



**EŞİT KANAL AÇISAL PRESLEME (EKAP) YÖNTEMİ
İLE ZN-AG-CU ALAŞIMININ İÇYAPI, MEKANİK VE
ELEKTROKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Muhammed Harun AKINCI

**Danışman: Doç. Dr. Sinan SEZEK
Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliğı Ana Bilim Dalı
2024
(Her hakkı saklıdır.)**

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**EŞİT KANAL AÇISAL PRESLEME (EKAP) YÖNTEMİ İLE ZN-AG-CU
ALAŞIMININ İÇYAPI, MEKANİK VE ELEKTROKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

(Investigation of Internal Structure, Mechanical And Electrochemical Properties of Zn-Ag-Cu
Alloy By Equal Channel Angular Pressing (ECAP))

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Harun AKINCI

Danışman: Doç. Dr. Sinan SEZEK

Erzurum
Ocak, 2024

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Muhammed Harun AKINCI tarafından hazırlanan “EŞİT KANALLI AÇISAL PRESLEME (EKAP) YÖNTEMİ İLE ZN-AG-CU ALAŞIMININ İÇ YAPI, MEKANİK VE ELEKTROKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı çalışması 25/01/2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Makine Mühendisliği Bilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Bünyamin AKSAKAL <i>Fırat Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Sinan SEZEK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Gülşah ÖNER <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim Kurulunun
.../.../.... tarih ve sayılı
kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriő, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Sinan SEZEK danışmanlığında sunulan “EŞİT KANALLI AÇISAL PRESLEME (EKAP) YÖNTEMİ İLE ZN-AG-CU ALAŞIMININ İÇYAPI, MEKANİK VE ELEKTROKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	1	30
Kuramsal Temeller	2	30
Materyal ve Yöntem	5	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	0	20
Sonuç ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	6	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Muhammed Harun AKINCI	Doç. Dr. Sinan SEZEK
24.01.2024	24.01.2024
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Başta bilgi ve tecrübeleriyle her zaman yanımda olan değerli hocam Doç. Dr. Sinan SEZEK olmak üzere deneysel çalışmalarda desteğini benden esirgemeyen Araş. Gör. Gamze İSPİRLİOĞLU KARA'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Beni sıkılmadan dinleyip değerli görüşlerini benimle paylaşarak yanımda olan değerli meslektaşım Mak. Müh. Çağrı ÖZDEMİR'e ve Araş. Gör. Burak ATİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam boyunca her türlü maddi ve manevi desteğiyle bana güç veren hayat arkadaşım Aleyna AKINCI ve uslu durarak bana çalışma fırsatı tanıyan oğlumuz Yiğit AKINCI'ya kalpten teşekkür ederim.

Muhammed Harun AKINCI

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EŞİT KANAL AÇISAL PRESLEME (EKAP) YÖNTEMİ İLE ZN-AG-CU ALAŞIMININ İÇYAPI, MEKANİK VE ELEKTROKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Muhammed Harun AKINCI

Danışman: Doç. Dr. Sinan SEZEK

Amaç: EKAP işlemi uygulanmış Zn-Ag-Cu alaşımının içyapısındaki değişimin ve mekanik özelliklerinin incelenmesi

Yöntem: Aşırı plastik deformasyon yöntemi olarak eşit kanallı açısallı presleme kullanılmıştır. Optik mikroskop ile iç yapılar incelenirken mekanik özelliklerin değişimini incelemek adına sertlik, aşınma, çekme ve korozyon deneyleri yapılarak aradaki fark incelenmiştir.

Bulgular: Biyomalzeme olan Zn-Ag-Cu alaşımı bir aşırı plastik deformasyon yöntemi olan EKAP işlemine farklı parametrelerle tabi tutulmuş ve optik mikroskop ile iç yapısı incelenmiştir. Paso sayısı arttıkça tanelerin incelendiği, tane sayısının arttığı gözlenmiştir. Deformasyona bağlı olarak mekanik ve elektro kimyasal özelliklerde iyileşme olduğu görülmüştür.

Sonuç: Çalışmada Zn-Ag-Cu alaşımının biyomedikal sektöründeki kullanımını yaygınlaştırmak amaçlanmıştır. Zn-Ag-Cu alaşımının mekanik özelliklerinin yetersiz olması sebebiyle bu mekanik özelliklerin iyileştirilmesi ve bu dezavantajın ortadan kaldırılması için numunelere Eşit Kanallı Açısallı Presleme işlemi yapılmıştır. Yapılan Eşit Kanallı Açısallı Presleme işlemi ardından içyapı incelenmiştir. Tane boyutu ve işlem sonrası mekanik ve elektrokimyasal özellikler incelendiğinde malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştiği gözlenmiştir. Bu sonuçlarla alaşımın biyomalzeme olarak kullanımının yaygınlaşmasına engel teşkil eden yetersiz mekanik özelliklerin iyileştiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Plastik deformasyon, EKAP, Zn-Ag-Cu, aşınma, korozyon, sertlik, çekme

Ocak 2024, 72 Sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF INTERNAL STRUCTURE, MECHANICAL AND ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF ZN-AG-CU ALLOY BY EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING (ECAP)

Muhammed Harun AKINCI

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sinan SEZEK

Purpose: To investigate the change in the microstructure and mechanical properties of ECAP-treated Zn-Ag-Cu alloy

Method: Equal channel angular pressing was used as an extreme plastic deformation method. While the internal structures were examined with an optical microscope, hardness, wear, tensile and corrosion tests were performed to examine the changes in mechanical properties.

Results: Zn-Ag-Cu alloy, a biomaterial, was subjected to EKAP, an extreme plastic deformation method, with different parameters, and its internal structure was examined by optical microscopy. As the number of passes increased, the grains became thinner and the number of grains increased. Depending on the deformation, mechanical and electrochemical properties improved.

Conclusion: This study aimed to expand the use of Zn-Ag-Cu alloy in the biomedical sector. Since the mechanical properties of Zn-Ag-Cu alloy are insufficient, the Equal Channel Angular Pressing process was applied to the samples to improve these mechanical properties and eliminate this disadvantage. After the Equal Channel Angular Pressing process, the microstructure was examined. When the grain size and post-treatment mechanical and electrochemical properties were examined, it was observed that the material's mechanical properties improved. With these results, it has been determined that the inadequate mechanical properties that prevent the widespread use of the alloy as a biomaterial have improved.

Keywords: Plastic deformation, EKAP, Zn-Ag-Cu, abrasion, corrosion, hardness, tensile

January 2024, 72 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR DİZİNİ	xi
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	6
Aşırı Plastik Deformasyon (APD)	6
Aşırı Plastik Deformasyon Yöntemleri.....	7
Toplayıcı Haddelemeyele Bağlama (Accumulative Roll-Bonding (ARB))	7
Çok Yönlü Dövme (Multi-Directional Forging).....	9
Periyodik Ekstrüzyon	10
Yüksek Basınçlı Burulma (HPT - High Pressure – Torsion)	11
Tekrarlayan Kıvrırma ve Doğrultma	12
Bükme Ekstrüzyon (Twist Extrusion).....	13
Eşit Kanallı Açısal Presleme (Equal Channel Angular Pressing).....	14
Eşit kanallı açısal preslemeye etki eden parametreler.....	16
Kenar açısı ve köşe açısı etkisi	16
Presleme rotaları etkisi.....	17
Presleme sayısı etkisi	19
Presleme sıcaklığı.....	20
Presleme hızı	20
ZN-AG-CU	21
Mg ve alaşımları.....	22
Ag ve alaşımları	23
MATERYAL VE METOT.....	26
Kalıp Tasarımı.....	26

Istamba Tasarımı	27
Analizler.....	27
Deneysel Çalışmalar.....	33
Alaşımın İmali.....	33
Kalıp İmalatı.....	33
Presleme İşlemi	34
Optik Mikroskop Analizleri	36
EKAP Sonrası Mekanik Özellikler	36
Mikrosertlik testi	36
Çekme testi.....	36
Aşınma testi.....	37
Korozyon testi	37
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	38
EKAP İşlemi Sonrası Optik Mikroskop Analizleri.....	38
EKAP İşlemi Uygulanmış Numunelerde Mikrosertlik Deneyi	44
EKAP İşlemi Uygulanmış Numunelerde Aşınma Deneyleri	46
EKAP İşlemi Uygulanmış Numunelerde Korozyon Deneyleri	48
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	51
KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ.....	58

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Çinkonun (Zn) Yapısal Özellikleri	21
Tablo 2. Magnezyumun (Mg) Yapısal Özellikleri.....	23
Tablo 3. Gümüşün (Ag) Yapısal Özellikleri.....	24
Tablo 4. Simufact FEM Analiz Parametreleri	28
Tablo 5. EKAP işlemine maruz kalan alaşımın kimyasal bileşimi (% ağırlıkça).....	33
Tablo 6. AISI 4140 Çeliğinin Kimyasal Kompozisyonu (% ağırlıkça).....	34
Tablo 7. AISI 4140 Çeliğinin Mekanik Özellikleri	34
Tablo 8. Presleme Parametreleri	35
Tablo 9. EKAP İşlemi Uygulanmış Numunelerde Korozyon Deney Sonuçları.....	50

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. APD sırasında tane oluşumu	7
Şekil 2. Toplayıcı haddelemeyeyle bağlama.....	8
Şekil 3. Çok yönlü dövme şematik gösterim.....	9
Şekil 4. Periyodik Ekstrüzyon	10
Şekil 5. Yüksek basınçlı burulma.....	11
Şekil 6. Tekrarlayan Kıvrırma ve Doğrultma	12
Şekil 7. Bükme ekstrüzyon.....	13
Şekil 8. EKAP düzeneği.....	15
Şekil 9. Kenar ve Köşe Açılarının EKAP Prosesine Etkisi.....	16
Şekil 10. EKAP presleme rotaları	18
Şekil 11. Rotalara göre kayma düzlemleri	19
Şekil 12. Farklı paso sayılarına göre kayma düzlemleri	20
Şekil 13. Zn-Al Faz Diyagramı	22
Şekil 14. Gümüş iyonunun antibakteriyel etkisi	24
Şekil 15. EKAP kalıp tasarımı teknik resim.....	26
Şekil 16. İstampa tasarımı	27
Şekil 17. EKAP analiz.....	28
Şekil 18. $\phi=135^\circ$ kenar açısında %30, %50, %70, %100 ilerleme eşdeğer gerilme.....	29
Şekil 19. $\phi=135^\circ$ kenar açısında %30, %50, %70, %100 ilerleme efektif plastik gerinim.....	30
Şekil 20. %30 $\phi=135^\circ$ kenar açısında %30, %50, %70 ilerleme temas basıncı	31
Şekil 21. Malzeme akışı $\phi=135^\circ$	31
Şekil 22. Sürtünme gerilimi $\phi=135^\circ$	32
Şekil 23. Gerinim oranı $\phi=135^\circ$	32
Şekil 24. EKAP kalıbı	34
Şekil 25. EKAP Kalıbı ve Proseste kullanılan rotalar.....	35
Şekil 26. Presleme işlemi (a), 2 pasoda işlem görmüş numune (b).....	36
Şekil 27. Tane Boyutları.....	38
Şekil 28. İşlemsiz numunenin içyapı görüntüleri	39
Şekil 29. 1 pasoda işlem görmüş numunenin içyapı görüntüleri	39
Şekil 30. Bc rotasında 2 pasoda işlem görmüş numunenin içyapı görüntüleri	40
Şekil 31. Bc rotasında 3 pasoda işlem görmüş numunenin içyapı görüntüleri	40

Şekil 32. Bc rotasında 4 pasoda işlem görmüş numunenin içyapı görüntüleri	41
Şekil 33. C rotasında 2 pasoda işlem görmüş numunenin içyapı görüntüleri	42
Şekil 34. R rotasında 2 pasoda işlem görmüş numunenin içyapı görüntüleri	42
Şekil 35. EKAP işlemi yapılmış numunelerin mikrosertlik deney sonuçları.....	44
Şekil 36. Çekme testi gerilme-uzama eğrisi.....	45
Şekil 37. Akma gerilmesi, kopma gerilmesi-uzama grafiği.....	45
Şekil 38. Bc rotasında işlem gören numunelerin sürtünme katsayısı-zaman grafiği	47
Şekil 39. İşlemsiz, A, R ve C rotaları sürtünme katsayısı-zaman grafiği.....	47
Şekil 40. EKAP işlemi yapılmış numunelerin OCP eğrileri	48
Şekil 41. EKAP işlemi yapılmış numunelerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....	49



KISALTMALAR DİZİNİ

Ag	: Gümüş
APD	: Aşırı Plastik Deformasyon
ARB	: Toplayıcı Haddelemeyle Bağlama (Accumulative Roll-Bonding)
EKAP	: Eşit kanallı açısall presleme
HPT	: Yüksek Basınçlı Burulma (High Pressure Torsion)
Mg	: Magnezyum
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TEM	: Transmisyon Elektronik Mikroskobu
XRD	: X-ışını Kırınımı
Zn	: Çinko

GİRİŞ

Malzeme bilimciler her zaman daha iyi malzeme özellikleri elde etmek için gayret içinde olmuşlardır. Bu iyi malzemenin tanımı, malzemenin kullanım alanına veya maliyete göre değişiklik gösterebilir. Metalik malzemeler içerisinde çelik birçok sebeple en çok tercih edilen malzeme türüdür. Fakat ağırlığının fazla olması, şekil vermek için çıkarılması gereken sıcaklıkların yüksek olmasından dolayı maliyetin artması gibi dezavantajlara sahiptir. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak adına malzeme bilimciler daha hafif, daha az maliyetli ve kullanım alanına göre mekanik özellikler açısından yeterli farklı malzeme arayışı içerisinde olmuştur. Böylece alaşımlar üzerinde yapılan çalışmalar artmıştır.

Alaşımlar sahip oldukları mekanik özellikler sebebiyle farklı sektörlerde kullanılmaktadır. Örneğin Titanyum (Ti) ve Alüminyum (Al) alaşımları yüksek mukavemet ve düşük ağırlıkları ile havacılıkta kullanılırken Bakır (Cu) alaşımları nispeten yumuşak ve sünek olmaları sebebiyle soğuk işlemede kullanılabilir. Yüksek mukavemet ve süneklik gibi özellikleri tek bir alaşımda toplamak mümkün olmadığından alaşımların element içerikleri ve oranları değiştirilerek mekanik özelliklerde iyileştirme yapmak üzerine araştırmalar hız kazanmıştır(Kurt, 2013).

Zaman içerisinde alaşım içeriğini ve oranlarını değiştirme çalışmaları dışında malzemelerin var olan özelliklerini iyileştirmek amacıyla malzemenin iç yapısında değişikliğe sebep olan deformasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Malzeme şekillendirme açısından verimli olan bu geleneksel plastik şekil verme yöntemleri, doğrudan mekanik özellikleri iyileştirme amacı gütmendiğinden mekanik özelliklerde istenen değişiklikleri sağlayamamıştır. Geleneksel plastik şekil verme metotları (derin çekme, haddeleme gibi) mekanik özellikleri iyileştirme konusunda etkisiz kalınca devreye aşırı plastik deformasyon (APD) yöntemleri girmiştir. APD yöntemleri, mikroyapı değişimi vasıtasıyla malzemenin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu yöntem malzemede mukavemet artışı, tokluk artışı gibi iyileşmelere sebep olur.

Aşırı plastik deformasyon yöntemleri içinde en dikkat çeken Eşit Kanallı Açısal Presleme (EKAP) olmuştur. Eşit kanallı açısal preslemenin diğer aşırı plastik deformasyon yöntemlerinden en önemli farkı iş parçasının kesitinde ve hacminde bir değişikliğe sebep olmadan mekanik özellikleri iyileştirebilmesidir. EKAP son zamanlarda üzerine çok fazla araştırma yapılan bir yöntemdir. EKAP, metallerin ve alaşımların plastik deformasyon ile tane boyutunu küçülterek pek çok malzemeyi daha yüksek mukavemetli ve daha sünek hale getirir.

EKAP bilimsel çalışmalar ve imalatla yaygın olarak kullanılmaktadır. EKAP işleminin bu denli yaygın kullanımının başlıca nedenlerinden biri diğer aşırı plastik deformasyon yöntemlerine nazaran EKAP işleminin daha düşük maliyetli ve daha verimli olmasıdır.

EKAP işleminde kalp tasarımı, prosesin yapılma kolaylığını ve işlemin amacını belirlemede göz ardı edilemeyecek bir öneme sahiptir. Örneğin yapılan bir çalışmada toz alüminyum ve seramik parçaları EKAP işlemine tabii tutmak amacıyla bir kalıp tasarlanmıştır. Malzemelerin işlem sonrasında EKAP kanalından çıkarılmasını kolaylaştırmak adına kalıp iki parça halinde tasarlanmıştır. Kalıp, tek parça kalıplara göre malzeme çıkarma işlemi açısından avantajlı olsa da 15 ve üzeri presleme sonucunda EKAP kanalında deformasyonların meydana geldiği gözlenmiştir (Bayrak, 2008).

Kalıp tasarımı, numunenin yüzeyinde daha az deformasyon olması ve numunenin kolaylıkla kanaldan çıkarılabilmesi amaçlanarak yapılmalıdır. EKAP işlemine ilgi arttıkça işlemi daha pratik ve daha etkin yapabilmek adına çalışmalar yapılmıştır. Bir çalışmada, çentik ve çatlak oluşumu riskini azaltmak için parçalı bir kalıp tasarımı tercih edilmiştir. Kalıbın bozulup toplanabilir özelliği sayesinde numune kanaldan daha hızlı çıkarılabilmektedir (Kahriman, 2017).

Hibrit bir model olarak düşünülmüş bir çalışmada genişlemeli EKAP olarak isimlendirilen, numunenin kıvrıldığı köşede kanalı genişleterek tasarlanmış bir kalıp kullanılmıştır. Saf bakır ve AZ31 magnezyum alaşımı önce EKAP, sonrasında ise genişlemeli EKAP işlemine tabi tutulmuştur. Hibrit modelin uygulandığı numunelerde, genişlemeli EKAP işleminde; sadece EKAP uygulanan numunelere kıyasla hem tane boyutunda daha fazla küçülme görülmüş hem de mekanik özellikler nispeten daha iyi hale gelmiştir(Öğüt, 2021).

Gemi yapımında kullanılan ASTM 131A çeliği ile yapılan bir deneyde 13 mm² kesitli, 130 mm boyundaki numuneler kullanılmıştır. 90° kanal açısı ve 300°C presleme sıcaklığında tek geçiş ile numuneler EKAP işlemine maruz bırakılmış ve içyapılarındaki değişim araştırılmıştır. Optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskop (SEM) ile içyapı incelenmiştir. İşlem öncesinde 25 µm olarak ölçülen tane boyutu, işlem sonrasında 7 µm seviyelerine kadar düşmüştür. Tane boyutundaki ciddi azalmanın yanı sıra tane yönlenmelerinin işlem yönünde olduğu da gözlemlenmiştir.(Sekban, 2020).

Elektrik işlerinde kullanılan, ısıtma işlemi uğramamış bakır bir malzeme ile yapılan bir deneyde mikroyapı değişimi mercek altına alınmıştır. 12mm çap 35mm uzunluğa sahip numune 120° kenar 20° kanal açılı EKAP kalıbı ile 4 pasoda preslenmiştir. İşlem görmemiş numunelerin tane boyutu 30µm civarlarındayken 2 paso sonucu tane boyutu 15µm, 4 paso sonucunda ise 8µm civarlarına kadar düştüğü gözlemlenmiştir(Atan, 2022).

EKAP işlemi temel olarak malzemeyi tane küçülmesine maruz bırakarak dislokasyon hareketlerini artırır ve dislokasyon kilitlenmelerine sebep olur. EKAP içyapıda tane boyutunu küçültürken mekanik özelliklerini değiştiren bir aşırı plastik deformasyon yöntemidir. Bu işlem malzemenin maruz kaldığı kayma gerilmesini doğrudan etkileyen kanal açısı, köşe açısı gibi belirleyici parametreler içerir. Bu parametreler ışığında işlemin uygulanacağı bir kalıp üretimi gerektirir. İş parçasının kalıba yerleştirilmesinin ardından hidrolik pres ile belirli paso sayısında ve rekristalizasyona sebebiyet vermeyecek bir sıcaklıkta işlem gerçekleştirilir. EKAP işlemindeki bir diğer önemli kriter ise paso geçişlerinde içyapı yönlenmesini belirleyen rota belirleme işlemidir. EKAP işlemi ile geçmişten beri malzeme bilimcilerin arzu ettiği yüksek mukavemet ve süneklik özellikleri bir arada sağlanabilirken ayrıca yüksek sıcaklıkla yapılan uygulamalarda malzemeye süper plastiklik özelliği de kazandırılabilir (Nagasekhar, A. V., Chakkingal, U., Venugopal, 1998).

Geleneksel plastik deformasyon yöntemleri ve EKAP işleminin kıyaslandığı bir çalışmada, toz alüminyum malzeme geleneksel ekstrüzyon yöntemi ve EKAP yöntemi ile işleme tabi tutulmuştur. 3 pasoda yapılan EKAP işlemine maruz kalan malzemenin tane boyutunun geleneksel ekstrüzyon işlemine maruz kalan malzemenin tane boyutuna göre bir hayli küçük olduğu görülmüştür (Haghighi *et al.* 2012).

Bir çalışmada Ti-6Al-4V alaşımının EKAP ile ultra ince taneli bir yapıya getirilmesi ve bunun sonucunda mekanik davranışındaki değişiklikler incelenmesi amaçlanmıştır. 2 pasoda yapılan işlemin, çekme dayanımı ve setlik gibi mekanik özelliklere etkisi gözlemlenmiştir. 120° kenar açısı ile 2 pasoda yapılan işlem sonrasında numunede çekme dayanımının 795,8 MPa değerinden 918,3 MPa değerine, akma dayanımının 660 MPa değerinden 850 MPa değerine, sertliğin ise 255 HV değerinden 303 HV değerine ulaştığı görülmüştür. 90° kenar açısı ve yine 2 pasoda yapılan EKAP işleminin sonucunda ise çekme dayanımının 795,8 MPa değerinden 990,5 MPa değerine, akma dayanımının 660 MPa değerinden 890 MPa değerine, sertliğin ise 255 HV değerinden 343 HV değerine ulaştığı görülmüştür (Elilbol, 2020).

Malzemelerin içyapısı ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinin yanı sıra EKAP işleminin sağladığı bir diğer avantaj toz metalürji yöntemiyle imalata uygun olmasıdır. Bu amaçla yola çıkılan bir çalışmada, silindirik bir kanaldan kalıba giren alüminyum malzeme EKAP sonrası 2,95x4,20 mm dikdörtgen kesitle kalıptan çıkmış ve bu sayede toz malzemeden dikdörtgen kesitli bir malzeme elde edilmiştir. İşlem, hareketli merdane ile içerisine giren tel malzemeleri kanala sokup ardından yeterince tel malzeme ile beslenen kalıbın malzemeleri dikdörtgen kesitli çıkış kanalına itirmesi şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bu işlem boyunca meydana gelen aşırı plastik deformasyon malzemenin içyapısındaki tane boyutunu küçültüp

mekanik özelliklerini iyileştirirken bir yandan da dikdörtgen formda bir malzeme elde edilmiştir(Bayrak, 2008).

Farklı rotalar ile presleme işlemi yapma imkânı tanıyan EKAP işleminde rota seçimi içyapıda ve mekanik özelliklerde birtakım farklılıklar doğurabilmektedir. Yapılan bir çalışmada AA2014 malzemesi oda sıcaklığında A ve Bc rotalarında EKAP işlemine tabi tutulmuştur. Her iki rotada da tane boyutunda küçülme gözlenmiştir. Paso sayısı arttıkça dislokasyonların ve kayma bantlarının arttığı görülmüştür. İki farklı rotada AA2014 malzemesinin sertlik ve çekme dayanımı özelliklerinde ne gibi bir değişiklik olduğu araştırılmıştır. Vickers metoduyla işlem görmemiş malzeme için 120 HVN olarak ölçülen sertlik değerleri A rotasında EKAP sonrası 158 HVN değerine Bc rotasında ise 165 HVN değerine yükselmiştir. Çekme dayanımı ise işlem görmemiş malzemede 390 MPa iken, A rotasında işlem sonrası 468 MPa değerine, Bc rotasında 602 MPa değerine yükselmiştir. Bc ve A rotalarında işlem gören malzemelerin mekanik özelliklerindeki bu farklılık rotaların meydana getirdiği farklı kayma düzlemleri ve dislokasyonlar ile açıklanmıştır. Bc rotasında, malzemenin her bir paso sonrası 90° döndürülmesi malzemede dislokasyon birikimine sebep olmaktadır. A rotasında ise işlem gören malzemenin kayma düzlemlerinin hemen hemen birbirine paralel olması ve dolayısıyla tekrarlanan pasolarda dislokasyonların yok olabilme durumu 2 rotayı birbirinden farklı kılmıştır (Divya *et al.* 2018).

İşlemin yapıldığı sıcaklığın seçimi; malzemenin şekil değişim direnci ve işlem esnasında meydana gelebilecek çatlak oluşumları gibi kritik konularla doğrudan ilişkilidir. Ayrıca işlemin yapıldığı sıcaklık işlem sonrasında içyapıdaki değişim ve mekanik özellikleri de etkileyebilir. Bu konuyu inceleyen bir çalışmada, Al-7075 üzerinde farklı sıcaklıklarda (Oda sıcaklığı, 120°C, 180°C) yapılan EKAP işlemi ile sıcaklığın EKAP üzerindeki etkisini ve malzemenin mekanik özellikleri ve mikroyapısı araştırılmıştır. İşlem, 90° kenar açısı ve 20° köşe açısıyla tasarlanmış bir kalıp ile Bc rotasında 3-4 pasoda yapılmıştır. Yapılan işlem sonrası sertlik değerleri incelenen malzemenin oda sıcaklığından 120°C çıkarılması durumunda sertliğinin %10 mertebelerinde arttığı, 120°C 'den 180°C 'ye çıkarılması durumunda ise sertlik değerinde önemli ölçüde azalış olduğu gözlenmiştir(Shaeri *et al.* 2016).

Ultra ince tane yapısına sahip biyouyumlu malzemeler elde etmek için yapılan bir çalışmada alfa fazlı saf titanyum ve beta fazlı Ti13Nb13Zr alaşımı kullanılmıştır. Saf titanyum EKAP işlemine tabi tutulurken beta fazlı alaşım hidrostatik ekstrüzyon ile plastik deformasyona maruz bırakılmıştır. Hidrostatik ekstrüzyon ve EKAP, tane boyutu ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi konularında kıyaslanmıştır. Ayrıca her pasoda değişen sıcaklık parametreleri kullanılarak EKAP yapılmış ve EKAP işlemi için optimum parametreler belirlenmeye

çalışılmıştır. Mekanik dayanımların artması beklenen EKAP işlemi sonrası beklenti karşılanmış ve saf titanyumun dayanımı yaklaşık 1,5 katına çıkmıştır. Hidrostatik ekstrüzyon işlemi sonrası Ti13Nb13Zr alaşımında ise bu değer 1,41 katına çıkmıştır. EKAP işlemi sonrası meydana gelen mukavemet artışına rağmen titanyumun aşınma davranışında önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Yapılan incelemeler sonunda EKAP işlemi ile ultra ince taneli yapıya dönüşen numunelerin biyomedikal uyumluluğunun iyileştiği görülmüştür (Bulutsuz, 2017).

Saf bakırın EKAP sonrası biyoyumluluğunu araştırmak için yapılan bir çalışmada; işlem sonrası numune içyapısı, mekanik özelliklerdeki değişim, özellikle korozyon direnci ve iyon salınımı araştırılmıştır. Yaklaşık 8 mm çapında ve 45 mm uzunluğundaki numuneler Bc rotasında 8 pasoda EKAP işlemine tabi tutulmuştur. Her bir pasodan sonra tane boyutunda ciddi bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Ölçülen sertlik değerlerinde pasolar arasında istikrarlı bir artış gözlemlenmiştir. 8 pasonun sonunda saf bakırın sertlik değeri %45,3 artmıştır. İnsan vücudundaki sıvı ortamını simüle eden Hanks çözeltisi içerisinde korozyon direnci ölçülen EKAP yapılmış numunelerin korozyon dirençlerinin arttığı ve iyon salınımı seviyesinin genelde sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Ultra ince tane yapısına sahip bakırın bu bilgiler ışığında biyomalzeme olarak kullanıma uygun olacağı değerlendirilmiştir (Xu *et al.* 2010).

İnsan vücudunda kullanılan kompozit bir malzeme olan Mg-3Zn-0,2Ca malzemesinin EKAP sonrası içyapısını inceleyen bir çalışma yapılmış ve Bc rotasında 300°C sıcaklıkta malzeme aşırı plastik deformasyona maruz bırakılmıştır. EKAP sonrası malzemenin mikroyapısındaki değişim incelenmiştir. Tanelerin önemli ölçüde homojenleştiği gözlenmiştir. Paso sayısı arttıkça malzemenin tane boyutunun küçüldüğü görülmüştür. Yeniden kristalleşmiş tanelerin tercih edilen yönelimlere sahip olduğu ve yapılan deneylerle mekanik özelliklerin iyileştiği ispatlanmıştır. Tane boyutu 5,62 µm mertebelerinden 1,30 µm mertebelerine düştüğü ve artan kayma düzlemi sistemi sayesinde malzemenin plastik deformasyon kapasitesi artış göstermiştir(Zhang *et al.* 2021).

Bu çalışmada özellikle biyomalzeme olarak tercih edilen Zn-Ag-Cu alaşımının Eşit Kanallı Açısız Presleme ile mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca farklı parametrelerle işleme tabi tutulan Zn-Ag-Cu alaşımı için en uygun EKAP parametreleri araştırılmıştır. Malzemenin işlem öncesi ve işlem sonrası içyapısı ve mekanik özellikleri test edilerek kıyaslanmıştır.

KURAMSAL TEMELLER

Eşit Kanallı Açısal Preslemenin (EKAP) daha iyi anlaşılabilmesi için konu genelden özele bir yaklaşım ile ele alınmıştır. Aşırı Plastik Deformasyonun (APD) ne olduğu, nasıl çalıştığı ve malzemenin mekanik özellikleri üzerinde ne gibi etkilerinin olduğundan bu bölümde bahsedilmiştir. Bazı önemli APD yöntemlerinden bahsedilerek EKAP ile benzerlikleri ve ayrıştıkları noktalar izah edilmiş, ardından EKAP işleminden bahsedilerek EKAP işlemi için önemli olan parametreler ve bu parametreler üzerine yapılan çalışmalar irdelenmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan alaşımın elementlerinin özellikleri, bu elementlerin yaygın alaşımları ve kullanım alanlarından söz edilmiştir.

Aşırı Plastik Deformasyon (APD)

Malzeme bilimciler daima bünyesinde yüksek mukavemet ve sünekliği bir arada barındıran ve düşük maliyetli malzemeler keşfetmek ve geliştirmek için çaba sarf etmişlerdir. Bu malzeme geliştirme çalışmaları teknolojik gelişmelerin de oluşturduğu altyapı ile ortaya yeni imalat yöntemleri çıkarmıştır. Bu imalat yöntemleri ile farklı niteliklere sahip (sert, hafif, kolay işlenebilir gibi) malzemelerin geliştirilmesi mümkün olmuştur. Plastik deformasyon denilen bu imalat yöntemleri içerisinde kullanılan en verimli yöntemlerden biri ise aşırı plastik deformasyondur (APD). Aşırı plastik deformasyon malzemenin mukavemet değerini yükseltirken tokluğunu düşürmemeyi amaçlar. APD, metalik malzemelerin gerilmeler vasıtasıyla plastik deformasyona uğraması ve bu deformasyon sayesinde tane boyutunda küçülmeler meydana gelmesi ile gerçekleştirilir. APD yöntemleri iş parçasının kesit, hacim ve şeklinde ciddi bir değişikliğe sebep olmayacak şekilde aynı iş parçasına farklı pasolarda uygulanabilir. Tane boyutunda meydana getirdiği mikron mertebesinde ince tane yapısı malzemenin mekanik özelliklerinde değişikliklere sebebiyet vermektedir.

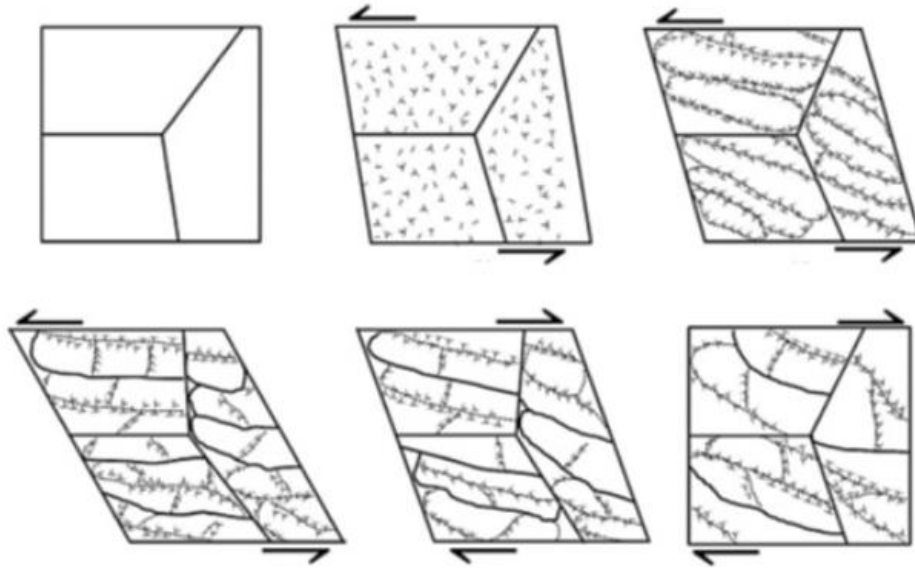
Aşırı plastik deformasyonun temel prensibi tane boyutunu küçültürerek mekanik özellikleri iyileştirmektir. Tane boyutu-mukavemet ilişkisini ilk kez Hall-Petch ele almıştır.

$$\sigma_T = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \quad (1)$$

Burada σ_T akma gerilmesi, σ_0 kafes sürtünme gerilmesi, K akma sabiti d ise tane boyutunu ifade etmektedir. Hall- Petch yasası, polikristalin bir malzemede tane boyutunun küçülmesi ile akma gerilmesinde bir artış meydana geldiğinin teorik bir ifadesidir. Özellikle tek kristalli malzemelerde bu durum gözlenebilir. Mesela bakır üzerine yapılan bir çalışmada tane

boyutunun 20 nm civarına kadar düşmesiyle kaba tane yapılı bakıra kıyasla akma dayanımının yaklaşık 4 kat arttığı gözlenmiştir(Hansen & Ralph, 1982).

APD sonrası malzeme iç yapısında kesme kuvveti sebebiyle alt tane oluşumu ile sonuçlanan tane küçülmesi Şekil 1’de gösterilmiştir. Mikroyapıdaki değişim, deformasyon ikizlerinin iri taneleri daha ince lamellere dönüştürmesi ile başlar. Ardından ilave dislokasyon kayma sistemleri devreye girer. Yoğunluğu yüksek yeni dislokasyon dizileri daha küçük alt tanelerin meydana gelmesine sebebiyet verir. Bu iç yapının düşük enerjili konuma geçmesi anlamına gelmektedir (Ulacia *et al.* 2010).



Şekil 1. APD sırasında tane oluşumu (Bagherpour *et al.* 2016)

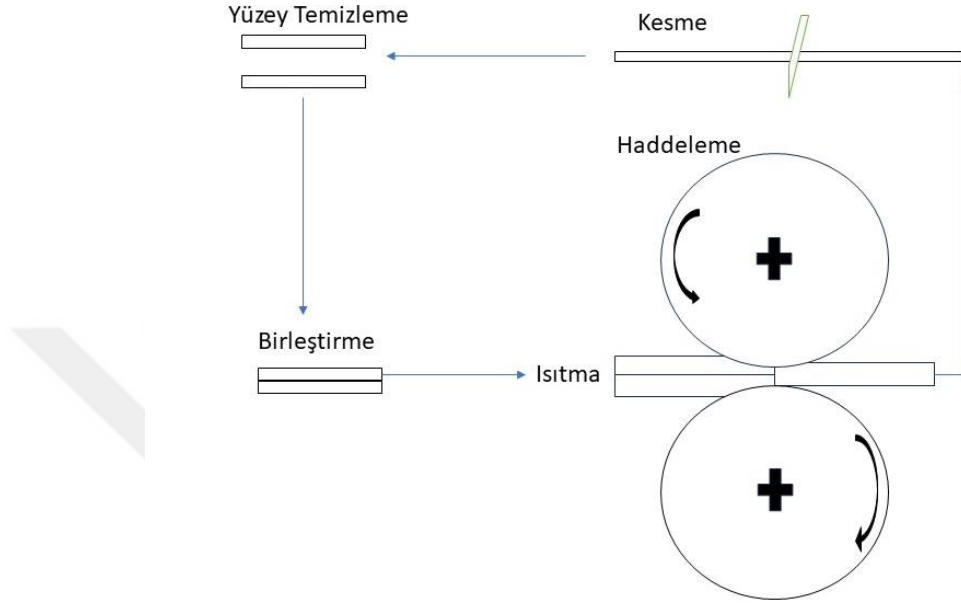
Aşırı Plastik Deformasyon Yöntemleri

Yeni nesil bir imalat yöntemi olan aşırı plastik deformasyonun birçok farklı metodu vardır. Bu metotların bazıları Toplayıcı Haddemeyle Bağlama, Çok Yönlü Dövme, Periyodik Ekstrüzyon, Yüksek Basıncılı Burulma, Tekrarlayan Kıvrırma ve Doğrultma, Bükme Ekstrüzyon ve EKAP şeklinde sıralanabilir. Aşırı Plastik Deformasyonu daha iyi anlayabilmek için bu yöntemlerden ve bu yöntemlerin avantaj, dezavantajlarından bu bölümde bahsedilmiştir.

Toplayıcı Haddemeyle Bağlama (Accumulative Roll-Bonding (ARB))

Toplayıcı Haddemeyle Bağlama (Accumulative Roll-Bonding (ARB)) birleştirilmiş çok katmanlı malzemelerin üretimi için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, mekanik özellikleri iyileştirme, üstün yüzey pürüzlülüğü elde etme ve mikroyapı geliştirme dahil olmak üzere bir dizi avantaj sağlar.

ARB, alaşımlı metal şeritlerin tekrarlayan şekilde yuvarlanması ve ardından bir sonraki şerit ile birleştirilmesi yoluyla gerçekleştirilir. Bu işlem sonucunda, malzeme daha yüksek sertlik, mukavemet ve tokluk gibi özelliklere sahip olur. ARB, özellikle alüminyum ve bakır gibi yumuşak metallerin yüksek mukavemetli ve yüksek dayanımlı malzemelere dönüştürülmesi için sıklıkla kullanılır.



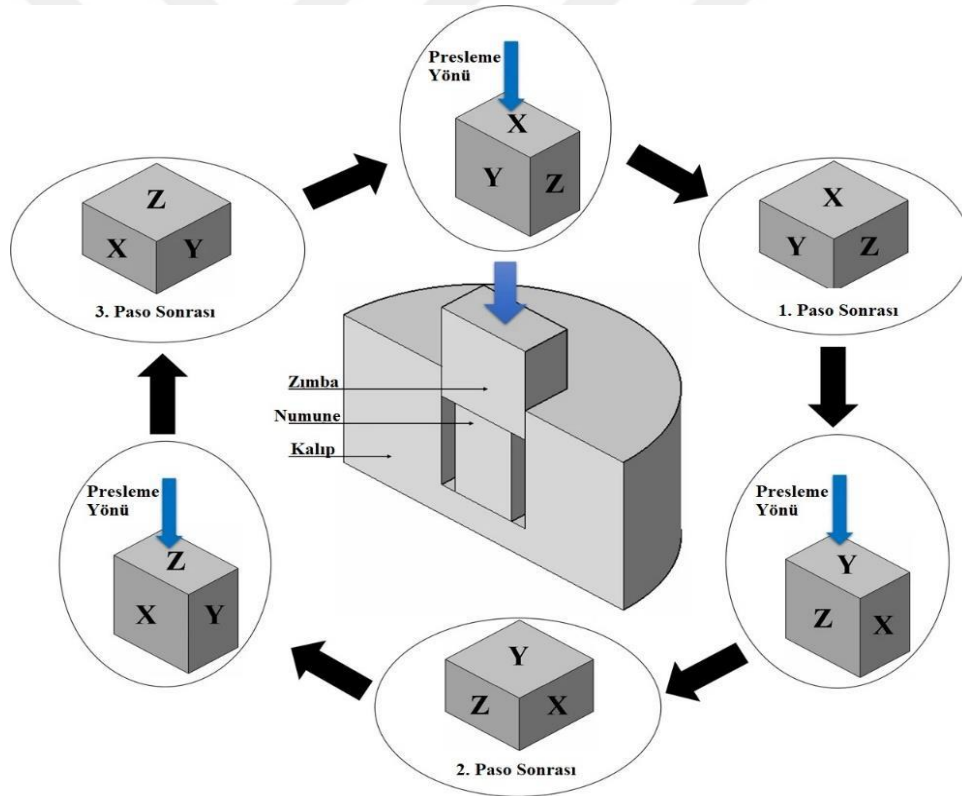
Şekil 2. Toplayıcı haddelemeyle bağlama

İlk adımda malzeme 2 eş parçaya kesilir. Yüzeyler temizlendikten sonra malzemeler üst üste istiflenir. Ardından istiflenmiş malzemeler ısıtılarak haddeleme işlemine tabi tutulur (Şekil 2). Böylece işlem tamamlanmış olur. ARB işlemi, mekanik özellikleri, yapısal özellikleri ve malzeme davranışını belirlemek için bir dizi deneysel ve sayısal araştırmaya konu olmuştur. Bu çalışmalar, ARB işleminin özellikle yüksek deformasyon hızları ve sıcaklıklar altında gerçekleştirildiğinde en iyi sonuçları verdiğini göstermiştir (Ghalehbandi *et al.* 2019).

Yapılan bir çalışmada, ARB yöntemi kullanılarak saf ticari alüminyumun mekanik özellikleri ve mikroyapısı incelenmiştir. ARB işlemi, alüminyum levhaların birleştirilmesi ve ardından %50 kalınlık azalımı ile silindirik şekil verilmesiyle başlamıştır. Bu işlem, 6,4 eşdeğer gerinim ile 8 döngü boyunca uygulanmıştır. Mikroyapı incelemesi için, geçiş elektron mikroskobu (TEM), X-ışını difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop kullanılmıştır. Bulgular, ARB işleminin saf alüminyumda önemli bir yapısal rafinasyon sağladığını ve sertlik, mukavemet, bükme dayanımının arttığını göstermiştir. Bununla birlikte, aşınma özellikleri üzerindeki etkileri hala net değildir. Bu sonuçlar, ARB işlemi ile elde edilen malzemelerin uygulamalarda potansiyel olarak kullanışlı olabileceğini göstermektedir (Eizadjou *et al.* 2009).

Çok Yönlü Dövme (Multi-Directional Forging)

Çok Yönlü Dövme (Multi-Directional Forging), metal işleme teknolojilerinden biridir. Bu yöntem, çeşitli yönlerde doğru uygulanan basınçla malzemenin şekillendirilmesini sağlar. Bu teknik, geleneksel dövme yöntemlerine kıyasla daha üstün özelliklere sahip parçaların üretilmesini mümkün kılar. Bu nedenle, son yıllarda Çok Yönlü Dövme teknolojisi, özellikle otomotiv, havacılık, savunma ve enerji sektörlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çok Yönlü Dövme, metal malzemelerin çeşitli yönlerde doğru uygulanan basınçla şekillendirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu yöntem, genellikle üç aşamalı bir işlemi içerir (Şekil 3). İlk aşamada, malzeme bir kalıp içine yerleştirilir ve üstten aşağı doğru basınç uygulanır. İkinci aşamada, numune yönü değiştirilir ve aynı basınç yönü tekrar uygulanır. Son olarak, numune yönü tekrar değiştirilir ve farklı bir yönde basınç uygulanır. Bu üç aşama, malzemenin homojen bir şekilde şekillenmesini sağlar ve daha yüksek mukavemet, dayanıklılık ve yorulma özellikleri elde edilir (Attarilar *et al.* 2019).



Şekil 3. Çok yönlü dövme şematik gösterim (Attarilar *et al.* 2019)

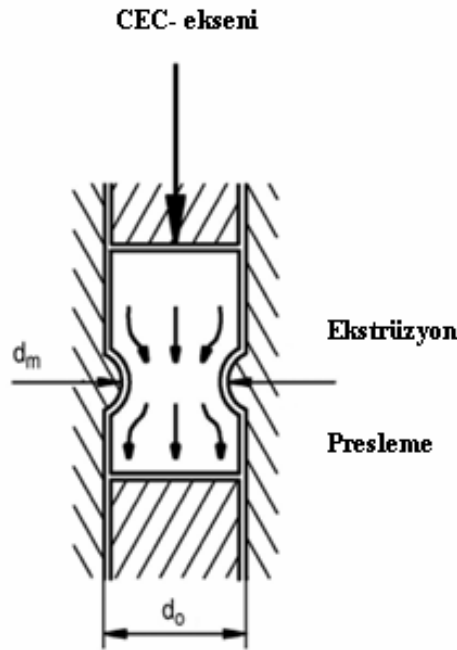
Bu aşırı plastik deformasyon yöntemi çeşitli metal malzemelerin üretiminde kullanılabilir. Bu malzemeler arasında alüminyum, titanyum, magnezyum, nikel ve çelik gibi malzemeler bulunur. Bu yöntem malzemelerin daha yüksek kaliteli, daha dayanıklı olması için ve daha hafif parçalar üretmek için kullanılır.

Yapılan bir çalışmada AA5083 alüminyum alaşımı Çok Yönlü Dövmeye maruz bırakılmış ve mekanik özelliklerindeki değişiklikler incelenmiştir. Oda sıcaklığında 4 paso olarak yapılan çok yönlü dövme işlemi küp şeklinde hazırlanmış numunelere 3 eksenle dövme şeklinde uygulanmıştır. İşlem ardından yapılan basma ve sertlik testleri neticesinde malzemenin 4 paso sonrasında basma dayanımının %44,3 oranında ve sertliğinin %55,5 oranında arttığı tespit edilmiştir (Akdoğan & Şahbaz, 2022).

Periyodik Ekstrüzyon

Kum saati presleme olarak da bilinen bu işlem diğer aşırı plastik deformasyon yöntemlerinden farklı olarak numune kalıptan çıkarılmadan çeşitli paso sayısında işlem görebilme imkânı sağlar. Periyodik ekstrüzyon işlemi silindirik bir numunenin, eş eksenli küçültülmüş bir dairenin içine preslenmesi şeklinde gerçekleştirilir (Şekil 4). İlk prestin sonra numune final pres denilen, numuneye başlangıçtaki pozisyonunu aldıracak bir preslemeye tabi tutulur.

Bu döngü numunenin kalıptan çıkarılmadan ardışık olarak preslenmesine ve böylece numune üzerinde yüksek bir gerilime sebep olmaktadır.



Şekil 4. Periyodik Ekstrüzyon (Arpaçay, 2009)

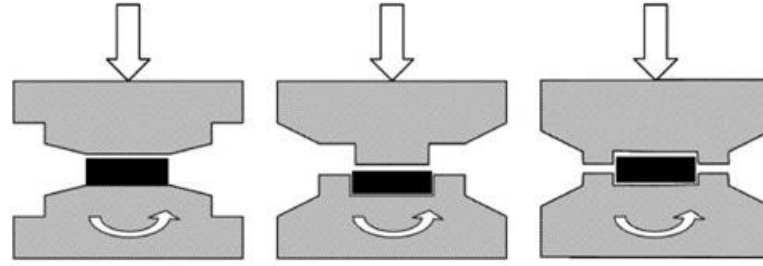
Burada $\Delta\epsilon$ gerilmeyi, d_0 numune çapını ve d_m numunenin içinden geçeceği daraltılmış çapı gösterir. Numunenin maruz kalacağı gerilim aşağıdaki şekilde formüle edilmiştir.

$$\Delta\epsilon=4\ln(d_0/d_m) \quad (2)$$

Periyodik Ekstrüzyon işleminin malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini

araştıran birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin AZ31 magnezyum alaşımının periyodik ekstrüzyon işlemi ile mekanik özelliklerindeki değişimler incelenmiş ve çalışmada, periyodik ekstrüzyon işlemi sonrası malzemenin çekme dayanımının ve malzeme tokluğunun arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, mikroyapı analizleri yapılarak malzemenin tanelerinin küçüldüğü ve homojen hale geldiği görülmüştür (Han *et al.* 2019).

Yüksek Basıncılı Burulma (HPT - High Pressure – Torsion)



Şekil 5. Yüksek basınçlı burulma (Zhilyaev & Langdon, 2008).

Disk şekilli bir numune karşılıklı iki kalıbın arasına yerleştirilir. Preslemeyle birlikte dönme uygulanarak numune üzerinde bir gerilim oluşturulur ve bu sayede malzemenin tane boyutunda küçülme meydana gelmesi beklenir. Karşılıklı kalıplardan birisi numuneyi dönmeye zorlarken diğer kalıp sabit kalır (Şekil 5). Eğer kalıplar arasına numune akışı olmaz ve numune kalınlığı değişmez ise gerilim 3 numaralı formülle hesaplanır.

$$\gamma = (r/h)\phi \quad (3)$$

γ gerçek gerilimi, ϕ burulma açısını, r diskin yarıçapını, h ise numune kalınlığını ifade eder. Fakat kalıplar arasındaki numunede malzeme kaybı ve numune kalınlığında bir değişiklik olduğu durumları düşünülerek;

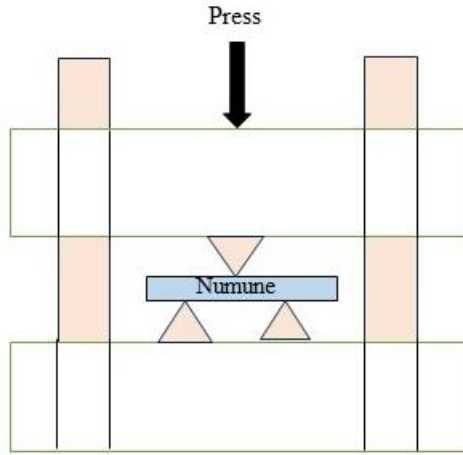
$$\epsilon = (1/a)\gamma \quad (4)$$

Formülü ile gerilim hesabı yapılabilir. Burada “a” Tresca ve Von Mises teorisine göre değişkenlik gösteren bir malzeme sabitidir.

Bu yöntem kullanılarak yapılan bir çalışmada Magnezyum AZ80(7,9Al-0,5Zn-0,2Mn%) alaşımının oda sıcaklığında çeşitli varyasyonlarla yüksek basınçlı burulma işlemi gören numunenin tane yapısı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada presleme 0-5 GPa, burulma ise 0-15 tam tur olarak uygulanmıştır. İşlem sonrası yapılan sertlik testlerinde ortalama 81 HV olan sertlik değerinin 125 HV değerine kadar çıktığı gözlemlenmiştir (Arpaçay, 2009).

Tekrarlayan Kıvrırma ve Doğrultma

Son yıllarda popüler hale gelen bu aşırı plastik deformasyon yöntemi, oluk açma ve düzleştirme olarak iki basamaktan oluşur. Tekrarlayan Kıvrırma ve Doğrultma işlemi iki kalıp parçası arasına yerleştirilen iş parçası preslenerek bir deformasyona tabi tutularak gerçekleştirilir (Şekil 6). Farklı işlem sayısı ile tekrarlanabilen bu işlem ardından numune düz tabakalar arasında düzeltilir. Malzemenin iç yapısında maruz kaldığı bu işlem sonrasında birtakım değişiklikler meydana gelir.



Şekil 6. Tekrarlayan Kıvrırma ve Doğrultma

Tekrarlayan kıvrırma ve doğrultma işlemi ile bakır ve alüminyum malzemelerde iç yapı nano mertebelerine kadar küçültülebilir. Kalıp tasarımı ve proses iyileştirmesi konularında geliştirilmeye ihtiyacı bir dezavantaj olsa da haddeleme işlemine uyum sağlayabilmesi büyük bir avantajdır (Valiev *et al.* 2016).

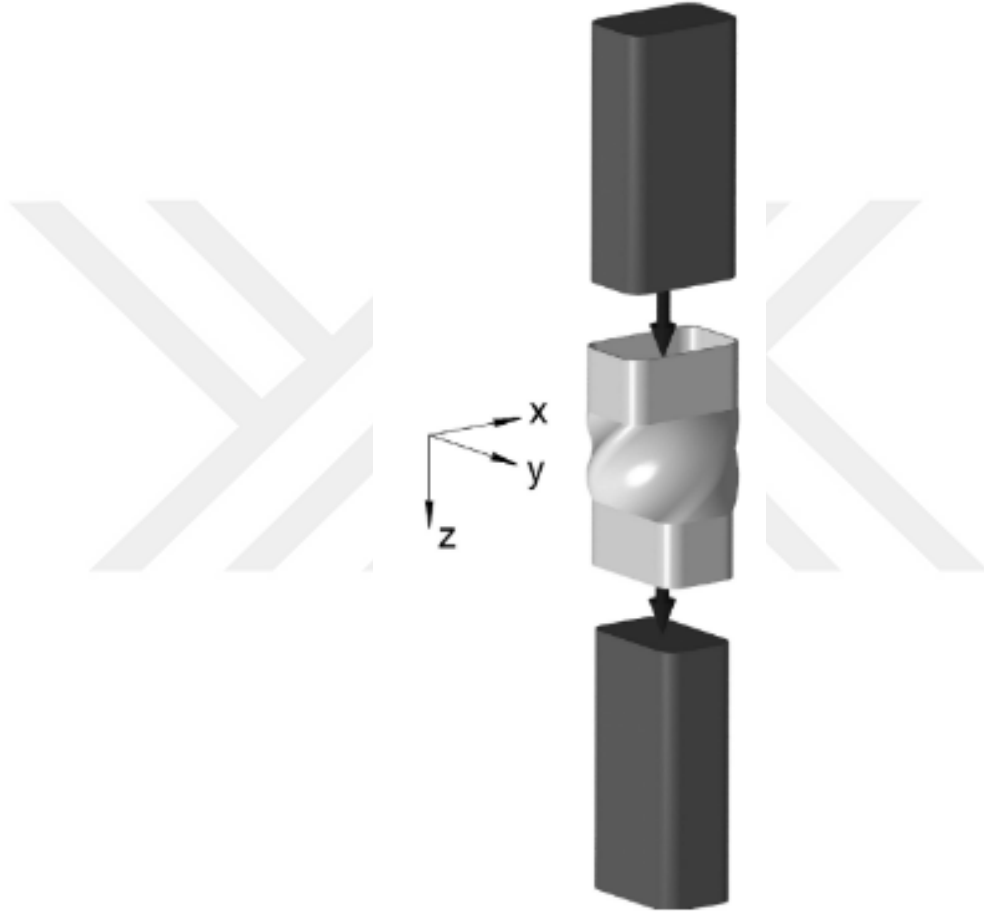
Tane boyutu küçülen numunenin mekanik özelliklerinde de iyileşme beklenir. Malzeme içerisindeki gerilme yoğunlaşmalarını azaltarak daha homojen bir gerilim dağılımı sağlanır. Bu durum ise malzemede çatlak oluşum direncinin artmasını sağlar. Ayrıca malzemenin daha ince yapılı ve homojen taneler oluşturması mukavemet değerinde bir artış meydana getirir. Tekrarlayan kıvrırma ile doğrultma işlemi çatlak oluşumunu engellemesi sebebiyle malzemenin yorulma ömrünü de uzatır. Bu işlem, malzemenin şekil değiştirme kapasitesi ve yüzey kusurlarını azaltması sebebiyle korozyon direnci özellikleri üzerinde de olumlu etkiler yaratır.

Bu metot kullanılarak yapılan bir çalışmada ticari saf alüminyum daha homojen bir yapı elde etmek için geçişler arasında 90° dönüşler ile tekrarlayan kıvrırma ve doğrultma işlemine 1 mm/dk presleme hızıyla tabi tutulmuştur. Ardından numuneye sertlik testi yapılmıştır. İşlem öncesi 32 BHN olan sertlik değeri işlem sonrasında en yüksek 42 BHN olarak tespit edilmiştir.

Ayrıca 4 geçişe kadar malzemede anlamlı mukavemet artışı gözlenmiştir (Rajinikanth *et al.* 2008).

Bükme Ekstrüzyon (Twist Extrusion)

Bükme Ekstrüzyon (Twist extrusion), malzeme özelliklerini iyileştirmek amacıyla metalik malzemelerin bükülmesi esasına dayanan bir işlemdir. Bu işlem, metallerde yüksek mukavemet, yüksek şekillendirilebilirlik ve yüksek yorulma dayanımı gibi özellikleri geliştirmek için kullanılır.



Şekil 7. Bükme ekstrüzyon (Beygelzimer *et al.* 2017)

Bükme ekstrüzyon işlemi, metal çubuğun önceden hazırlanmış bir matris içine yerleştirilmesi ve daha sonra matrisin döndürülmesi esasına dayanır (Şekil 7). Bu dönme işlemi, çubuğun çevresinde bir sürtünme kuvveti oluşturur ve malzemenin matrisin kanalları boyunca akmasını sağlar. Matrisin dönmesi sırasında, malzeme bükülmüş ve akışkan hale gelir, bu da malzemeyi düzleştiren bir etki yaratır. Bu işlem, malzeme mikro yapısında değişikliklere ve mukavemetinde artışa neden olur.

Bükme ekstrüzyon işlemi, malzemelerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir. İşlem, malzeme mukavemetini, sertliğini, yorulma dayanımını ve

şekillendirilebilirliğini artırabilir. Özellikle alüminyum, magnezyum ve bakır gibi malzemeler için uygundur. Bununla birlikte, işlemin olumsuz bir yanı işlem sırasında malzemede ısınma ve termal gerilmelere maruz kalması ile birlikte çatlaklara ve kusurlara neden olabilmesidir.

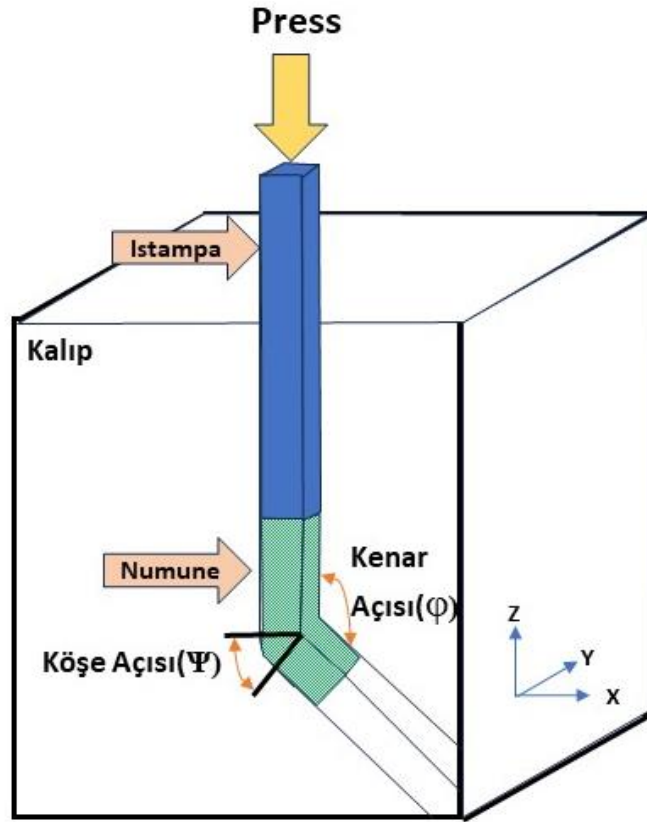
Eşit Kanallı Açısal Presleme (Equal Channel Angular Pressing)

Eşit Kanallı Açısal Presleme, özellikle son yıllarda Aşırı Plastik Deformasyon türleri içerisinde en dikkat çekici yöntemlerden biri haline gelmiştir. EKAP işleminin bu denli dikkat çekici hale gelmesi malzeme mekanik özelliklerini iyileştirmesinin yanı sıra uygulama sonrasında malzeme kesitinde değişikliğe sebep olmamasından kaynaklanır. İşlem eşit kesitli kesişen iki kanalın içerisinden malzemenin çeşitli tekrarlarla geçirilmesinden ibarettir. Maruz kaldığı plastik deformasyon sebebiyle malzeme iç yapısında birtakım değişiklikler meydana gelir. Bahse konu bu değişiklikler malzeme iç yapısında tane boyutunun incelmesi, tane sınırı açısının artması ve tane sınırlarının dengesiz bir duruma dönüşmesidir. Bu durum ise malzeme mekanik özelliklerine; yüksek akma, düşük deformasyon sertleşmesi, süneklik değerinde artış gibi olumlu etkiler doğurmaktadır (Segal, 1995).

EKAP işleminde tane boyutu sıcaklık değişikliğinden etkilenmekle beraber düşük sıcaklıklarda mukavemet değeri çoğunlukla 1 numaralı formülde verilen Hall-Petch eşitliğiyle hesaplanır (Hall, 1951; Petch, 1953).

Eşit Kanallı Açısal Presleme işlemi eşit kesite sahip iki kanallı bir kalıp ile gerçekleştirilir (Şekil 8). İşlemin belirleyici parametrelerinden kenar ve köşe açısı kalıp tasarlanırken belirlenir. Kenar ve köşe açılarının derecesi numunenin maruz kalacağı gerilmeye doğrudan etki eder.

Malzemenin kalıba yerleştirilmesi ile işlem başlar. Malzeme bir ıstampa (plunger) vasıtası ile hidrolik pres altında ittilir. Numune kenar açısı ile belirtilen ϕ ve karşı köşe açısı Ψ olan dirsekten dönerken plastik deformasyona maruz kalacak ve bu sebeple tane boyutunda küçülme meydana gelecektir.



Şekil 8. EKAP düzeneği

EKAP işleminin yapılacağı kalıbın tasarımı, eşit kesitteki iki kanalın köşe ve kenar açılarının belirlenmesiyle başlar. Kullanılacak malzemeye göre işlem sıcaklığı, paso sayısı ve pasolar arasında malzemenin giriş pozisyonunun belirlendiği rotanın tespit edilmesiyle işlem uygulanır. Numune köşeyi dönmeye zorlanırken plastik deformasyona maruz kalır. Farklı rotalarda işlem yapmak farklı kayma sistemlerini aktif eder. Bu işlemin tekrarlı bir şekilde yapılması malzemeye uygulanan gerilmeyi arttırmakta ve tane boyutunda nano mertebelerinde bir yapı elde edilebilmektedir(Huang & Langdon, 2013).

EKAP işlemi ile malzeme üzerindeki toplam şekil değişiminin tahmini aşağıdaki eşitlikle yapılır.

$$\epsilon_n = N/\sqrt{3} [2 \cot(\phi/2 + \Psi/2) + \Psi \csc(\phi/2 + \Psi/2)] \quad (6)$$

Burada ϵ_n şekil değişimini, n tekrar miktarını, ϕ kenar açısını ve Ψ köşe açısını göstermektedir(Iwahashi *et al.* 1996).

Sonuç olarak EKAP, birçok malzeme için tane boyutunun işlemsiz numuneye göre daha küçük boyutlara ulaşmasına sebep olan dislokasyonların yeniden düzenlenmesi ile mekanik özelliklerin iyileştirilmesini sağlamayan bir aşırı plastik deformasyon yöntemidir.

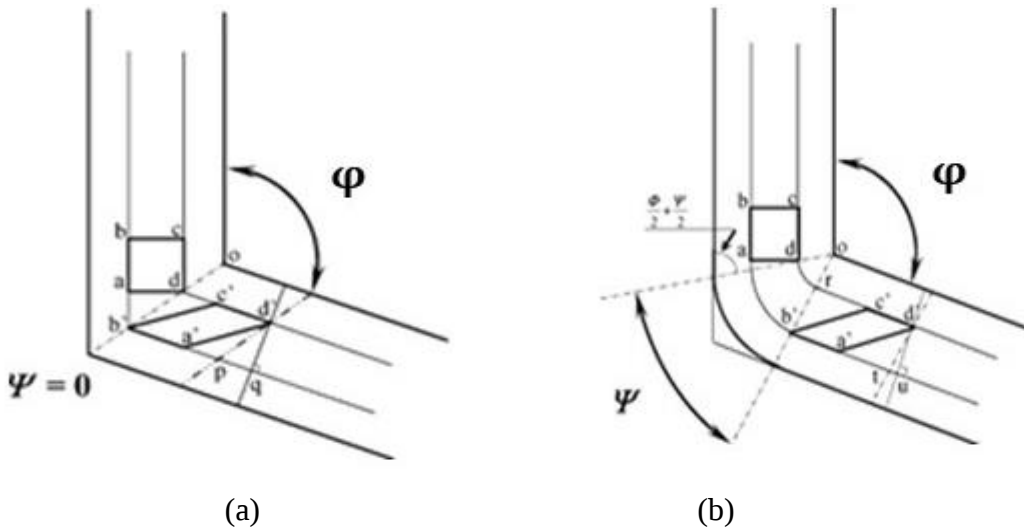
Eşit kanallı açısız preslemeye etki eden parametreler

Eşit kanallı açısız presleme işlemine etkiyen birçok parametre vardır. Bu parametreler malzemenin tane boyutundaki değişim, içyapıdaki yönelimler, dislokasyon hareketleri gibi mekanik özellikler üzerinde değişiklik yaratabilecek faktörleri doğrudan etkiler. Sırasıyla incelendiğinde;

Kenar açısı ve köşe açısı etkisi

Kenar açısı malzeme üzerine etkiyen gerilmeye ve dolayısıyla malzeme şekil değişimine olan etkisiyle EKAP işlemindeki en önemli parametrelerden birisidir. Kenar açısının artmasıyla malzemenin plastik şekil değişim oranı düşer. Yapılan bir çalışmada çeşitli kenar açılarıyla (90° - $112,5^\circ$ - 135° - $157,5^\circ$) EKAP işlemi tekrar edilmiş ve kenar açısının işleme etkisi incelenmiştir. Tüm kenar açılarında gerilmeye maruz kalan malzemelerde toplam şekil değişimi benzerlik göstermiştir. Fakat 90° kenar açılı kalıpla yapılan işlem sonucunda ince tane yapısına sahip, yüksek açılı tane sınırları ile ayrılmış homojen bir içyapı gözlenmiştir (C. W. Su *et al.* 2006).

EKAP üzerine yapılan çalışmalar arttıkça kenar ve köşe açılarının önemi daha net anlaşılmış ve bu konuda araştırmalara hız verilmiştir. Malzemenin EKAP kalıbından her geçişinde üzerine yüksek bir gerilme etki eder. Bu gerilmenin boyutu kenar ve köşe açılara göre değişkenlik gösterir (Şekil 9). İki boyutlu çizim üzerinden analitik bir yaklaşım kullanılarak malzemenin maruz kalacağı gerilmeyi tahmin etmek için 2 farklı yaklaşım kullanılmıştır (Iwahashi *et al.* 1996).



Şekil 9. Kenar ve Köşe Açılarının EKAP Prosesine Etkisi (Iwahashi *et al.* 1996)

Köşe açısının $\Psi=0^\circ$ olduğu durum Şekil 9 (a) çiziminde ve $0 < \Psi < (\pi - \phi)^\circ$ olduğu durum ise Şekil 9 (b) çiziminde gösterilmiştir. Bu iki yaklaşım, geçiş sırasında sürtünmenin olmadığı

varsayımıyla yapılmıştır. $\Psi=0^\circ$ olduğu Şekil 9 (a) durumunda numune içerisinde bir kesiti temsil eden abcd kesiti geçiş sonrasında a'b'c'd' paralelkenara dönüşür. Buradan yola çıkarak;

$$\gamma=2\cot(\varphi/2) \quad (7)$$

Formül 7'deki gerilme ortaya konulmuştur. Fakat bu yaklaşımda köşe açısı değeri dikkate alınmadığından şekil değişimini doğru tahmin etmesi beklenemez (Iwahashi *et al.* 1996).

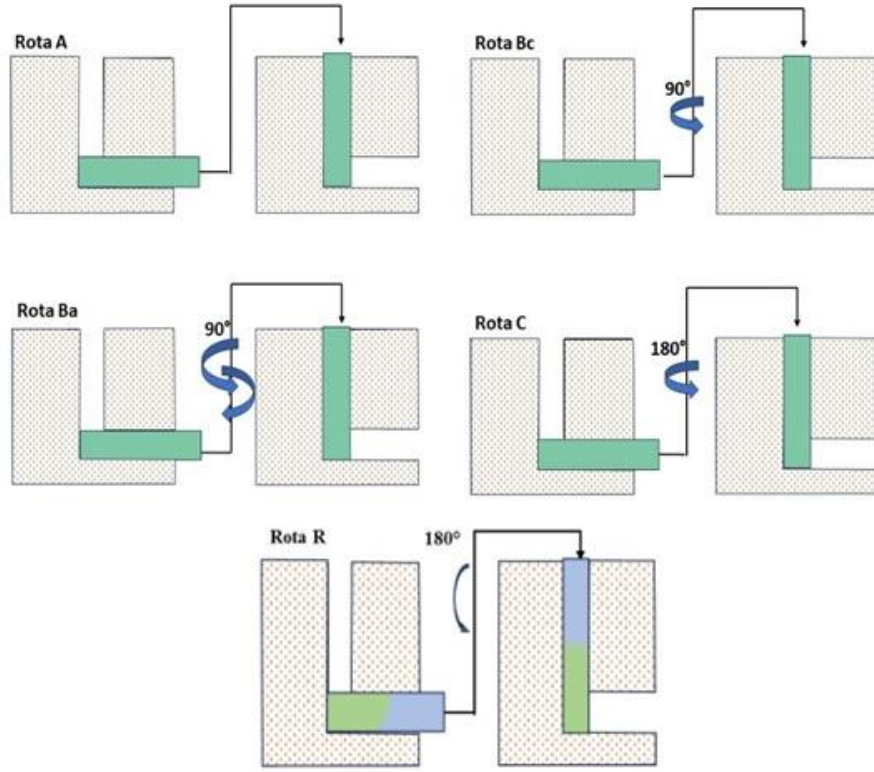
Benzer bir yaklaşım ile Şekil 9 (b) çiziminde köşe açısının denkleme dahil edilmesiyle;

$$\gamma=2\cot(\varphi/2+ \Psi/2)+ \Psi \operatorname{cosec} (\varphi/2+ \Psi/2) \quad (8)$$

Formül 8 ortaya çıkmıştır. Sonuçta “n” paso sayısı ile uygulanan EKAP işleminde gerilme üzerine etki eden kenar açısı ve köşe açısı ilişkisi Formül 6'daki gibi ifade edilebilir (Iwahashi *et al.* 1996).

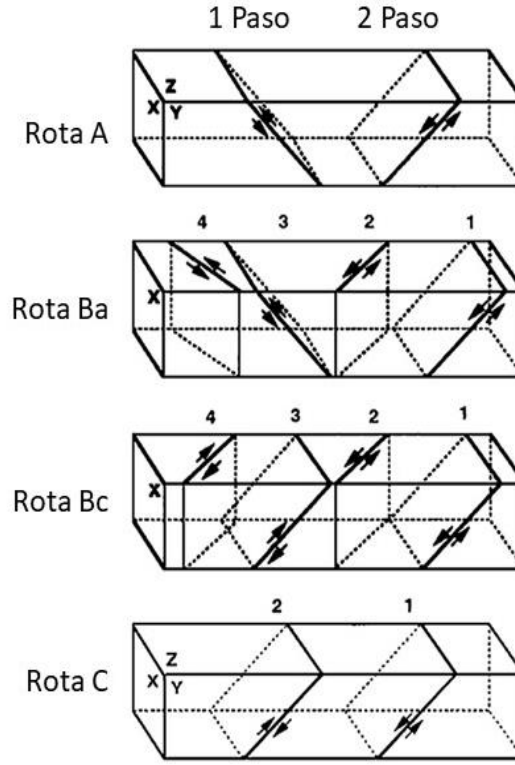
Presleme rotaları etkisi

EKAP işleminde tekrarlı preslemenin mümkün olması eşit kanallı açısız preslemenin önemli avantajlarından birisidir. Tekrar eden preslerde malzemenin iç yapısında farklılıklara yol açan ve farklı kayma sistemleri meydana getiren dört temel rota vardır. Bu işlem basitçe numunenin presleme eksenini etrafında döndürülmesi ve tekrar preslenmesi şeklinde gerçekleştirilir. Bu dört farklı rota aşağıdaki şekille gösterilmiştir. Burada A rotasında her presleme, malzemenin yönü değiştirilmeden yapılır. EKAP işlemi; Ba rotasında her presleme geçişinde numunenin 90° döndürülmesi bir sonraki presleme işleminde ilk pozisyonuna gelecek şekilde 90° döndürülmesi, Bc rotasında her geçişte belirlenen bir yönde (saat yönü veya tersi) 90° döndürülmesi, C rotasında ise her geçiş arasında malzeme 180° döndürülmesi şeklinde yapılır. Çalışmamızda denediğimiz farklı bir rota olan R rotasında numune EKAP presleme yönünde 180° döndürülerek işleme tabi tutulmuştur (Şekil 10).



Şekil 10. EKAP presleme rotaları

EKAP işleminde numunenin içyapısında ve mekanik özelliklerinde meydana gelecek değişiklik rota ve paso sayısı ile doğrudan ilişkilidir. Ayrıca her bir rotada yapılacak paso sayısı ile malzemenin kayma karakteristiğinde değişiklik gözlenebilir. Rota ve paso sayısına göre kayma karakteristiğini gösteren şekil aşağıdaki gibidir (Şekil 11).



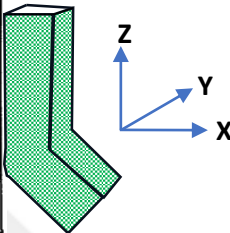
Şekil 11. Rotalara göre kayma düzlemleri (Furukawa *et al.* 2001)

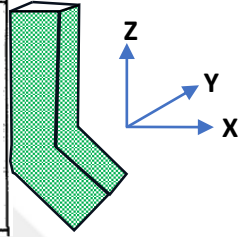
Rota A'da 90° lik 2 düzlemde kesme gözlenirken, Rota Ba ve Rota Bc'de 4 kayma düzleminin 120° lik bir açıyla meydana geldiği görülmektedir. C rotasında ise sabit bir kayma düzlemi üzerinde mikroyapıyı değiştirmek amaçlanır (Şekil 11).

Presleme sayısı etkisi

EKAP işleminde paso sayısı, malzemenin etkisi altında kaldığı tekrar eden kayma gerilmesi sebebiyle içyapıdaki tane boyutu ve mekanik özellikler üzerinde etkili parametre olma özelliğine sahiptir. Her bir pasoda malzemede farklı yönelimlerde dislokasyonlar meydana gelmektedir. Paso sayısının artması mikroyapıda tanelerin düşük açılı tane sınırından yüksek açılı tane sınırına evrilmesine sebebiyet verir (Şekil 12).

Rota	Düzlem	Presleme (Paso) Sayısı									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	
A	X										
	Y										
	Z										
B _A	X										
	Y										
	Z										
B _C	X										
	Y										
	Z										
C	X										
	Y										
	Z										





Şekil 12. Farklı paso sayılarına göre kayma düzlemleri (Furukawa *et al.* 2001)

Presleme sıcaklığı

Sıcaklık akma gerilmesini doğrudan etkileyen bir parametre olduğundan tüm plastik deformasyon yöntemlerinde olduğu gibi bir APD türü olan EKAP için de kritik öneme sahiptir. Genellikle malzemelerde sıcaklık arttıkça plastik deformasyona direnç düşer. Böylece malzeme daha kolay şekillendirilebilir.

Malzemelerin yüksek sıcaklıkta preslenmesi işlenebilirlik üzerinde olumlu bir sonuca sebep olsa da işlem sıcaklığını optimum bir seviyede tutmak ince taneli yapı ve daha iyi mekanik özellikler elde edebilmek için önemlidir. Düşük presleme sıcaklığı malzemede çatlakların oluşmasına, yüksek presleme sıcaklığı ise içyapıdaki tane boyutu ve tane sınırlarının açısı üzerinde olumsuz etkilere sebep olabilir (Sha *et al.* 2009).

Presleme hızı

Presleme hızının numune üzerindeki doğrudan etkisinden ziyade EKAP işleminin düzgün bir şekilde yapılabilmesi; kalıbın, ıstampanın ve numunenin hasar görmemesinin sağlanması açısından önemi vardır. Bunu sağlamak için genellikle düşük presleme hızları

seçilmelidir (Yu *et al.* 2015). Presleme hızı ile ilgili yapılan çalışmalar genellikle kalıp performansını gözlemlemek için yapılmıştır. Kalıbın tasarımına, numuneye, işleme etki eden diğer parametrelere göre değişkenlik göstermekle beraber presleme hızı arttıkça; numunenin hızlı deformasyona uğramasından kaynaklı kalıp kanalı içerisinde kaymasına, kalıp yüzeylerine sızmasına sebep olabildiği ayrıca numunenin deformasyon sertleşmesi sebebiyle presleme basıncını arttırabildiği bilinmektedir (Güral *et al.* 2011).

ZN-AG-CU

Zn ve Alaşımları

Çinko (Zn), demir dışı metaller arasında en çok kullanılan metallerden birisidir. Yer kabuğunda en çok bulunan 23. elementtir. Kolay bir şekilde alaşım yapabiliyor olması sebebiyle Çinko (Zn) endüstride pek çok bileşik ve alaşımın üretiminde kullanılır. Metallerin aşınmaya karşı korunması gerektiği durumlarda ve korozyona karşı bir önlem olarak galvanizleme işleminde Çinko (Zn) kullanılır. Ayrıca pillerde, madeni para yapımında ve otomotiv sektöründe kullanımı mümkündür.

Çinko (Zn) bir geçiş metalidir. Oda sıcaklığında katı fazda bulunan çinkonun bazı önemli özellikleri aşağıdaki gibidir.

Tablo 1. Çinkonun (Zn) Yapısal Özellikleri

Atom Numarası	30
Atom Ağırlığı	65,38
Özgül Ağırlık	7,134 g/cm ³
Ergime Sıcaklığı	420°C
Buharlaşıma Sıcaklığı	907°C
Kristal Yapı	Hegzagonal

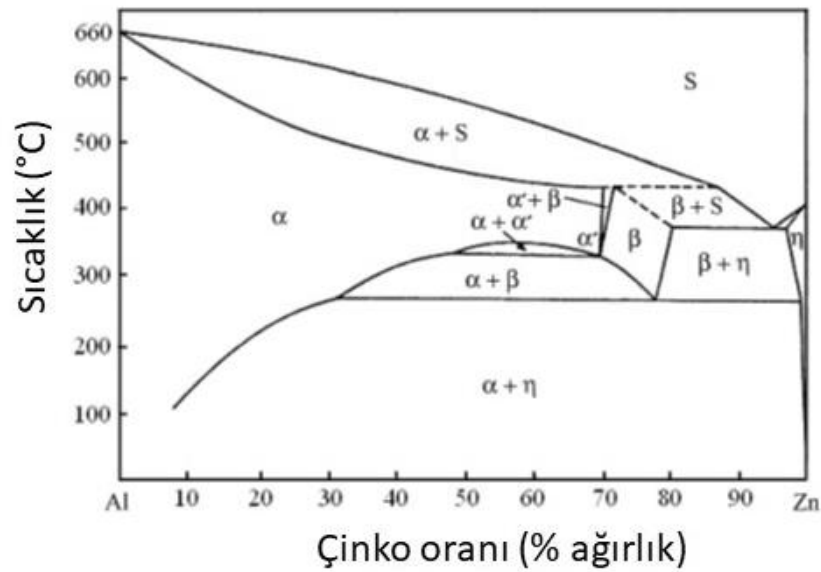
Çinko cevherinin çıkarılma işlemi; açık ocak, kapalı ocak ve her iki sistemin bir arada işlediği yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu ocaklardan elde edilen cevher ilk aşamada ergitilecek zenginlikte olmadığından konsantre edilerek ergitilir. Çinko, parlak mavimsi bir renge sahip, oldukça reaktif bir metaldir. Oda sıcaklığında gevrek olan yapısı, 110-150°C arası sıcaklıklara çıkarıldığında, sünek bir hale dönüşür. Çinko doğada kendiliğinden oluşur ve beş izotopa sahiptir.

Tüm bu kullanım alanlarının haricinde çinkoyu değerli yapan bir diğer konu ise insan vücudunda ihtiyaç duyulan bir element olmasıdır. İnsan vücuduna yönelik başlıca kullanım alanları; cildin su kaybını engellemek amacıyla bazı merhemlerin bileşiminde, güneş ve soğuk

yanıklarında koruyucu olarak kullanılan kremlerde, göz hastalıklarının tedavisinde şeklinde sıralanabilir. Çinko alımının yeterli olmadığı durumlarda iştah azalma, tat ve koku algısında azalma, yaraların geç iyileşmesi gibi olumsuz durumlarla karşılaşılabilir. Ayrıca çinko eksikliğinin doğum kusurlarına bile sebep olabildiği bilinmektedir (Thavarajah *et al.* 2009). Mekanik mukavemetlerinin düşük olması ve sünek olmaları bir dezavantaj olsa da alaşımlama ile bu dezavantajlar giderilebilir. Bu durum çinkoyu, kardiyovasküler ve ortopedik uygulamalar için elverişli kılmaktadır (Y. Su *et al.* 2019).

Çinkonun en çok kullanılan alaşımları bakır (Cu) ve Alüminyum (Al) ile yaptığı alaşımlardır. Bakır-çinko alaşımının bilinen ismi pirinçtir. %1 ile %50 arasında çinko içeren bu alaşım çinko oranına göre farklı özellikler gösterir. Pirinç, mukavemet değerinin yüksek oluşu, kolay şekil verilebilmesi, uygun fiyatı gibi sebeplerle geçmişten beri yaygın olarak kullanılan bir alaşım olmuştur. Pirincin içerisine çeşitli elementler (kurşun, mangan, silisyum gibi) katılarak farklı alanlarda kullanımı sağlanabilir (Kesici, 2006).

Alüminyum (Al)- çinko (Zn) alaşımında ise alaşım içerisindeki çinko; mukavemet, sertlik, işlenebilme kapasitesini iyileştirmede rol alır. Alüminyum-çinko alaşımının özellikleri, Şekil 13'te görüldüğü üzere çinko oranının içyapıda değiştirdiği faz durumuna göre değişkenlik göstermektedir. Diyagramda çinko oranının artışıyla monotektoid, peritektik, ötektoid ve ötektik faz dönüşümlerinin gerçekleştiği görülmektedir. Alaşımların mekanik özelliklerindeki değişim bu faz dönüşümleri, faz dönüşümleri ise çinko oranındaki değişim ile meydana gelmektedir (Hekimoğlu & Turan, 2019).



Şekil 13. Zn-Al Faz Diyagramı (Kuznetsov *et al.* 1986)

Mg ve alaşımları

Magnezyum (Mg) doğada gümüş beyazı renginde bulunur. Magnezyum saf halde iken

düşük mukavemet ve tokluk değerlerine sahip olsa da Mg alaşımları hafif olmaları ve mukavemetlerinin yüksek olması sebebiyle savunma sanayi, otomotiv gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılır. Toz halindeyken kolayca tutuşturulabilmesi, parlak bir alevle yanması sebebiyle fotoğraf makinelerinin flaşında kullanılır.

Hafif alkali toprak metali olan ve doğada genellikle mineral ve bileşiklerde bulunan Magnezyumun yapısal özellikleri aşağıdaki gibidir (Tablo 2).

Tablo 2. Magnezyumun (Mg) Yapısal Özellikleri

Atom Numarası	12
Atom Ağırlığı	24,312
Özgül Ağırlık	1,738 g/cm ³
Ergime Sıcaklığı	650°C
Buharlaşma Sıcaklığı	1090°C
Kristal Yapı	Hegzagonal

Magnezyum yoğunluğu oldukça düşük hafif, iyi iletken, oksidasyona karşı hassas bir elementtir. Mg alaşımları birçok sektörde etkili bir biçimde kullanılmaktadır. Bazı yaygın kullanılan alaşımları şunlardır;

Magnezyum- Alüminyum alaşımı: Hafifliği, yüksek mukavemeti ve düşük yoğunluğu nedeniyle otomobil ve uçak endüstrilerinde yaygın bir şekilde kullanılır. Otomotiv alanında Mg alaşımları kullanılarak otomobillerin ağırlıkları yapısal özelliklerini kötüleştirmeden önemli oranda azaltılabilmektedir.

Magnezyum- Çinko alaşımı: Dayanıklılık, korozyon direnci gibi özellikleri ile öne çıkan bu alaşım savunma sanayi ve elektronik cihazlarda kullanılır.

Magnezyum-Manganez alaşımı: Yüksek sıcaklıklarda özelliklerini koruyabilen bu alaşım aynı zamanda hafif olmasından dolayı havacılık ve uzay endüstrilerinde kullanılır.

Magnezyum-Çelik alaşımları: Yüksek mukavemet ve hafifliği bir arada sunan bu alaşım savunma sanayi ve otomotiv sektöründe kullanılır.

Ag ve alaşımları

Gümüş (Ag) parlak beyaz renkli bir metaldir. İletkenliği yüksektir ve ışığı çok iyi yansıtır. Saf haliyle de kullanılabilmeyle birlikte kullanım sahasına göre dayanıklılığını ve sertliğini arttırmak için alaşımları da tercih edilebilir.

Oda sıcaklığında katı fazda bulunan gümüşün bazı özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Gümüşün (Ag) Yapısal Özellikleri

Atom Numarası	47
Atom Ağırlığı	107,87 g
Özgül Ağırlık	10,5 g/cm ³
Ergime Sıcaklığı	961,78°C
Buharlaşma Sıcaklığı	2162°C
Kristal Yapı	Yüzey Merkezli Kübik (YMK)

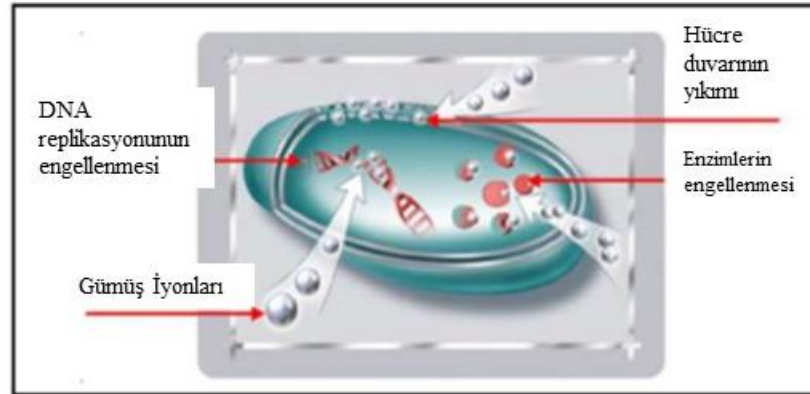
Gümüşün yaygın kullanılan bazı alaşımları şunlardır:

Gümüş-Nikel: Genellikle ziynet eşyası, mutfak gereçleri ve para üretiminde kullanılır.

Gümüş-Kadmiyum: Pil üretiminde kullanılır. Fakat kadmiyumun toksik etkisi, bu alaşımın kullanımını azaltmıştır.

Gümüş-Çinko: Takı ve mücevherlerin üretiminde kullanılır. Bu alaşımda gümüş kendi özelliklerini korurken çinko maliyeti düşürmek için alaşıma dahil edilir.

Gümüş, biyomalzeme olarak kullanılan malzemeler için önemli bir elementtir. Gümüş (Ag) biyobozunur implantlarda Magnezyumun ana alaşım elementi olarak alaşıma katılır. Gümüşün alaşımdaki görevi bakterilerin DNA ve RNA yapısını bozmak bu sayede yaşamasını, çoğalmasını engellemektir. Bu özelliği sebebiyle gümüşün son yıllarda sağlık alanında kullanımı artmıştır (Tie *et al.* 2013).



Şekil 14. Gümüş iyonunun antibakteriyel etkisi (Klein, 1978)

Şekil 14'te gümüş iyonunun antibakteriyel etkisinin çalışma prensibi görselleştirilmiştir. Gümüş iyonları hücre duvarına girmeye çalışır. Ardından bakterinin solunum fonksiyonunu keser ve yaşamasını engellemek için bakterinin DNA'sını yok eder.

Çalışmada Zn-Ag-Cu alaşımının kullanılmasının temel sebebi alaşımın elementlerinin biyomalzeme olarak kullanıma uygun olmasıdır. Alaşımın mekanik özelliklerinin iyileştirmeye muhtaç olması bir dezavantaj olsa da yapılan aşırı plastik deformasyon işlemi ile alaşımın

mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede ayrı ayrı incelendiğinde biyouyumluluğu iyi görünen elementlerden elde edilen Zn-Ag-Cu alaşımının içyapısındaki tane boyutu küçültülerek daha iyi mekanik özelliklerin elde edilmesi ve malzemenin insan vücudunda daha uzun ömürlü bir hale getirilmesi amaçlanmıştır.

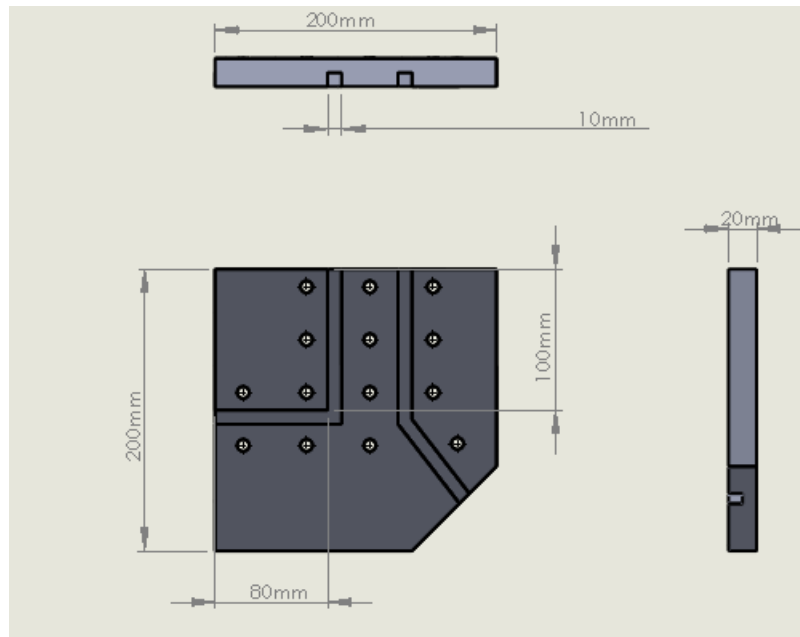


MATERYAL VE METOT

Bir biyomalzeme olan Zn-Ag-Cu alaşımının aşırı plastik deformasyon ile mekanik özelliklerinin iyileştirilmesini konu alan bu alışma, Solidworks programı ile iki farklı kenar açısına sahip kalıp tasarımı yapılarak başlatılmıştır. Ardından yapılan Simufact FEM analizleri ile kalıbın ve numunenin EKAP performansı incelenmiştir. Analizler sonucunda herhangi bir problemle karşılaşılmadığı görüldüğünden kalıp imalatı yapılmıştır. Ardından işlem sıcaklığı, yağlayıcı, işlem rotası, presleme hızı gibi diğerk parametreler FEM analizi ile belirlenerek EKAP işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlem görmemiş ve işlem görmüş numunelerin tane boyutu farkını incelemek için Elektro-parlatma yöntemi ile yüzey kalitesi arttırılarak optik mikroskop ile görüntüler alınmış ve kıyaslanmıştır. Sertlik, çekme, aşınma direnci ve korozyon gibi özelliklerdeki farklılıklarda deneyler yapılarak kıyaslanmıştır.

Kalıp Tasarımı

Çalışmanın malzeme mekanik özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra bir optimizasyon çalışması olması sebebiyle en doğru kenar açısı, rota ve paso sayısının belirlenmesi amaçlanmıştır. Kalıp maliyetini düşürmek için tek bir kalıpta iki farklı kenar açısıyla işlem yapabilme imkânı tanıyan bir kalıp tasarımı yapılmıştır. İşlemin çok sayıda tekrar eden preslemeler gerektirmesi sebebiyle kalıbın sökülebilir olması ve numunenin kolay çıkarılabilir olması da tasarımda göz önünde bulundurulmuştur.

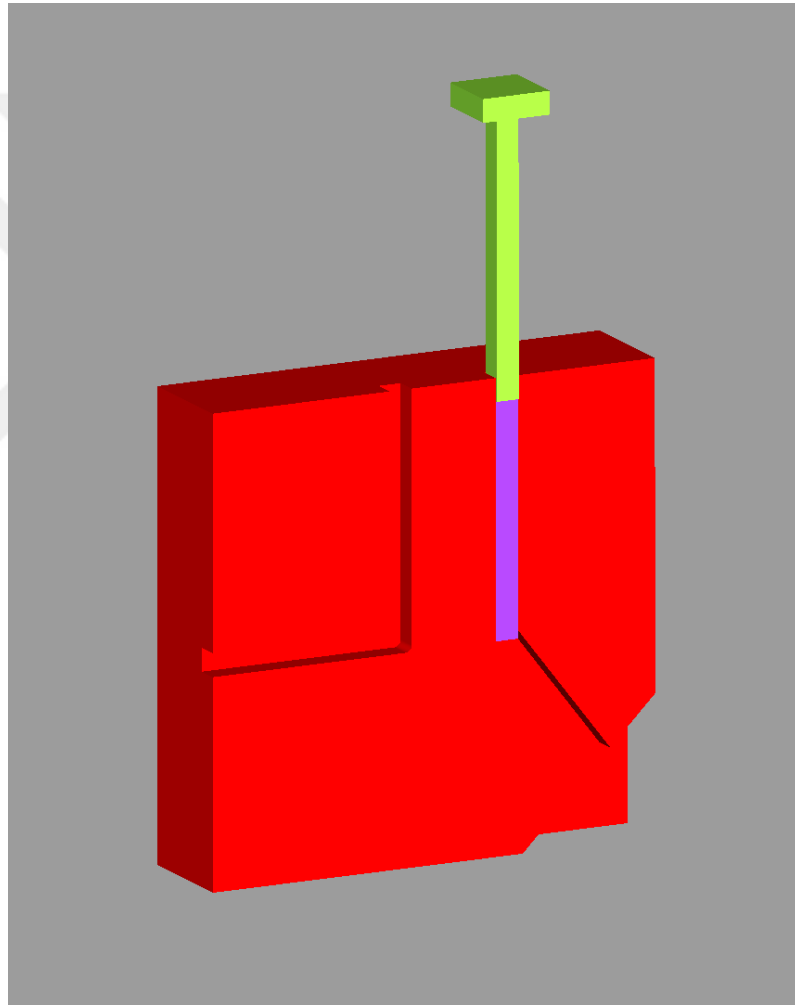


Şekil 15. EKAP kalıp tasarımı teknik resim

90° ve 135° kenar açılı iki farklı presleme yoluna sahip kalıp tasarımı sayesinde tek bir kalıp tasarlanarak kalıp imalat maliyeti düşürülmüştür. Yardımcı kalıp ile ana kalıpta; presleme yolları istikametinde vida delikleri açılmıştır. Bu sayede iki kalıp vidalarla birbirine sıkıca bağlanabilir hale getirilmiştir. Böylece kalıp bağlandığı zaman preslenen numunenin kalıbın iki parçası arasına sızması engellenmiştir (Şekil 15).

Istamba Tasarımı

EKAP kalıbına yerleştirilen numuneyi presleyebilmek için kanal kesitine uygun ölçüler kullanılarak kare kesitli bir ıstamba tasarımı yapılmıştır (Şekil 16). Hidrolik pres altında yükün düzgün dağılabilmesi için ıstampanın üzerine daha geniş kesitli kare bir parça monte edilmiştir.

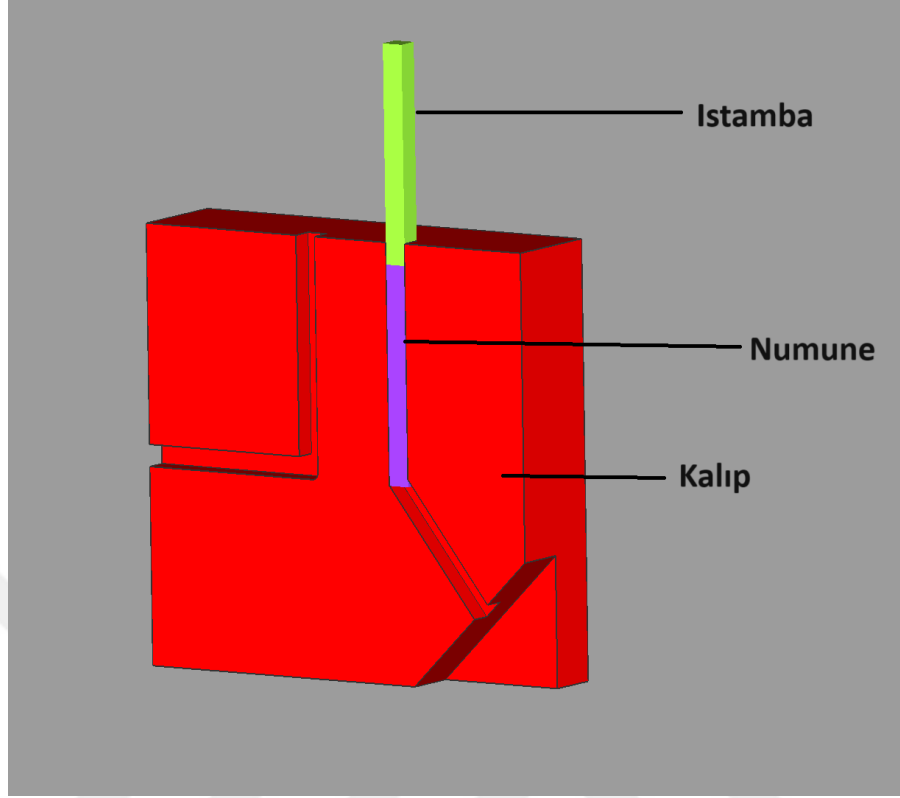


Şekil 16. Istampa tasarımı

Analizler

EKAP işlem parametrelerini doğrulamak amacıyla Simufact Forming programı kullanılmıştır. Bu program plastik deformasyona tabi tutulan malzemelerin sonlu elemanlar analizini yapabilme kabiliyetine sahiptir. Solidworks üzerinden çizimi yapılan kalıplar Simufact Forming programına aktarılmıştır. Sürtünme coulomb 0,15 kabul edilmiştir. Mesh

işlemi yüzey ağı olarak yapılmıştır. Her bir eleman boyutu 0,33 mm olup ve eleman sayısı 209667 dür (Şekil 17).

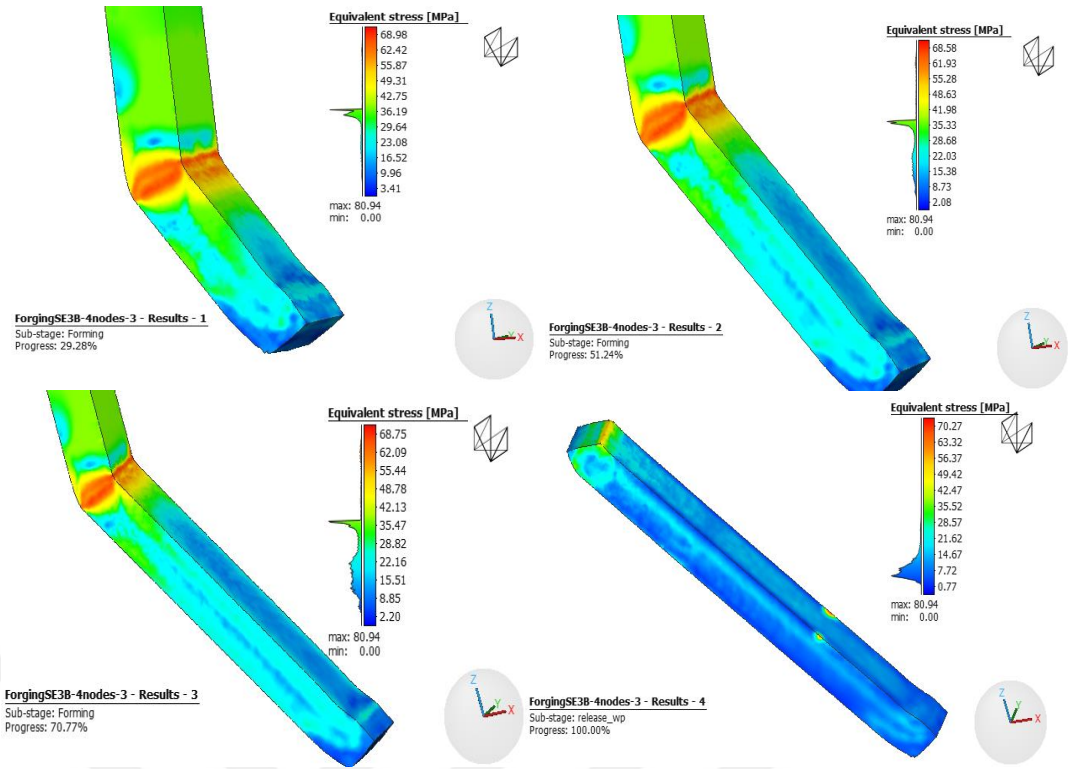


Şekil 17. EKAP analiz

Tablo 4. Simufact FEM Analiz Parametreleri

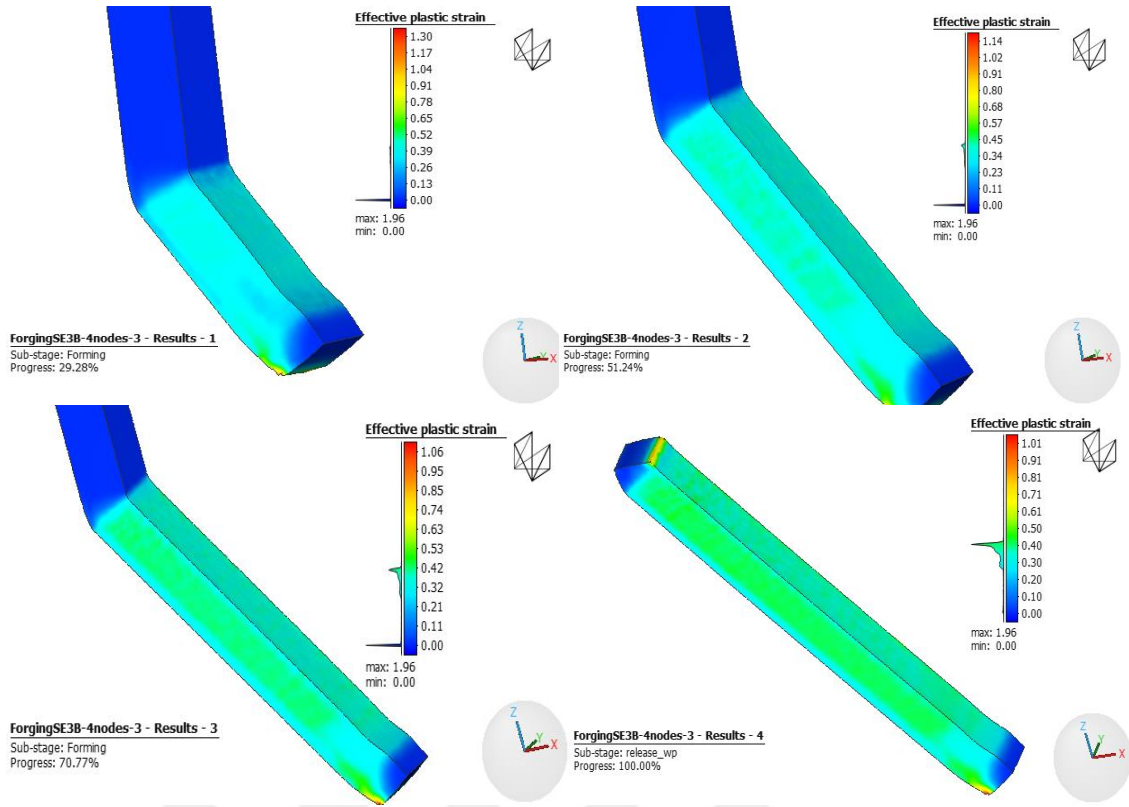
Kenar Açısı	Köşe Açısı	Kalıp Sıcaklığı	Numune Sıcaklığı	Presleme Hızı
135°	20°	20°C	20°C	2 mm/sn

Analizlerde kullanılan parametreler Tablo 4’te verilmiştir.



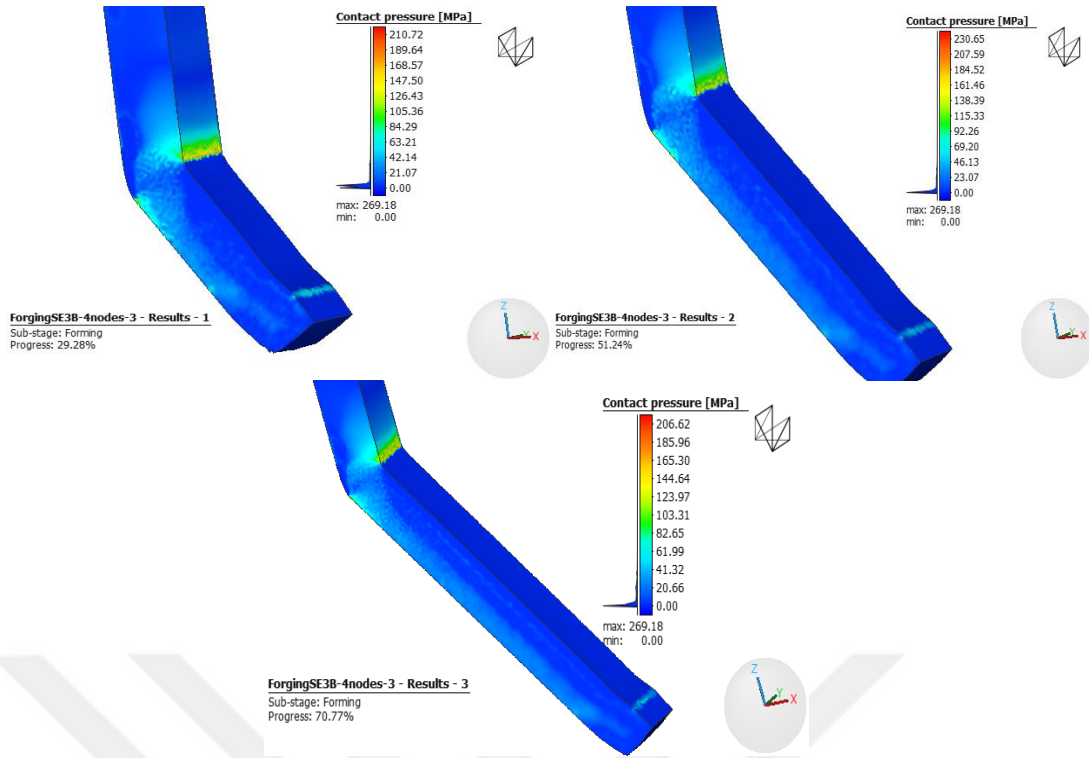
Şekil 18. $\phi=135^\circ$ kenar açısında %30, %50, %70, %100 ilerleme eşdeğer gerilme

%30 ilerleme sonucunda 135° kenar açısıyla yapılan EKAP işleminde en yüksek eşdeğer gerilme yaklaşık 28,98 MPa, %50 ilerleme sonucunda bu değerin 68,58 MPa olduğu, %70 ilerlemede 68,75 MPa ve %100 ilerleme sonucunda eşdeğer gerilme değerinin 70,27 MPa olduğu görülmüştür. En yüksek gerilmelerin numunenin EKAP kanalından çıkış noktasında meydana geldiği görülmektedir. Eşdeğer gerilmelerin tüm ilerleme oranlarında benzer sonuçlar verdiği bu durumun numunenin EKAP işlemine maruz kalan yüzeyin tamamında aynı plastik deformasyon etkisini yarattığı görülmektedir (Şekil 18).



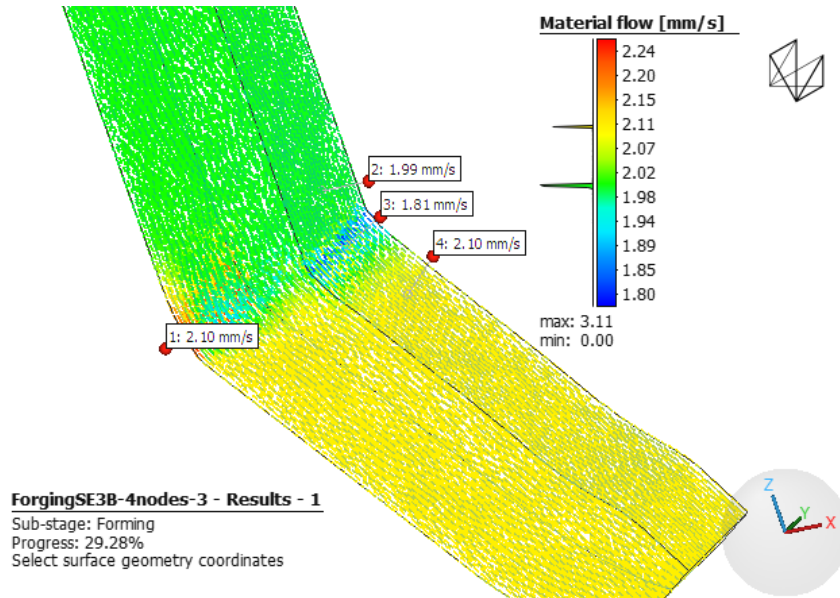
Şekil 19. $\phi=135^\circ$ kenar açısında %30, %50, %70, %100 ilerleme efektif plastik gerinim

%30 ilerleme sonucunda 135° kenar açısıyla yapılan EKAP işleminde en yüksek efektif plastik gerinim 1,30 %50 ilerlemede 1,14 %70 ilerlemede 1,06 ve %100 ilerlemede ise 1,01 olduğu ve gerinim dağılımının tüm ilerle oranlarında benzer olduğu görülmektedir. Bu durumda uygulanan presleme kuvveti ile numune kalıp dışına taşmamış ve numune düzgün bir şekilde EKAP kanalında ilerlemiştir. %30, %50, %70, ve %100 ilerleme sonuçları kıyaslandığında efektif plastik gerinim değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ve gerinim değerinin prosesin tüm aşamalarında düzgün olduğu görülmektedir (Şekil 19).



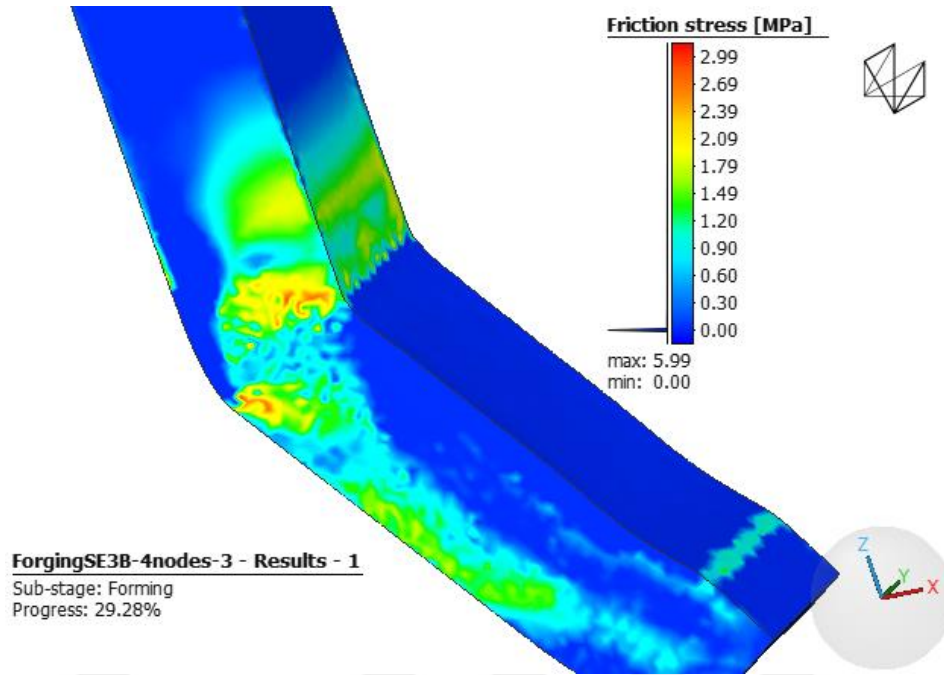
Şekil 20. %30 $\varphi=135^\circ$ kenar açısında %30, %50, %70 ilerleme temas basıncı

%30 ilerleme sonucunda 135° kenar açısıyla yapılan EKAP işleminde en yüksek temas basıncı yaklaşık 210 MPa, %50 ilerlemede bu değerin 230 MPa ve %70 ilerlemede ise 206 MPa olduğu görülmüştür. En yüksek temas basıncının ıstamba ile temas noktasında meydana geldiği görülmektedir (Şekil 20).



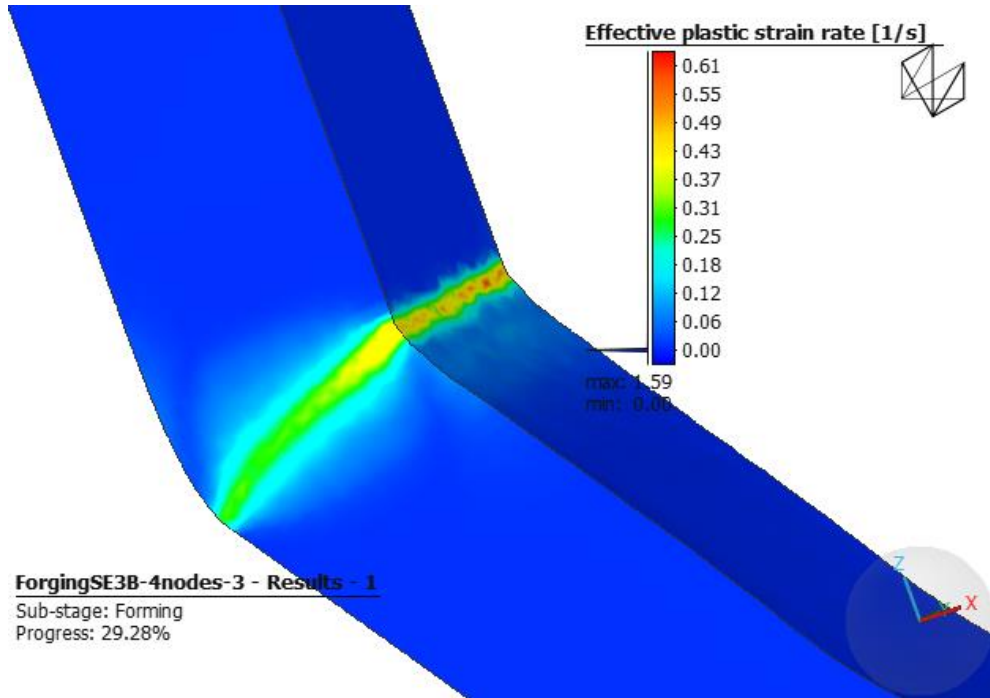
Şekil 21. Malzeme akışı $\varphi=135^\circ$

Malzeme akışının yapılan EKAP işlemi sonucunda numunenin presleme yönüyle paralel ve düzenli olduğu görülmektedir (Şekil21).



Şekil 22. Sürtünme gerilimi $\phi=135^\circ$

Sürtünme gerilimi değeri %30 ilerlemede ölçülmüş ve maksimum değerin 2,99 MPa değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Sürtünme gerilmesi değerinin numunenin dirsekten çıktığı esnada ön ve arka yüzeylerde maksimum değere ulaştığı görülmüştür. Numune EKAP dirseğini döndükten sonra özellikle numunenin ön yüzeyinde sürtünme gerilim değeri meydana gelen yığılma kaynaklı 0,15 MPa olarak düşük bir değere düşmüştür. Fakat arka yüzeyde sürtünme gerilmesi değeri yine yığılma kaynaklı yüksek değerini muhafaza etmiştir (Şekil 22).



Şekil 23. Gerinim oranı $\phi=135^\circ$

%30 ilerleme ile gerinim oranı ölçülmüş ve numunenin EKAP dirseğinden geçtiği esnada maksimum gerinim değerine ulaştığı görülmüştür. Numunenin şekil değişimine uğradığı işlemin bu aşamasında gerinim değerinin maksimuma ulaşması beklenen bir sonuç olmuştur (Şekil 23).

EKAP FEM analizlerinde tasarlanan 135° kenar açısı, 20° köşe açılarının Zn-Ag-Cu alaşımının kanal içerisinde rahat bir şekilde ilerleyebileceğini göstermiştir. Yapılan analizlerde 90° kenar açılı kanalda gerilmenin en yüksek değerine ulaştığı dirsek kısmının hemen üstünde düşük gerilme değerleri görülmüş bu durumun EKAP işlemi esnasında numunenin dirsek bölgesinde yığılıp katlanmaya sebep olabileceği değerlendirilmiştir (Şekil 18). Kullanılan alaşımın sünek olduğu bilindiğinden 90° kenar açılı kanalda EKAP işlemi uygulanmamış işlemler 135° kenar açılı kanalda yapılmıştır.

Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar rota ve paso sayısı parametreleri hariç tüm parametreler sabit tutularak yapılmıştır. Numuneler hazırlanmış, sürtünmeyi azaltmak için gres ile yağlanmış ardından işlem her paso için kalıbı söküp numuneyi tekrar hazırlayıp kalıba yerleştirmek suretiyle devam etmiştir.

Alaşımların İmalatı

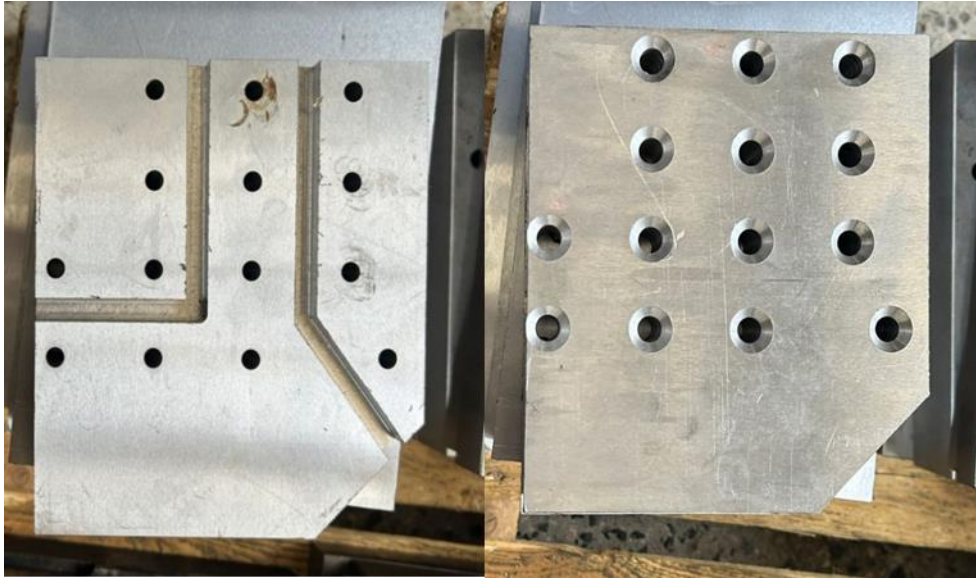
Zn-Ag-Cu alaşımı numuneler döküm yöntemi ile imal edilmiştir. Numuneler 10x10 mm kesit, 100 mm boya sahiptir. Numuneler Metkon marka zımparalama – parlatma cihazı ile presleme yoluna sıkı geçecek şekilde zımparalanmıştır (Şekil 24). Numunelerin boyunun uzun olması presleme esnasında yük altında kalan ıstampanın eğilmesine sebep olacağı için numuneler kesilerek boyları 50 mm'ye düşürülmüştür. Alaşımların kimyasal bileşimi Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. EKAP işlemine maruz kalan alaşımların kimyasal bileşimi (% ağırlıkça)

Zn	Ag	Cu	Mg
96,99±0,01	1,22±0,04	1,04±0,04	0,5±0,03

Kalıp İmalatı

EKAP işlemleri için kullanılan kalıp Doruksan Mühendislik (Ankara) tarafından üretilmiştir. Kalıp 4140 çeliğinden, talaşlı imalat yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen kalıp 200x200x40 mm boyutlarındadır. Üretilen kalıp Şekil 24'te gösterilmiştir.



Şekil 24. EKAP kalıbı

4140 çeliğinin kimyasal kompozisyonu Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. AISI 4140 Çeliğinin Kimyasal Kompozisyonu (% ağırlıkça)

Fe	C	Mo	Mn	P	S	Cr	Si
Dengeli	0,41	0,2	0,75	0,025	0,02	0,95	0,22

Kalıp yapımında kullanılan 4140 çeliğinin mekanik özellikleri Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. AISI 4140 Çeliğinin Mekanik Özellikleri

Akma Mukavemeti MPa	% Uzama	Brinell Sertlik Değeri HB	Elastik modülü GPa	Poisson Oranı
415	25,70	197	190-210	0,27-0,30

Kalıp 90° ve 135° olmak üzere iki kenar açısıyla(ϕ) preslemeye imkân verecek şekilde imal edilmiştir. Köşe açıları(Ψ) ise her iki presleme yolu için de 20°’dir. Kalıbın farklı kenar açılarına sahip olması değişik parametrelerle EKAP işlemine tabi tutulan numunenin mekanik özelliklerinde ve tane boyutundaki değişimi gözlemlene imkânı sağlamaktadır. 10x10x50mm kesite sahip numuneler; farklı kenar açıları, farklı pasolar ve farklı rotalarla EKAP işlemine tabi tutulabilecek şekilde tasarlanmıştır.

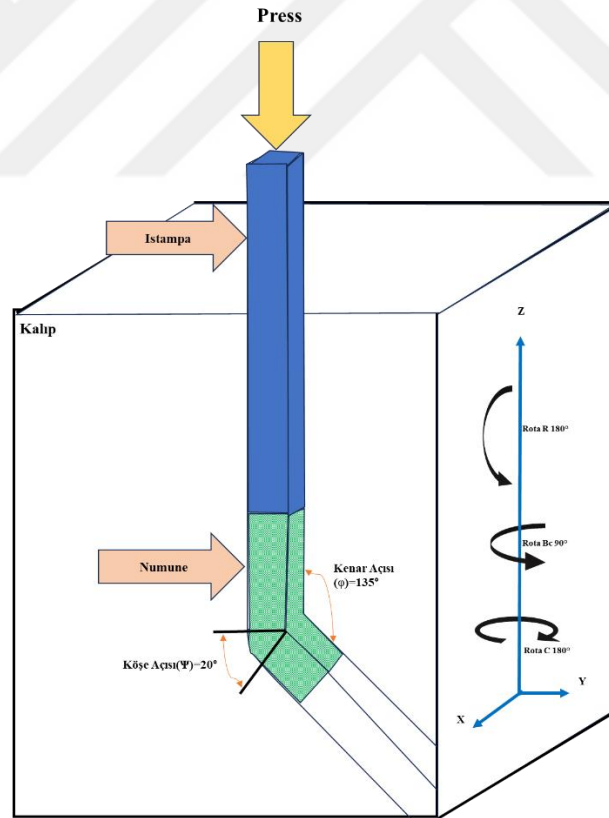
Presleme İşlemi

Presleme işlemi, BESMAK marka Servo Hidrolik Eğilme Test Makinesi ile yapılmıştır. İşlem 2 mm/sn presleme hızı ile oda sıcaklığında yapılmıştır. Presleme yolundaki sürtünmeyi azaltarak geçişi kolaylaştırmak için molibden disülfür (Mobil XHP 322 Mine) kullanılmıştır. Molibden disülfürün sürtünme değeri 0,15 olarak belirlenmiştir. Numune yerleştirilip yağlayıcı

sürüldükten sonra kalıp bağlanmış ve presleme işlemi yapılmıştır. 135° kenar açısı için 34 MPa presleme basıncı ile yapılan işlem her bir paso için ortalama 50 saniye sürmüştür. Bir numune için tek paso, Bc rotasında 2 paso, Bc rotasında 3 paso, Bc rotasında 4 paso, C rotasında 2 paso ve R rotasında 2 paso işlem yapılmıştır (Tablo 8). İşlemin yapıldığı rotalar eksen takımı üzerinde gösterilmiştir (Şekil 25). 90° kenar açılı kanalda yapılacak EKAP işleminde numunelerde meydana gelebilecek çatlak oluşumu riskine karşın 135° kenar açılı presleme yolunda işlem yapılmıştır (Şekil 26).

Tablo 8. Presleme Parametreleri

Kenar Açısı	Köşe Açısı	Rota	Paso Sayısı	Sıcaklık
135°	20°	A	1	20°C
135°	20°	Bc	2	20°C
135°	20°	Bc	3	20°C
135°	20°	Bc	4	20°C
135°	20°	C	2	20°C
135°	20°	R	2	20°C



Şekil 25. EKAP Kalıbı ve Proseste kullanılan rotalar



Şekil 26. Presleme işlemi (a), 2 pasoda işlem görmüş numune (b)

Optik Mikroskop Analizleri

İşlem görmemiş ve farklı rota, paso sayısı ile aşırı plastik deformasyona maruz bırakılmış numuneler görüntü alma işlemine elektro-parlatma yöntemi ile hazırlanmıştır. Elektro parlatma işlemi oda sıcaklığında 0,8V değerinde 4 dakika süreyle yapılmıştır. Çözelti olarak etanol-fosforik asit karıştı malzeme olarak ise bakır kullanılmıştır. Numunelerin ön ve yan yüzeylerinden 100µm, 200µm, 500µm boyutlarında görüntüler Hardway 4C220 optik mikroskop ve Clemex analiz uygulaması ile alınmıştır.

EKAP Sonrası Mekanik Özellikler

Mikrosertlik testi

Zn-Ag-Cu alaşımının aşırı plastik deformasyondan önce ve sonraki sertlik değerlerini kıyaslayarak EKAP işleminin sertlik değeri üzerine etkisini araştırma amacıyla Hardway MHVD-1000 IS mikro sertlik test cihazıyla sertlik deneyleri yapılmıştır. Ölçümler 100 Hv/gf yükün, 10 sn süre ile numuneye bastırılması ve ortaya çıkan izin ölçümünün yapılması şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Çekme testi

Zn-Ag-Cu alaşımının aşırı plastik deformasyondan önce ve sonraki çekme değerlerini kıyaslayarak EKAP işleminin çekme dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla ASTM standardına göre hazırlanmış olan numunelerin çekme testleri oda sıcaklığında ve 0,1/s

gerinim oranı ile Instron çekme deneyi cihazıyla küçük parça testlerine uygun çeneler ile yapılmıştır.

Aşınma testi

Aşınma deneyleri Turkey PODWT RRWT marka aşınma test cihazı ile kuru deney ortamında yapılmıştır. Aşındırıcı top olarak Al₂O₃ kullanılmıştır. Yapılan deneyde numunelere 1 Hz frekansında 30 dakika süre ile 3N yük uygulanmıştır.

Korozyon testi

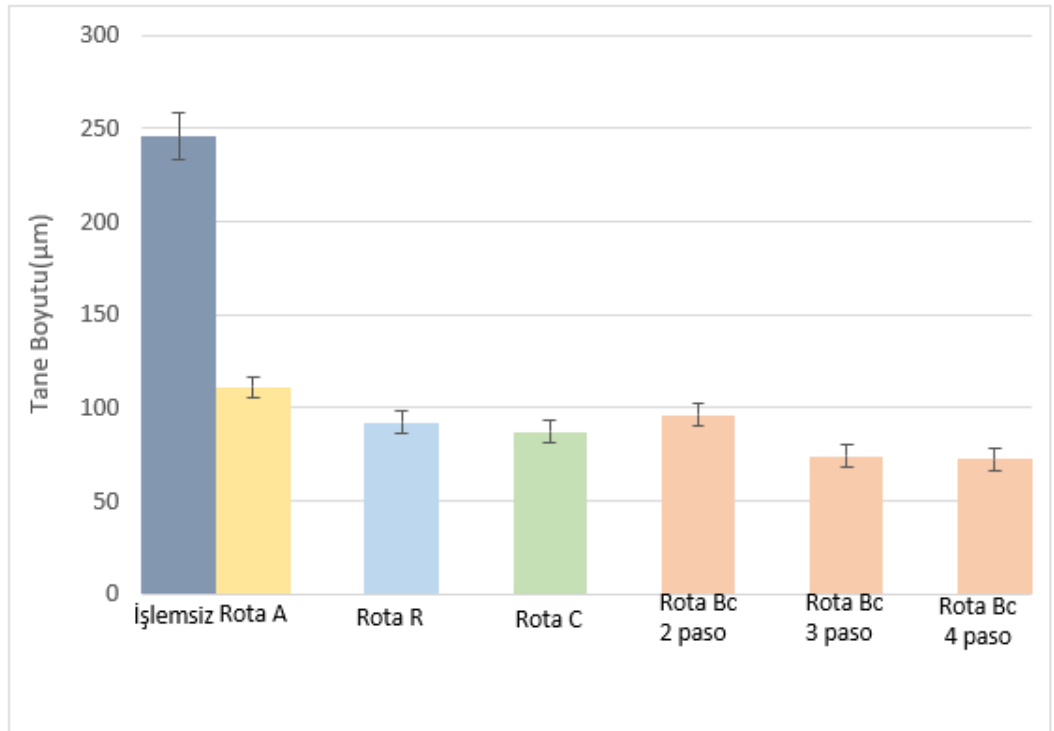
Elektrokimyasal korozyon testleri GAMRY Series G750TM Potansiyostat/Galvanostat/ZRA cihazında, açık devre potansiyeli (OCP) ve potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri yapılmıştır. Elektrokimyasal ölçümlerde üçlü elektrot sistemi kullanılmıştır. Çalışma elektrodu olarak iş parçası, karşıt elektrot olarak grafit ve referans elektrot olarak Ag/AgCl kullanılmıştır. Elektrokimyasal korozyon testlerinde çözelti ile temas eden numune yüzey alanı 0,38 cm² 'dir.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

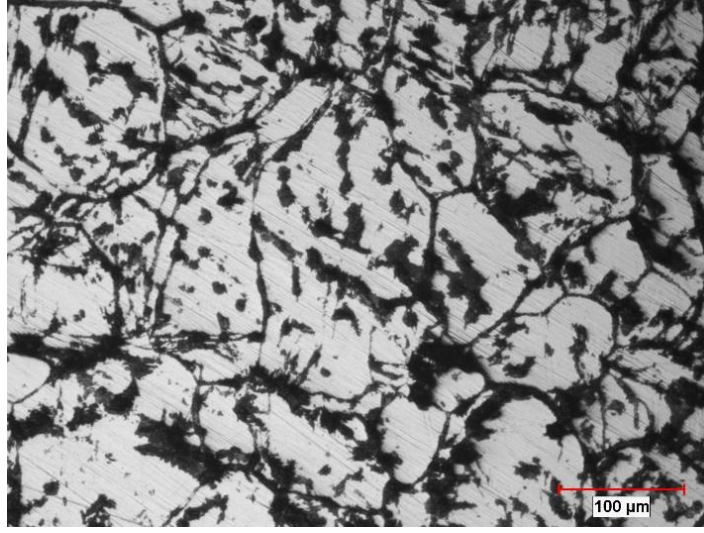
EKAP İşlemi Sonrası Optik Mikroskop Analizleri

İşlemsiz numune, farklı rota ve paso sayısında oda sıcaklığında yapılan EKAP işlemi uygulanmış (A, Bc, C, R rotaları ile 1, 2, 3, 4 pasoda) numunelere ait mikroyapı optik mikroskop görüntülerinden İmageJ programı ile ölçümü yapılmış tane boyutları Şekil 27’de sütun grafik ile gösterilmiştir. İşlem görmemiş numuneye kıyasla EKAP işlemi uygulanmış olan numunelerde içyapı deformasyon kaynaklı daha karmaşık bir yapıya dönüşmüştür. Ayrıca paso sayısının artmasıyla alt tanelerin sayısının arttığı görülmüştür. Böylece EKAP işlemi uygulanmış numunelerde işlemsiz numuneye göre tane sayısında artış meydana gelmiştir.

İşlemsiz ve aşırı plastik deformasyon işlemi uygulanmış numunelerden optik mikroskop yardımı ile alınan mikroyapı görüntülerinde, tane boyutu hesabı İmageJ programı ile yapılmıştır. İşlemsiz numune üzerinde belirlenen bir tane ile ölçüm yapılmış ve işlem gören numunelerde aynı tane üzerinden ölçümler bu referans değere göre tekrar edilmiştir. Böylece tane boyutları belirlenmiş ve tane boyutundaki değişimler gözlemlenmiştir. Ölçüm sonrasında farklı rota ve paso sayılarında elde edilen tane boyutları Şekil 27’de gösterilmiştir.



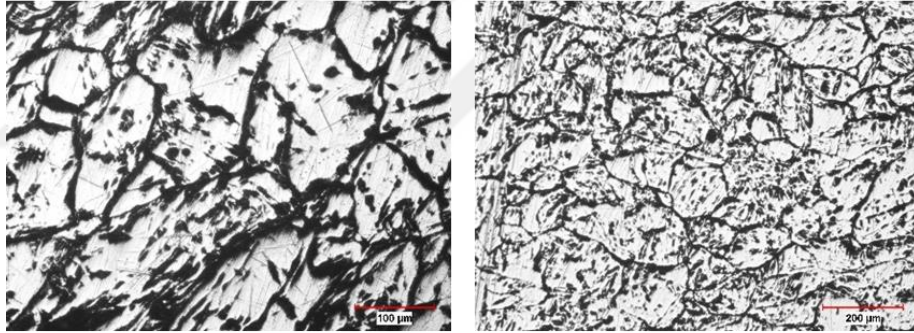
Şekil 27. Tane Boyutları



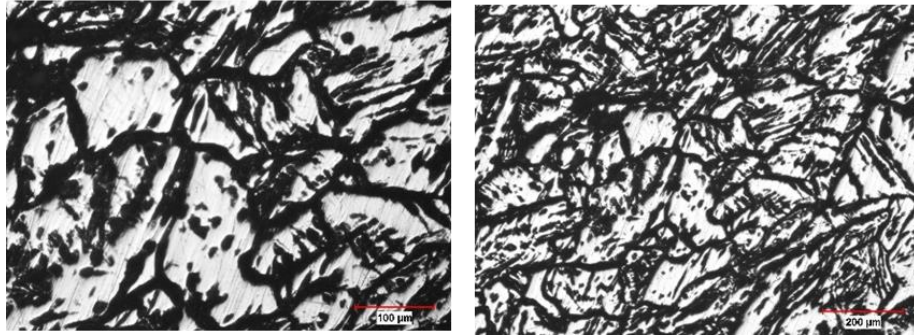
Şekil 28. İşlemsiz numunenin içyapı görüntüleri

İşlemsiz numunenin içyapısında, tane boyutunun ve formlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir (Şekil 28). İşlemsiz numunenin ortalama tane boyutu 245,780 μm olarak belirlenmiştir.

Ön Yüzey



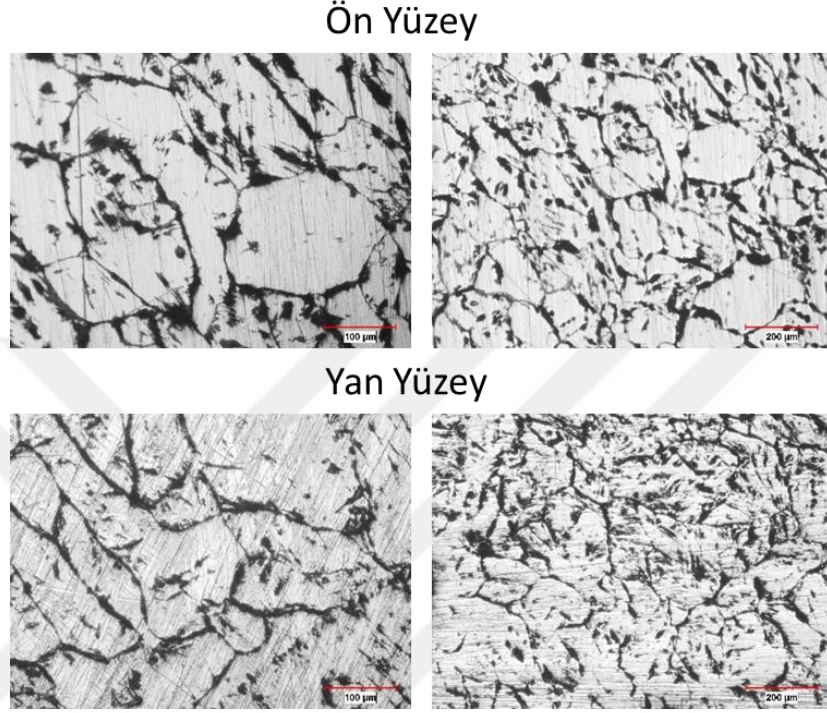
Yan Yüzey



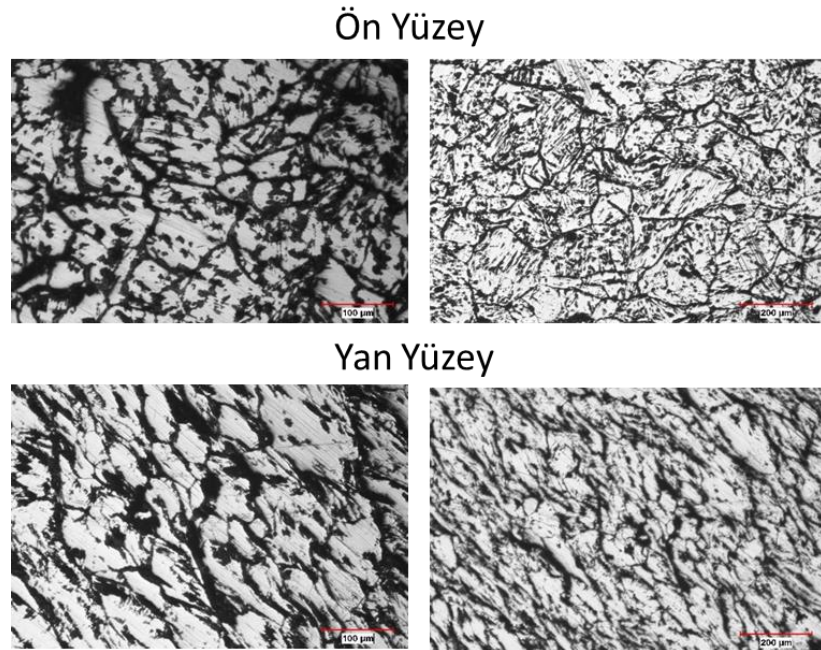
Şekil 29. 1 pasoda işlem görmüş numunenin içyapı görüntüleri

1 pasoda yapılan EKAP işlemi sonucunda numunenin tane boyutunun, işlemsiz numuneye kıyasla daha fazla taneye sahip olduğu, belirgin bir tane yöneliminin olmadığı fakat tane boyutunda gözle görülür bir küçülme olduğu görülmektedir. 1 Pasoda işleme tabi tutulan numunenin tane boyutu 111 μm 'dir. İşlemsiz numuneye kıyasla 1 pasoda işlem gören

numunenin tane boyutunda %50'den fazla bir küçülme meydana gelmiştir. Ayrıca numunenin iç kısmında kenarlarına doğru ilerledikçe tane boyutunun küçüldüğü ve tane sayısının arttığı da görülmektedir (Şekil 29). Aşırı plastik deformasyon işlemi sonrasında yeni alt taneler meydana gelir. Böylece tane sınır sayısı artarak yapı içerisinde tane küçülmesi meydana gelir (Ghorbani *et al.* 2019).

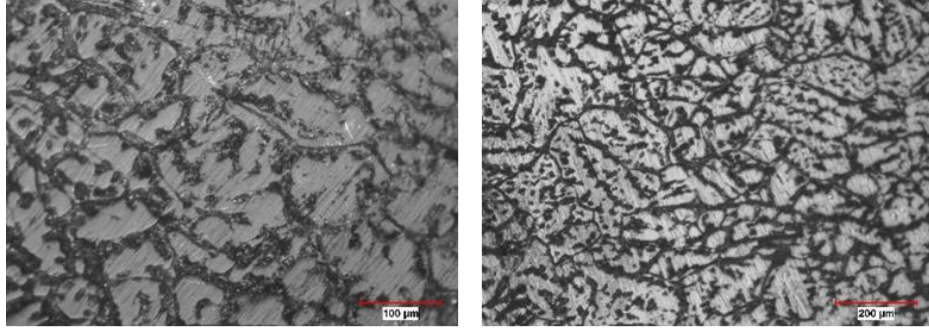


Şekil 30. Bc rotasında 2 pasoda işlem görmüş numunenin içyapı görüntüleri

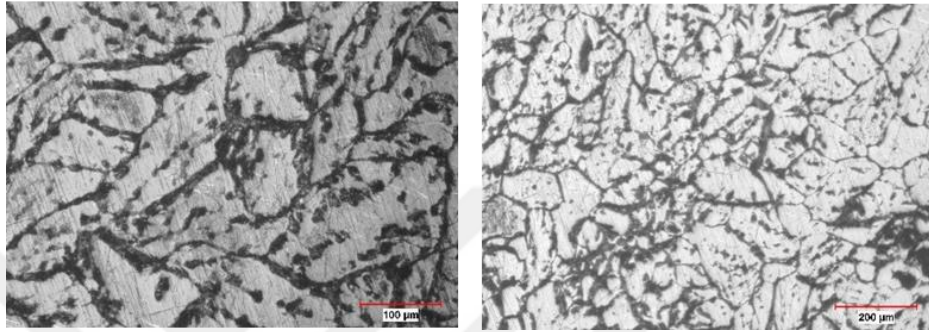


Şekil 31. Bc rotasında 3 pasoda işlem görmüş numunenin içyapı görüntüleri

Ön Yüzey

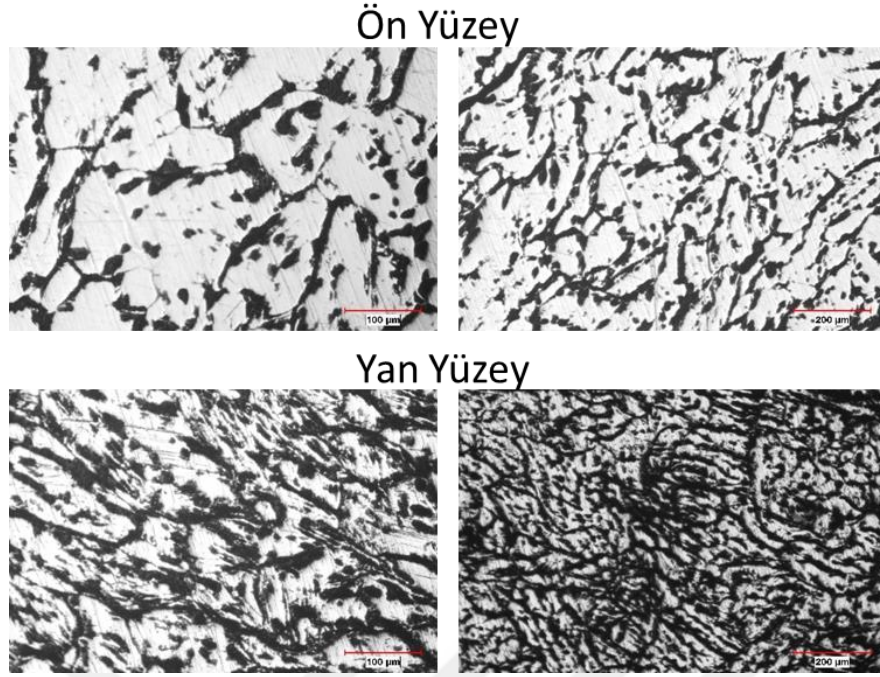


Yan Yüzey



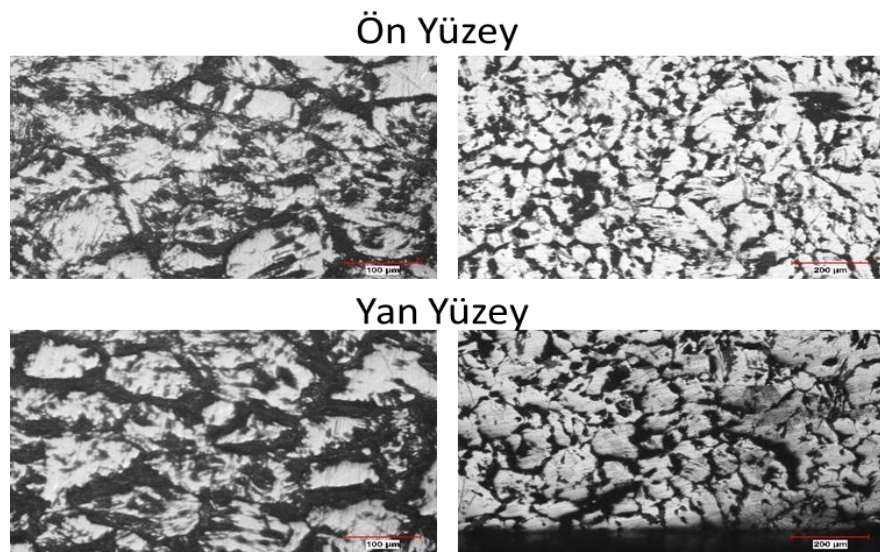
Şekil 32. Bc rotasında 4 pasoda işlem görmüş numunenin içyapı görüntüleri

EKAP işlemi sırasında rota ve paso sayısına göre tane boyutu küçülmektedir (Atan, 2022). Bc rotası ile 2, 3 ve 4 pasoda yapılan EKAP işlemi sonucunda optik mikroskop görüntülerine bakıldığında paso sayısındaki artışa paralel olarak içyapıdaki tane boyutunda bir küçülme olduğu görülmektedir. Bu durum aşırı plastik deformasyonun numune üzerindeki deformasyon etkisi ile açıklanabilir. 2 pasoda işlem gören numunede tane boyutu 96,421 μm (Şekil 30), 3 pasoda işlem gören numunede tane boyutu 74 μm (Şekil 31) ve 4 pasoda işlem gören numunenin tane boyutu 72,444 μm 'dir (Şekil 32). 4 pasoda işlem gören numunenin tane boyutu işlem görmemiş numunenin tane boyutunun %30' u mertebelerindedir. Paso sayısı arttıkça tane boyutunda ciddi bir düşüş olduğu görülmekle birlikte 3 ve 4. pasolar arasında kayda değer bir tane boyutu azalışı gözlenmemiştir. EKAP işlemi sırasında presleme yönü ile tanelerin yönelimleri aynı doğrultuda olmaktadır (Sekban, 2020). Bc rotasında 3 ve 4. pasolarda tane yöneliminin belirginleştiği ve bu yönelimin EKAP presleme yönü ile aynı doğrultuda olduğu görülmektedir.



Şekil 33. C rotasında 2 pasoda işlem görmüş numunenin içyapı görüntüleri

C rotasında 2 paso ile yapılan işlem sonucunda taneler homojen yapısını korurken aynı zamanda tane boyutunda bir azalma gözlenmiştir. Yeni tane boyutu işlem görmemiş numunenin yaklaşık %35'i seviyesindedir. Kenar kısımlarda tane boyutu daha küçük ve tane sayısı daha fazladır. Bc rotasında 2 paso ile yapılan işlemde tane boyutu 96,421 μm iken C rotasında yapılan işlem sonrasında numunenin tane boyutu 87,006 μm olarak ölçülmüştür. Bu durum C rotasının döndürme açısının 180° olmasından kaynaklanmaktadır. 180° derece döndürülen numune, aynı yüzeylerde 2 kez kayma gerilmesine maruz kalırken Bc rotasında döndürme açısı 90° olduğundan dolayı 2 pasoda, farklı yüzeyler kayma gerilmesine maruz kalmaktadır (Şekil 33).

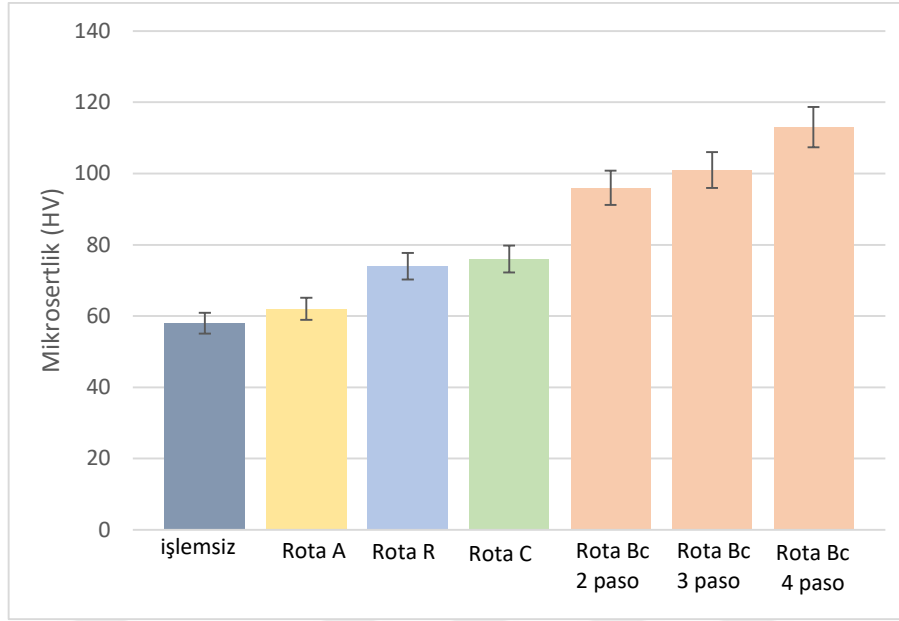


Şekil 34. R rotasında 2 pasoda işlem görmüş numunenin içyapı görüntüleri

R rotasında 2 pasoda yapılan işlemin içyapı görüntü sonuçlarına bakıldığında zaman aynı paso sayısı ile yapılan Bc ve C rotalarından çok farklı bir durum gözlenmemiştir. Tane boyutu, işlemsiz numunenin tane boyutunun yaklaşık %37'si civarlarındadır. Fakat numunenin kayma gerilmesine maruz kalan yüzeyinin orta kısmından kenarlarına doğru tane boyutunun daha fazla küçüldüğü ve buna bağlı olarak tane sayısının arttığı gözlenmiştir (Şekil 34).

Farklı rota ve paso sayılarıyla oda sıcaklığında yapılan EKAP işlemi sonucu aşırı plastik deformasyon etkisi ile dislokasyonlar etkileşime girerek içyapı kompleks bir hale gelmektedir. Paso sayısı arttıkça alt tane oluşumu artmaktadır. Bunun başlıca nedenleri; tane oryantasyonu ve ekstrüde tane oluşumudur (Valiev & Langdon, 2006). İçyapı görüntüleri genel olarak değerlendirilecek olursa EKAP işleminin rota ve paso sayısı fark etmeksizin işlemsiz numuneye kıyasla tane boyutunda kayda değer bir küçülmeye sebep olduğu görülmüştür. Numunelerde işlem gören yüzeyinin orta kısmından kenarlarına doğru tane boyutları kıyaslandığında kenarlarda tane boyutlarının daha küçük ve buna bağlı olarak tane sayısının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Paso sayısı arttıkça tane boyutunda istikrarlı bir küçülme gözlenirken, tane boyutundaki azalış farkı paso sayısı arttıkça azalmaktadır. Bc, C ve R rotalarında eşit paso sayısında (2 paso) yapılan işlemler kıyaslandığında tane boyutundaki küçülme yakın miktarlarda seyretmekle beraber C rotasında tane yönelimi EKAP presleme istikametinde daha belirgin olarak gözlenmiştir. Bc rotasında 2, 3 ve 4 pasoda yapılan işlemler kıyaslandığında ise her paso geçişinde tane boyutundaki küçülme düşmüş fakat tane yönelimi özellikle 3. pasodan sonra belirginleşmiştir. Zn-Ag-Cu alaşımının mekanik özelliklerini arttırmak adına yapılan EKAP işleminde en uygun parametrelerin belirlenmesi önem arz etmektedir. Bc rotasında, kararlı tane boyutu azalışı, tanelerin homojen yapısını koruyor olması ve tane yöneliminin EKAP presleme yönü ile paralel olması diğer rotalara kıyasla öne çıkan avantajlardır.

EKAP İşlemi Uygulanmış Numunelerde Mikrosertlik Deneyi

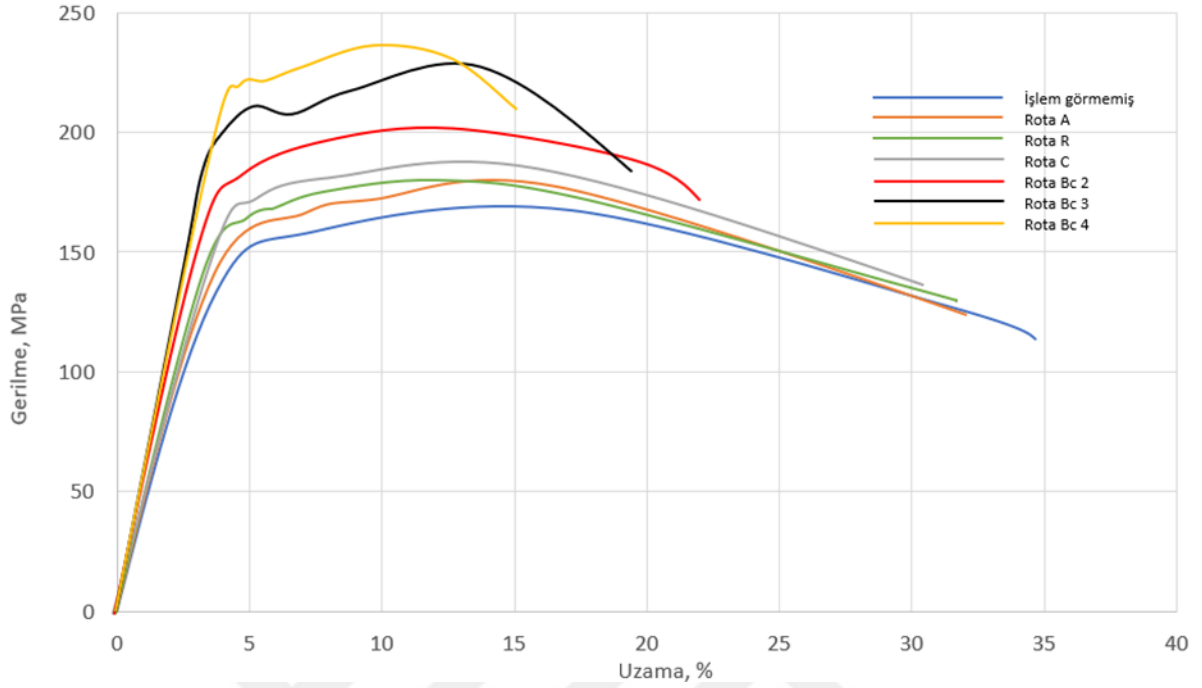


Şekil 35. EKAP işlemi yapılmış numunelerin mikrosertlik deney sonuçları

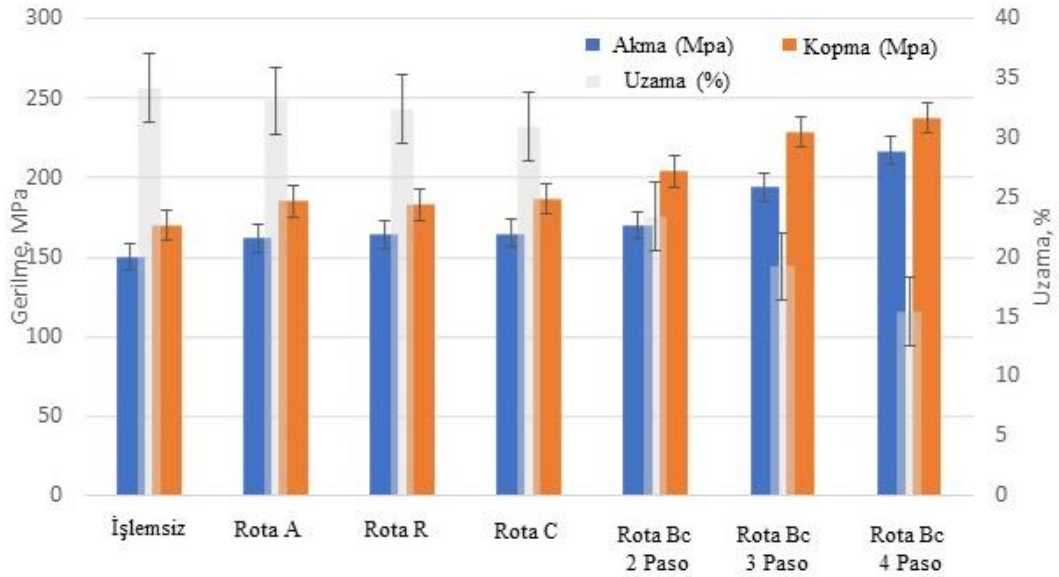
Zn-Ag-Cu alaşımı oda sıcaklığında sabit presleme hızı ile farklı rota ve paso sayılarında EKAP işlemi yapılan numunelerin mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Elde edilen bu değerlerle EKAP işleminin mekanik özelliklere olan etkisi incelenmiştir. Şekil 35'te tüm rota ve paso sayılarında işlem görmüş ve işlemsiz numunenin mikrosertlik değerleri sütun grafik şeklinde sunulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda işlem gören tüm numunelerin sertlik değerinde işlemsiz numuneye kıyasla artış kaydedildiği görülmüştür. 2 pasoda Bc, C ve R rotalarında işlem gören numuneler arasında 92 HV değeri ile Bc rotasının en iyi performansı gösterdiği görülmektedir. Bc rotasında paso sayısı arttıkça sertlik değerinin arttığı ve en yüksek sertlik değerinin 117 HV değeri ile Bc rotasında 4 pasoda işlem görmüş numune olduğu görülmektedir. Bc rotasında 4 pasoda EKAP uygulanmış numunenin sertlik değeri işlemsiz numuneye göre %50 artış göstermiştir. Buradan paso sayısı ve sertlik değerinin doğru orantılı bir ilişkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu ilişkinin sebebinin artan paso sayısı ile tane boyutunun küçülmesi olduğu yorumu yapılabilir (Levin *et al.* 2019).

EKAP İşlemi Uygulanmış Numunelerde Çekme Deneyleri

İşlemsiz, farklı rota ve paso sayılarında yapılan EKAP işlemi sonucu elde edilen numunelere aynı şartlar altında çekme deneyi yapılarak gerilme-uzama eğrileri elde edilmiştir. Rota ve paso sayısına göre sonuçlar değişiklik göstermiştir (Şekil 36). Akma gerilmesi, kopma gerilmesi ve yüzdece uzama miktarlarının değerlerinden için elde edilen sütun grafiği Şekil 37'de verilmiştir.



Şekil 36. Çekme testi gerilme-uzama eğrisi



Şekil 37. Akma gerilmesi, kopma gerilmesi-uzama grafiği

İşlemsiz numuneye kıyasla EKAP işlemi uygulanmış tüm numunelerin akma ve kopma dayanımları artmış yüzdece uzama değerleri ise azalmıştır. İşlemsiz numuneyle 4 pasoda Bc rotasında işlem gören numunenin çekme deneyi sonuçları kıyaslanacak olursa akma gerilmesi değerinin yaklaşık %68 arttığı görülmektedir. 2 pasoda farklı rotalarda işlem gören

numunelerin akma, kopma gerilme değerleri birbirine yakın olmakla beraber en iyi sonuçlar Bc rotasında elde edilmiştir. 2 pasoda işlem gören numunelerin akma gerilmesi değerleri işlem görmemiş numunenin ortalama %17 üzerindedir. Ayrıca Bc rotasında paso sayısı arttıkça akma-kopma dayanımı kararlı olarak artış göstermiştir. Paso sayısında meydana gelen artış ile orantılı olarak kopma uzamasında da bir azalma meydana gelmiştir. Böylece paso sayısının artmasıyla işlemsiz numuneye kıyasla malzeme gevrekliği de artmıştır (Şekil 37). 4 pasoya kadar işlem gören numunelerin çekme deneyi sonuçları incelendiğinde alaşımın akma ve maksimum gerilme değerlerinde kayda değer bir gelişme olduğu görülmektedir. Bu gelişmeye tane boyutundaki küçülme ve dislokasyon yoğunluğundaki artışın sebep olduğu söylenebilir (Purcek *et al.* 2011). Dislokasyon hareketlerinin dışında 2 ve üzeri pasoda yapılan EKAP işlemi sonrası numunelerde, yüksek dislokasyon yoğunluğu dislokasyon hareketlerini zorlaştırır ve böylece ikizlenme mekanizmaları oluşur. İkizlenmeler tane hareketini engeller ve akma sınırının artmasına sebep olur (Yapici *et al.* 2006).

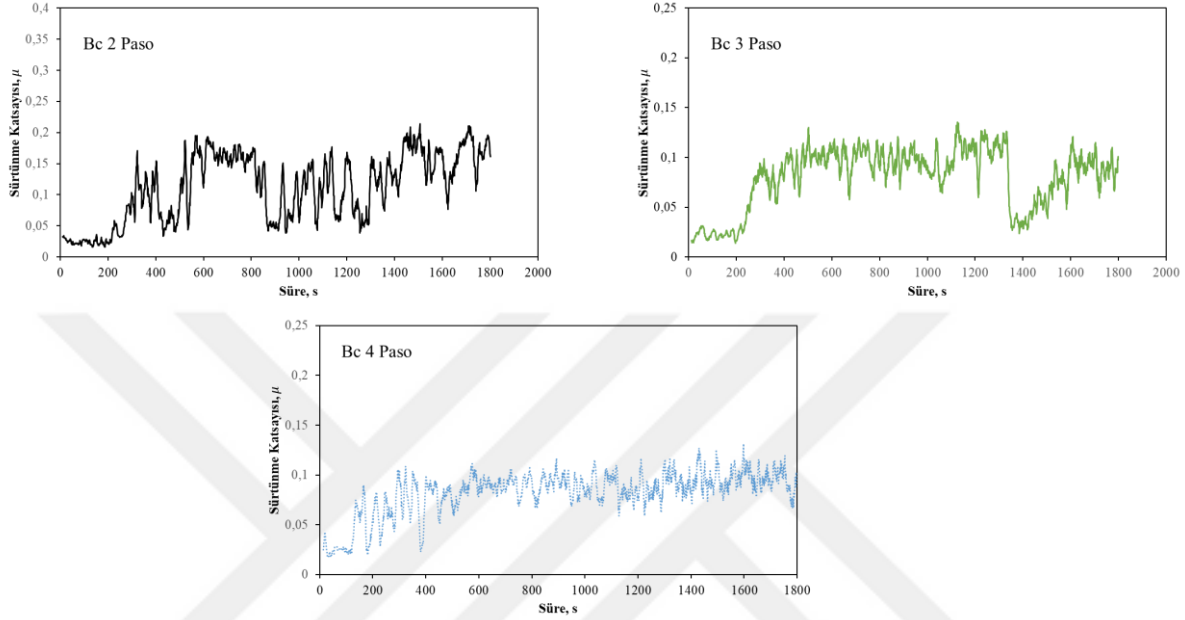
Aşırı plastik deformasyon sonrası tanelerin küçülmesi ve dislokasyon yoğunluğunun artması malzemenin akma ve maksimum gerilme değerlerinde ciddi bir artışa sebep olurken sünekliğinin azalmasına sebebiyet vermiştir.

EKAP İşlemi Uygulanmış Numunelerde Aşınma Deneyleri

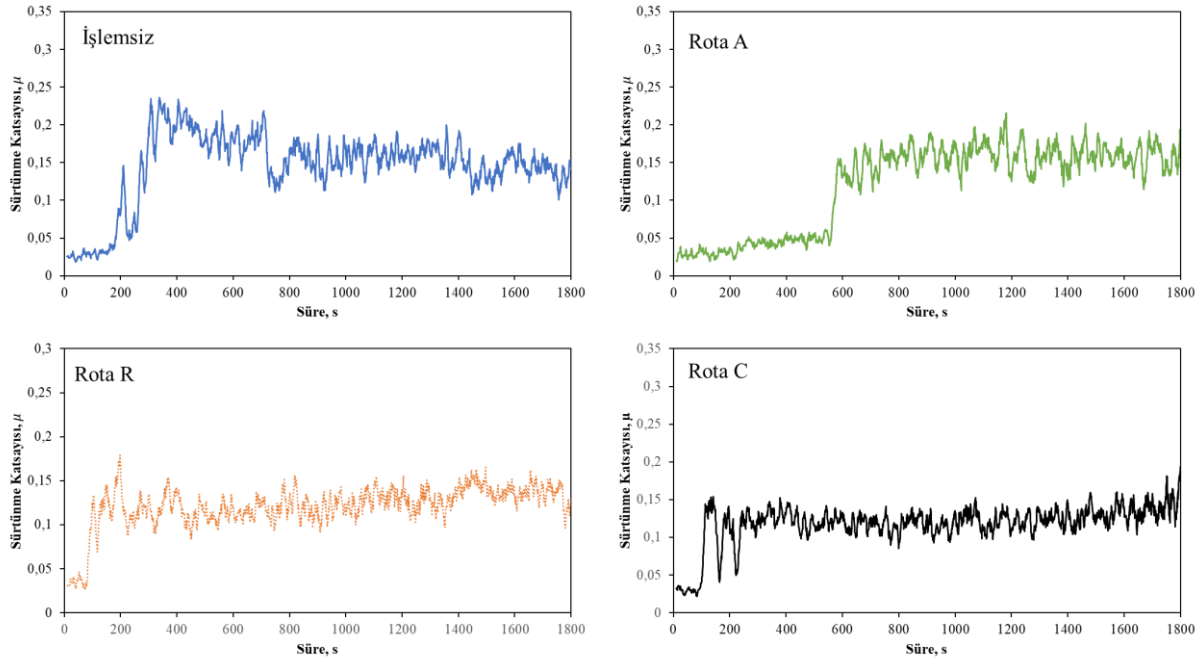
Zn-Ag-Cu alaşımına 135° kenar açısı ve 20° köşe açısında tasarlanan kalıp ile oda sıcaklığında farklı rotalarda ve paso sayılarında yapılan EKAP işlemi sonucu elde edilen numunelere kuru aşınma testleri yapılmıştır. Kuru aşınma testleri 1Hz frekansında ve 3N ağırlığında doğrusal aşınma testi olarak uygulanmıştır. Aşınma testi sonucu elde edilen sürtünme katsayısı-zaman grafikleri Şekil 38 ve Şekil 39'da gösterilmiştir. Genel olarak sürtünme katsayısı-zaman grafiklerine bakıldığı zaman aşınma testinin başlamasıyla sürtünme katsayısının arttığı gözlemlenmiştir. Aşınmanın devam etmesiyle bu etki sabit olarak devam etmiştir. Başlangıçta artışın nedeni Hertzian basıncından kaynaklanmaktadır. Bu basınç, aşınmanın başlangıçta yüzeydeki pürüzlülüklerin tepe noktasına temas eden yükün yüksek olmasıyla birlikte temas alanının çok düşük olması durumudur. Aşınmanın devam etmesi ve aşınma yüzeylerinin birbirine alışmasıyla eğriler istikrarlı hale gelmektedir.

Genel olarak Şekil 38 ve Şekil 39'daki grafiklere bakıldığı zaman en düşük aşınma direnci 0,145771 sürtünme katsayısı değeriyle işlemsiz numunede, en yüksek aşınma direnci ise 0,082694 sürtünme katsayısı değeriyle Bc rotasında 4 pasoda EKAP uygulanmış numunede görülmektedir. Sabit 2 paso sayısında farklı rotalarda işlem gören numunelerde aşınma direnci benzer sonuç vermiş fakat en yüksek aşınma direnci 0,113578 sürtünme değeriyle Bc rotasında gözlenmiştir. A rotasında 2 pasoda işlem gören numunenin sürtünme katsayısı 0,123934, R

rotasında bu değer 0,121449 ve C rotasında ise 0,118474 olarak tespit edilmiştir. İşlem gören tüm numunelerde aşınma direnci değeri işlemsiz numuneye göre artış göstermiştir. Rota sabit tutularak (Bc rotası) paso sayısının 2, 3 ve 4 olacak şekilde arttırıldığı durumda paso sayısı arttıkça aşınma direncinin yükseldiği ve sürtünme katsayısı değerlerinin Bc rotasında 2 pasoda 0,113578, Bc rotasında 3 pasoda 0,083263 ve Bc rotası 4 pasoda ise 0,082694 olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçların sertlik deneyi sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.



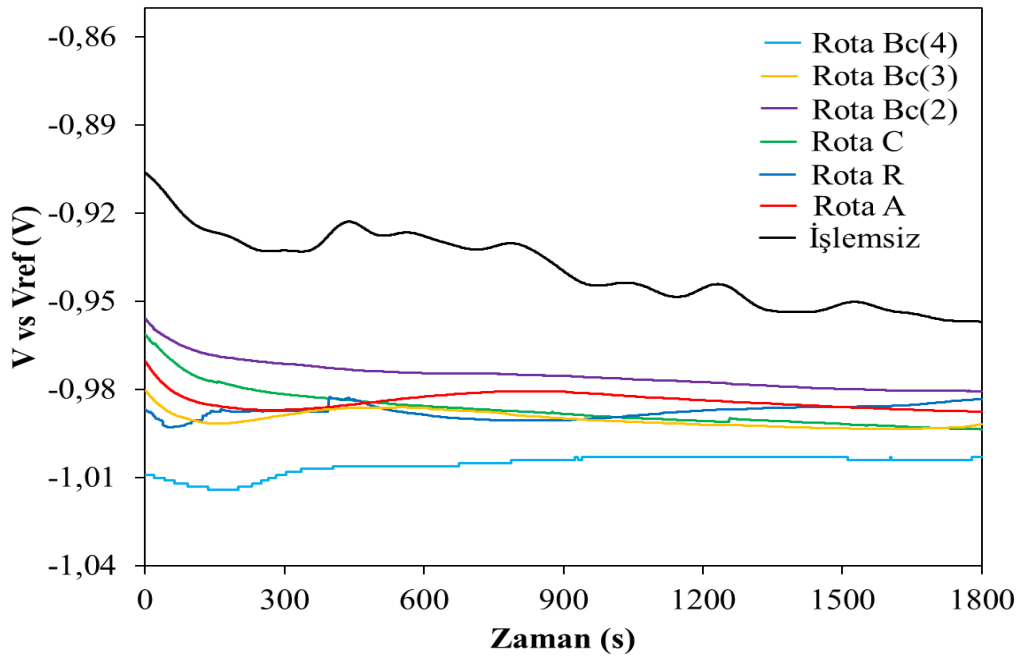
Şekil 38. Bc rotasında işlem gören numunelerin sürtünme katsayısı-zaman grafiği



Şekil 39. İşlemsiz, A, R ve C rotaları sürtünme katsayısı-zaman grafiği

EKAP İşlemi Uygulanmış Numunelerde Korozyon Deneyleri

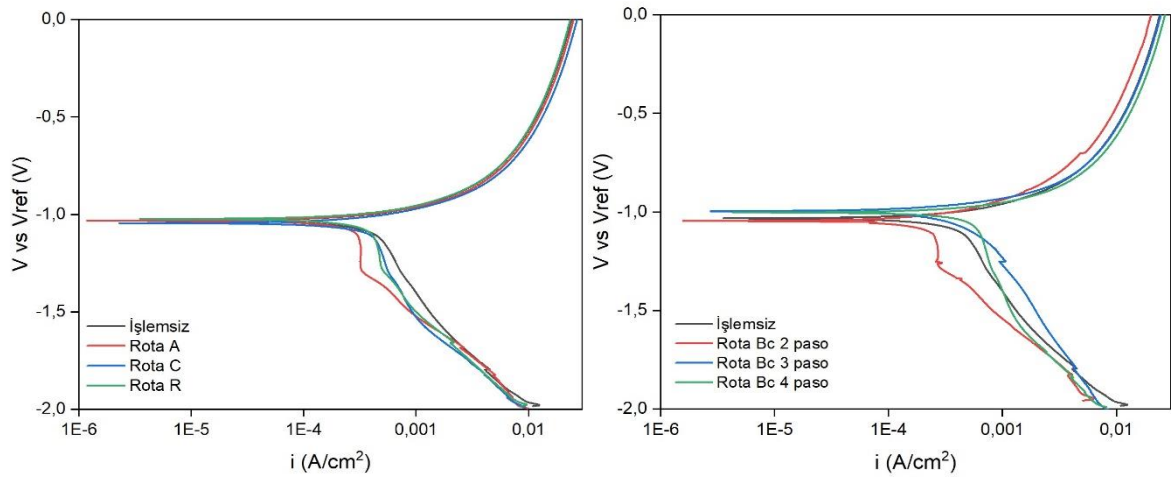
Farklı rota ve pasolarda EKAP işlemi uygulanan Al-Mg-1Ag alaşımının Ringer çözeltisi içerisinde, 37 °C sıcaklıkta elektrokimyasal korozyon testleri gerçekleştirilmiştir. 1800 saniye boyunca açık devre potansiyeli (OCP) ölçümleri yapılmıştır. EKAP işlemi uygulanmış ve işlemsiz numunelere ait OCP eğrileri Şekil 40'ta gösterilmiştir. Zn-Ag-Cu alaşımı numuneler OCP süresi boyunca kararlı olarak pozitif potansiyele doğru eğilim göstermişlerdir. Şekil 40'ta verilen OCP eğrilerine bakıldığı zaman grafiklerde periyodik olarak değişikliklerin olduğu görülmektedir. Meydana gelen bu değişiklikler, malzeme yüzeyinde koruyucu oksit filminin oluşması ve daha sonrasında oluşan bu oksit filmin parçalanmasından kaynaklanmaktadır. EKAP işlemi uygulanmış numunelerin OCP eğrilerine bakıldığı zaman belirli bir süre sonra eğrilerin kararlı hale geldiği görülmektedir.



Şekil 40. EKAP işlemi yapılmış numunelerin OCP eğrileri

Farklı rota ve pasolarda EKAP işlemi uygulanan Al-Mg-1Ag alaşımına ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 41'de gösterilmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon testi -1V ila +1V arasında 1mV/s tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrilerine bakıldığı zaman, EKAP işleminin polarizasyon eğrilerinde önemli ölçüde bir fark yaratmadığı görülmüştür. Ayrıca, EKAP işlemi sonrasında plastik deformasyondan dolayı işlemsiz numuneye kıyasla korozyon direncinin arttığı görülmektedir (Şekil 41). Farklı rota ve paso sayılarında uygulanan EKAP işlemi sonrasında tane boyutu küçülmektedir. Tane boyutunun küçük olması korozyon bariyeri görevini gören

daha fazla tane sınırı oluşturmaktadır. Böylece işlemsiz numuneye göre korozyon direncinde artış görülmektedir.



Şekil 41. EKAP işlemi yapılmış numunelerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri

Potansiyodinamik polarizasyon sonucu elde edilen eğrilerden Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile hesaplanan korozyon test sonuçları Tablo 9’da verilmiştir. Korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) korozyonun değerlendirilmesi için önemli bir parametredir. Ayrıca i_{corr} değeri korozyon hızı ile doğru orantılıdır. Bu nedenle i_{corr} değerinin azalmasıyla korozyon direnci artmaktadır (Xu et al., 2010). İşlemsiz numunenin korozyon akım yoğunluğu $637 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ olarak ölçülürken EKAP işlemi uygulanmış Rota Bc (4), Rota Bc (3), Rota Bc (2), Rota R, Rota C ve Rota A numuneleri için bu değer sırasıyla $143 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, $172 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, $179 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, $455 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, $393 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ve $502 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ olarak ölçülmüştür. Böylece elde edilen korozyon akım yoğunluklarına bakıldığında işlemsiz numuneye kıyasla azaldığı görülmektedir. Korozyon hızlarına bakıldığında EKAP işlemine tabi tutulmuş numunelerin korozyon hızı değerleri işlemsiz numuneye göre daha düşük oldukları görülmektedir. Ancak Rota A, Rota C ve Rota R numuneleri arasındaki farkın çok fazla olmadığı Tablo 9’da verilen korozyon test sonuçlarından görülmektedir.

Tablo 9. EKAP İşlemi Uygulanmış Numunelerde Korozyon Deney Sonuçları

Deney Sonuçları	İşlemsiz	Rota A	Rota C	Rota R	Rota Bc (2)	Rota Bc (3)	Rota Bc (4)
i_{corr} (A/cm ²)	637x10 ⁻⁶	502x10 ⁻⁶	393x10 ⁻⁶	455x10 ⁻⁶	179x10 ⁻⁶	172x10 ⁻⁶	143x10 ⁻⁶
Korozyon hızı (mpy)	294,2	232	181,6	210,1	82,92	79,70	66,16
β_a (V/decade)	130,6x10 ⁻³	137,9x10 ⁻³	135x10 ⁻³	119,9x10 ⁻³	116,2x10 ⁻³	137,1x10 ⁻³	60,5x10 ⁻³
β_c (V/decade)	307,7x10 ⁻³	951,1x10 ⁻³	306x10 ⁻³	650,5x10 ⁻³	642,1x10 ⁻³	669,2x10 ⁻³	110,4x10 ⁻³

EKAP işlemi için paso sayısının artması yani maruz kalınan plastik deformasyonun artmasıyla Zn-Ag-Cu alaşımının yapı içerisindeki taneleri incelmış ve böylece korozyonun daha uzun süreli hale gelmesi sağlanmıştır. Ayrıca tanelerin incelmesi korozyon hızını etkileyerek işlem gören tüm numunelerin işlemsiz numuneye göre korozyona uğrama sürelerini uzatmıştır. EKAP işlemi ile eş zamanlı olarak tane sınır sayısının artması alan fraksiyonunu artırır ve bu da alaşımın pasif film oluşumunu hızlandırmaktadır. Ayrıca uygulanan deformasyon işlemi ile pasif film kalınlığını ve yoğunluğu da artırılabilir. Sonuç olarak bu durum deformasyona uğramış malzemelerin korozyon direncini artırabilir (Viceré et al., 2019). EKAP işleminde paso sayısının artmasıyla numunelerin korozyon direncinin arttığı ve plastik deformasyona uğramış numuneler arasında belirgin bir farkın olmadığı sonucuna varılmıştır.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Biyomalzeme olan Zn-Ag-Cu alaşımının biyomedikal sektöründe daha yaygın kullanımını sağlamak adına mekanik özelliklerinin geliştirilmesi/iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Aşırı plastik deformasyon yöntemlerinden biri olan EKAP işlemi uygulanarak tanelerin inceltmesi, homojenleştirilmesi, kayma düzlemlerinin oluşturulması ile mekanik özelliklerin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu işlemi yaparken aynı zamanda çok fonksiyonlu EKAP kalıbı tasarlanmıştır. EKAP parametrelerinin belirlenebilmesi için ilk önce FEM analizleri yapılmış ve bu sonuçları ışığında deneysel çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde;

- Sonlu elemanlar analizlerinden numunenin EKAP dirseğinden geçerken yüksek gerilimlere maruz kaldığı tespit edilmiştir. FEM analizlerinden alaşımın sünek olmasından dolayı dirseğe girişten hemen önce katlanmaya maruz kalabilecek bölgeler tespit edilmiştir. Kalıp tasarımı ve optimizasyonu için numunenin akış analizi gözlenmiş ve 2 mm/sn değeri civarlarında akışın stabil olduğu belirlenmiştir. Plastik deformasyon gerilme oranları deformasyon bölgesinde çeşitlilik gösterirken (0,49-0,61 1/s), deformasyon bölgesi dışında 0,06 1/s olarak belirlenmiştir.
- EKAP işlemi tekrar eden pasolarda zaman alan bir işlem olduğundan kolay ve hızlı bağlanıp sökülebilen ve 2 farklı kenar açısı ile işlem yapmaya imkân tanıyan fonksiyonel kalıp tasarımı yapılmıştır. Yapılan Simufact, FEM analizleri ile kalıbın EKAP işleminin belirleyici parametreleri olan kenar ve köşe açılarının analizleri yapılarak optimum kalıp tasarımı gerçekleştirilmiştir.
- İçyapı görüntüleri incelendiğinde herhangi bir rotada işlem gören numunenin işlem görmemiş numuneye göre tane boyutunun önemli ölçüde küçüldüğü, tane sayısının arttığı belirlenmiştir. En uygun rotayı belirlemek adına 2 pasoda Bc, C ve R rotalarında işlem gören numunelerin içyapı görüntüleri kıyaslanmış ve tane boyutlarının birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. Kare kesitli EKAP kalıbı kullanılmasından dolayı, içyapı görüntülerinde orta yüzeyden kenarlara doğru tane boyutu değişiminin arttığı tespit edilmiştir. İşlem görmemiş numune ile Rota A arasında tane boyutu farkı %50 oranında değişirken Rota R'de % 63, Rota C'de % 67 oranında tane boyutu değişimi gözlenmiştir. Rota Bc kendi içinde incelendiğinde paso sayısı arttıkça homojenize olmuş taneler optik mikroskop analizinde görülmüştür. Rota Bc 4 pasoda tane boyutu 72 µm ile en düşük boyutuna ulaşmıştır.

Bc rotasında 4 pasoda yapılan işlem sonrası içyapı görüntülerinde kayma düzlemleri (deformasyon yönü, düzlemi) görülmüştür. Kare kesitli kanal sebebiyle dislokasyon yoğunluğunun fazla olduğu bölgeler belirlenmiştir. Ayrıca özellikle 3 ve 4. pasolardan sonra EKAP presleme yönü ile paralel olan tane yöneliminin belirginleştiği görülmüştür.

- Mikrosertlik analizlerinde, işlemsiz numunede 58 HV olan sertlik değeri A rotasında 62 HV, R rotasında 74 HV ve C rotasında 72 HV olarak belirlenmiştir. Paso sayısı arttığında Bc rotasında sertlik değerlerinin 2,3 ve 4 pasoda işlem gören numuneler için sırasıyla 96 HV,101 HV,117 HV olarak değiştiği görülmüştür.
- EKAP işlemi sonrası yapılan çekme analizlerinde işlem görmemiş numunede 150 MPa olan akma dayanımı A, R, C rotalarında işlem gören numunelerde büyük bir farklılık göstermezken Bc rotasında paso sayısı arttıkça akma değerinin arttığı gözlenmiş Bc rotasında 4 pasoda bu değer 217 MPa olduğu belirlenmiştir. Buna karşın gerinme değerleri % 34,2 ile işlemsiz numunede belirlenirken, Rota C de %31, Rota Bc 4 pasoda ise % 15,4 olarak tespit edilmiştir.
- Biyomalzeme olarak kullanılan alaşımın aşınma değerleri incelendiğinde işlem görmemiş numunenin sürtünme katsayısı değerinin 0,145771 olduğu, Rota A da 0,123934 Rota R ve Rota C de sırasıyla 0,121449 ve 0,118474 olduğu belirlenmiştir. Rota Bc de ise 2 pasoda sürtünme katsayısı değeri 0,113578 3 pasoda 0,083263 ve 4 pasoda 0,082694 olduğu belirlenmiş olup en iyi aşınma direnci değerinin rota Bc 4 pasoda olduğu tespit edilmiştir.
- Korozyon deneyleri sonucunda EKAP işlemi uygulanan numunelerin korozyon direncinin ve korozyona uğrama sürelerinin işlemsiz numuneye göre arttığı görülmüştür. İşlemsiz numunenin korozyon akım yoğunluğu 637×10^{-6} A/cm² olarak ölçülürken EKAP işlemi uygulanmış Rota Bc (4), Rota Bc (3), Rota Bc (2), Rota R, Rota C ve Rota A numuneleri için bu değer sırasıyla 143×10^{-6} A/cm², 172×10^{-6} A/cm², 179×10^{-6} A/cm², 455×10^{-6} A/cm², 393×10^{-6} A/cm² ve 502×10^{-6} A/cm² olarak ölçülmüştür. Bu farka malzemenin maruz kaldığı plastik deformasyon kaynaklı tane boyutunun küçülmesinin sebep olduğu düşünülmüştür. Fakat bu fark önemli bir ölçüde gerçekleşmemiştir.

Yukarıdaki analizler ışığında plastik deformasyona maruz kalan Zn-Ag-Cu alaşımının mekanik ve elektro-kimyasal özelliklerinin değiştirilmiş/geliştirilmiş olduğu görülmüştür. Biyomalzeme olarak kullanılan bu alaşım biyo araçlar imal edilirken talaş kaldırılmadan plastik deformasyonla şekillendirilmesi sırasında şekillendirilme özellikleri ön plana çıkmaktadır. Buna dayanarak alaşımın sertliğinin önemli olduğu durumlarda rota Bc 4 pasoda yapılan EKAP

analizlerinin daha uygun olduğu, çekme ve maksimum gerilmeler ile bu önermenin doğru olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında plastik deformasyon ile şekillendirilme söz konusu olduğunda gerinme değeriinin işlem görmemiş alaşımda yüksek olması Bc rotasında 4 pasoda gerinme değeriinin aşırı miktarda düşmesi deformasyon ile şekillendirmeye çok uygun olmadığını göstermiştir. Tüm analiz verileri ışığında optimizasyon yapıldığında gerek akma, maksimum gerilmeleri gerekse gerinme değeri en iyi olan numunenin rota C olduğu görülmüştür. Bunun yanında aşınma ve korozyon değeri incelenğinde rota Bc 4 paso ile işlem gören numunenin elektro kimyasal özelliklerinin arttığı belirlenmiştir.



KAYNAKLAR

- Akdoğan, E., & Şahbaz, M. (2022). Çok Yönlü Dövme İşleminin AA5083 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi. *European Journal of Science and Technology*, 34, 739–744. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1084992>
- Arpaçay, D. (2009). *Magnezyum AZ80 alaşımında yüksek basınç burulma işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi*.
- Atan, E. (2022). Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of ETP Copper Deformed by Equal Channel Angular Pressing (ECAP). *Deu Muhendislik Fakultesi Fen ve Muhendislik*, 24(72), 875–885. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2022247217>
- Attarilar, S., Salehi, M. T., Al-Fadhalah, K. J., Djavanroodi, F., & Mozafari, M. (2019). Functionally graded titanium implants: Characteristic enhancement induced by combined severe plastic deformation. *PLoS One*, 14(8), e0221491.
- Bagherpour, E., Qods, F., Ebrahimi, R., & Miyamoto, H. (2016). Microstructure evolution of pure copper during a single pass of simple shear extrusion (SSE): role of shear reversal. *Materials Science and Engineering: A*, 666, 324–338.
- Bayrak, Y. (2008). *Süper plastik şekil değiştirmenin alüminyum malzeme özelliklerine*. 33, 13–15.
- Beygelzimer, Y., Kulagin, R., Estrin, Y., Toth, L. S., Kim, H. S., & Latypov, M. I. (2017). Twist extrusion as a potent tool for obtaining advanced engineering materials: a review. *Advanced Engineering Materials*, 19(8), 1600873.
- Bulutsuz, A. G. (2017). Mekanik Özellikleri Geliştirilmiş Biyouyumlu İmplant Malzemelerinin Üretiminde Aşırı Plastik Deformasyon Tekniğinin Uygulanma Koşullarının Araştırılması. *Aşlı Günay Bulutsuz*.
- Divya, S. P., Nagaraj, M., Kesavamoorthy, M., Srinivasan, S. A., & Ravisankar, B. (2018). Investigation on the Effect of ECAP Routes on the Wear Behavior of AA2014. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71(1), 67–77. <https://doi.org/10.1007/s12666-017-1141-7>
- Eizadjou, M., Manesh, H. D., & Janghorban, K. (2009). Microstructure and mechanical properties of ultra-fine grains (UFGs) aluminum strips produced by ARB process. *Journal of Alloys and Compounds*, 474(1–2), 406–415. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.06.161>
- Elibol, Ç. (2020). Eş Kanallı Açısal Pres (EKAP) Yöntemi ile Şekillendirilmiş Ti-6Al-4V Alaşımının Mekanik Özellikleri ve Makroskobik Deformasyon Davranışı Arasındaki İlişki. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 20(4), 672–682. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.715210>
- Furukawa, M., Horita, Z., Nemoto, M., & Langdon, T. G. (2001). Processing of metals by equal-channel angular pressing. *Journal of Materials Science*, 36, 2835–2843.
- Ghalehbandi, S. M., Malaki, M., & Gupta, M. (2019). Accumulative roll bonding—a review. *Applied Sciences*, 9(17), 3627.
- Ghorbani, A., Zarei-Hanzaki, A., Dastranjy Nezhadfar, P., & Maghsoudi, M. H. (2019). Microstructural evolution and room temperature mechanical properties of AZ31 alloy processed through hot constrained compression. *International Journal of Advanced*

- Güral, A., Tekeli, S., Aytaç, A., & Karataş, Ç. (2011). *Bir Eşit Kanal Açısız Presleme Düzenineğinin Kurulması ve Model Olarak Seçilen Al-Zn-Mg-Cu Alaşımında Optimum Parametrelerin Belirlenmesi Construction of an Equal Channel Angular Pressing Unit and Determination of Optimum Parameters for Al-Zn-Mg-Cu Alloy* Ch. 243–248.
- Haghighi, R. D., Jahromi, S. A. J., Moresedgh, A., & Khorshid, M. T. (2012). A comparison between ECAP and conventional extrusion for consolidation of aluminum metal matrix composite. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(9), 1885–1892. <https://doi.org/10.1007/s11665-011-0108-9>
- Hall, E. O. (1951). The deformation and ageing of mild steel: II characteristics of the Lüders deformation. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 64(9), 742.
- Han, T., Huang, G., Ma, L., Wang, G., Wang, L., & Pan, F. (2019). Evolution of microstructure and mechanical properties of AZ31 Mg alloy sheets processed by accumulated extrusion bonding with different relative orientation. *Journal of Alloys and Compounds*, 784, 584–591. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.091>
- Hansen, N., & Ralph, B. (1982). The strain and grain size dependence of the flow stress of copper. *Acta Metallurgica*, 30(2), 411–417.
- Hekimoğlu, A. P., & TURAN, Y. E. (2019). Çinko Oranının Al-(5-50)Zn Alaşımlarının Yapısal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9, 16–25. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.381050>
- Huang, Y., & Langdon, T. G. (2013). Advances in ultrafine-grained materials. *Materials Today*, 16(3), 85–93.
- Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M., Wang, J., & Langdon, T. G. (1996). Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials. *Scripta Materialia*, 35(2).
- Kahriman, Ö. F. (n.d.). *Eşit kanallı açısız presleme (ekap) kalıplarının geliştirilmesi ve alüminyum malzeme uygulanması*. 2017, 51–59.
- Kesici, T. (2006). % 70 Cu-% 30 Zn pirinç alaşımlarında tav parametrelerinin derin çekilebilirliğe etkileri. Kırıkkale Üniversitesi.
- Klein, D. A. (1978). *Environmental impacts of artificial ice nucleating agents*.
- Kurt, H. İ. (2013). *Alüminyum-Magnezyum-Titanyum (Al-Mg-Ti) Alaşımlarının Mekanik Ve Mikroyapı Özelliklerine Magnezyum Ve Titanyum Elementlerinin Etkisinin Araştırılması* Doktora.
- Kuznetsov, G. M., Barsukov, A. D., & Krivosheeva, G. B. (1986). Calculation of Phase Equilibria of the Al--Zn System.(Translation). *Russ. Metall.*, 5, 195–198.
- Levin, Z. S., Wang, X., Kaynak, M., Karaman, I., & Hartwig, K. T. (2019). Strength and ductility of powder consolidated ultrafine-grain tantalum. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 80, 73–84.
- Nagasekhar, A. V., Chakkingal, U., Venugopal, P. . J. (1998). Mater. Process. Technol., 173, 2006, p. 53. *Materials Science and Engineering*, 257, 328–332.
- Öğüt, S. (2021). *Investigation on Mechanical Properties of Magnesium and Copper Alloys Processed by Expansion Equal Channel Angular Extrusion*. 1–111.
- Petch, N. J. (1953). The cleavage strength of polycrystals. *J. Iron Steel Inst.*, 174, 25–28.

- Purcek, G., Saray, O., Rubitschek, F., Niendorf, T., Maier, H. J., & Karaman, I. (2011). Effect of internal oxidation on wear behavior of ultrafine-grained Nb–Zr. *Acta Materialia*, 59(20), 7683–7694.
- Rajinikanth, V., Arora, G., Narasaiah, N., & Venkateswarlu, K. (2008). Effect of repetitive corrugation and straightening on Al and Al-0.25Sc alloy. *Materials Letters*, 62(2), 301–304. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.05.014>
- Segal, V. M. (1995). Materials processing by simple shear. *Materials Science and Engineering A*, 197(2), 157–164. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)09705-8](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)09705-8)
- Sekban, D. M. (2020). Eş Kanallı Açısız Presleme (Ekap) Uygulanan Gemi İnçeliğinin İyileştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(1), 240–251. <https://doi.org/10.21923/jesd.570536>
- Sha, G., Wang, Y. B., Liao, X. Z., Duan, Z. C., Ringer, S. P., & Langdon, T. G. (2009). Influence of equal-channel angular pressing on precipitation in an Al–Zn–Mg–Cu alloy. *Acta Materialia*, 57(10), 3123–3132.
- Shaeri, M. H., Shaeri, M., Ebrahimi, M., Salehi, M. T., & Seyyedein, S. H. (2016). Effect of ECAP temperature on microstructure and mechanical properties of Al–Zn–Mg–Cu alloy. *Progress in Natural Science: Materials International*, 26(2), 182–191. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2016.03.003>
- Su, C. W., Lu, L., & Lai, M. O. (2006). A model for the grain refinement mechanism in equal channel angular pressing of Mg alloy from microstructural studies. *Materials Science and Engineering A*, 434(1–2), 227–236. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.06.103>
- Su, Y., Cockerill, I., Wang, Y., Qin, Y. X., Chang, L., Zheng, Y., & Zhu, D. (2019). Zinc-Based Biomaterials for Regeneration and Therapy. *Trends in Biotechnology*, 37(4), 428–441. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2018.10.009>
- Thavarajah, D., Thavarajah, P., Sarker, A., & Vandenberg, A. (2009). Lentils (*Lens culinaris medikus* subspecies *culinaris*): A whole food for increased iron and zinc intake. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(12), 5413–5419. <https://doi.org/10.1021/jf900786e>
- Tie, D., Feyerabend, F., Mueller, W.-D., Schade, R., Liefelth, K., Kainer, K. U., & Willumeit, R. (2013). Antibacterial biodegradable Mg–Ag alloys. *European Cells & Materials*, 25, 284–298.
- Ulacia, I., Dudamel, N. V., Gálvez, F., Yi, S., Pérez-Prado, M. T., & Hurtado, I. (2010). Mechanical behavior and microstructural evolution of a Mg AZ31 sheet at dynamic strain rates. *Acta Materialia*, 58(8), 2988–2998.
- Valiev, R. Z., Estrin, Y., Horita, Z., Langdon, T. G., Zehetbauer, M. J., & Zhu, Y. (2016). Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation: Ten Years Later. *Jom*, 68(4), 1216–1226. <https://doi.org/10.1007/s11837-016-1820-6>
- 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(7), 881–981. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.003>
- Viceré, A., Roventi, G., Paoletti, C., Cabibbo, M., & Bellezze, T. (2019). Corrosion behavior of aa6012 aluminum alloy processed by ecap and cryogenic treatment. *Metals*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/met9040408>
- Xu, X. X., Nie, F. L., Zhang, J. X., Zheng, W., Zheng, Y. F., Hu, C., & Yang, G. (2010). Corrosion and ion release behavior of ultra-fine grained bulk pure copper fabricated by ECAP in Hanks solution as potential biomaterial for contraception. 64(4), 524–527.

<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2009.11.065>

- Yapici, G. G., Karaman, I., & Luo, Z.-P. (2006). Mechanical twinning and texture evolution in severely deformed Ti–6Al–4V at high temperatures. *Acta Materialia*, 54(14), 3755–3771.
- Yu, X., Li, Y., Wei, Q., Guo, Y., Suo, T., & Zhao, F. (2015). Microstructure and mechanical behavior of ECAP processed AZ31B over a wide range of loading rates under compression and tension. *Mechanics of Materials*, 86, 55–70.
- Zhang, S., Liu, Z., Xin, Y., Cai, Y., & Han, J. (2021). Effect of equal channel angular pressing on microstructure and mechanical performance of innovative nano MgO-added Mg-Zn-Ca composite as a biomaterial. *Materials Letters*, 304(August), 130604. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130604>
- Zhilyaev, A. P., & Langdon, T. G. (2008). Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. *Progress in Materials Science*, 53(6), 893–979. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.03.002>



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Muhammed Harun AKINCI
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Yavuz Selim Anadolu Öğretmen Lisesi
Lisans:	Erzurum Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği
Yüksek lisans:	
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	