnak, M., Cizek, L., 2022. Effect of Severe Plastic Deformation Process on Microstructure and Mechanical Properties of AlSi/SiC Composite. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 948-960.
36. Goussous, S., Xu, W., Xia, K., 2010. Developing Aluminum Nanocomposites via Severe Plastic Deformation. In *Proceedings of the Journal of Physics, Conference Series*, 240, 012106.
37. Caruso, S., Imbrogno, S., 2021. Finite Element Modelling of Microstructural Changes During Equal Channel Angular Drawing of Pure Aluminium. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114, 1487-1495.
38. Özyürek, D., Yıldırım, M., Tunçay, T., Kalyon, A., Yavuzer, B., 2015. Eşit Kanal Açısal Presleme (EKAP) İşlemi ile Şekillendirilen AA7075 Alüminyum Alaşımının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi. *Uluslararası Hakemli Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 5, 93-101.
39. Fadhil, A., Alkhfaji, S.S., Ismael, M.K., 2021. Design Parameters for Equal-Channel Angular Pressing (ECAP) via Numerical Approach. In *Proceedings of the Journal of Physics: Conference Series*, 012103.
40. Nagasekhar, A., Yoon, S., Tick-Hon, Y., Kim, H., 2009. An Experimental Verification of the Finite Element Modelling of Equal Channel Angular Pressing. *Computational Materials Science*, 46, 347-351.
41. Kapoor, A., Wahid, M.A., Goel, P., Agarwal, K.M., Mohan, U., 2021. 3D FEM Simulation on Deformation and Strain analysis for grain refinement of Mg Alloy passed through ECAP. In *Proceedings of the IOP Conference Series, Materials Science and Engineering*, 012024.
42. Samsudin, M., Kurniawan, D., Nor, F.M., 2015. Strain Distribution Equal Channel Angular Pressing of Magnesium Alloy at 90 and 120 Corner Angles. *Procedia Manufacturing*, 2, 230-235.
43. Venkatraman, R., Raghuraman, S., Raj Mohan, R., 2012. Modeling and Analysis on Deformation Behavior for AA 6061 through Equal Channel Angular Pressing Die. In *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robotics, Automation, and Manufacturing*, 520-525.
44. Kaya, H., Uçar, M., Cengiz, A., Samur, R., Özyürek, D., Çalışkan, A., 2014. Novel Molding Technique for ECAP Process and Effects on Hardness of AA7075. *Mechanics*, 20, 5-10.
45. Bulutsuz, G.A., 2017. Mekanik Özellikleri Geliştirilmiş Biyouyumlu Implant Malzemelerinin Üretiminde Aşırı Plastik Deformasyon Tekniğinin Uygulanma Koşullarının Araştırılması. *Doktora Tezi, Yıldız*

- Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 166.
46. Al-Mufadi, F., Djavanroodi, F., 2014. Effect of equal Channel Angular Pressing Process on Impact Property of Pure Copper. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 8, 30-34.
 47. Gautam, P.C., Biswas, S., 2021. Effect of ECAP Temperature on the Microstructure, Texture Evolution and Mechanical Properties of Pure Magnesium. *Materials Today: Proceedings*, 44, 2914-2918.
 48. Bayat Asl, Y., Meratian, M., Emamikhah, A., Mokhtari Homami, R., Abbasi, A., 2015. Mechanical Properties and Machinability of 6061 Aluminum Alloy Produced by Equal-Channel Angular Pressing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B. Journal of Engineering Manufacture*, 229, 1302-1313.
 49. Djavanroodi, F., Ebrahimi, M., Rajabifar, B., Akramizadeh, S., 2010. Fatigue Design Factors for ECAPed Materials. *Materials Science and Engineering: A*, 528, 745-750.
 50. Klu, E.E., Song, D., Li, C., Wang, G., Zhou, Z., Gao, B., Sun, J., Ma, A., Jiang, J., 2019. Development of a High Strength Mg-9Li Alloy via Multi-Pass ECAP and Post-Rolling. *Metals*, 9, 1008.
 51. Lee, S., Berbon, P.B., Furukawa, M., Horita, Z., Nemoto, M., Tsenev, N.K., Valiev, R.Z., Langdon, T.G., 1999. Developing Superplastic Properties in an Aluminum Alloy Through Severe Plastic Deformation. *Materials Science and Engineering: A*, 272, 63-72.
 52. Lee, S., Langdon, T.G., 1999. Influence of equal-Channel Angular Pressing on the Superplastic Properties of Commercial Aluminum Alloys. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 601.
 53. Avvari, M., Narendranath, S., Nayaka, H.S., 2014. Effect of Processing Routes on AZ31 Alloy Processed by Severe Plastic Deformation. *Procedia Materials Science*, 5, 1560-1566.

