

T.C.  
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



EŞİT KANALLI AÇISAL PRESLEME YÖNTEMİNİN İNCELENMESİ VE  
6063 ALÜMİNYUM ALAŞIMINA UYGULANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şehmuz DEVELİOĞLU  
(Y1413.080021)

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı  
Makine Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin Erol AKATA

Mayıs, 2017





T.C.  
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

**Yüksek Lisans Tez Onay Belgesi**

Enstitümüz Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makina Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı Y1413.080021 numaralı öğrencisi **Şehmuz DEVELİOĞLU**'nun "EŞİT KANALLI AÇISAL PRESLEME YÖNTEMİNİN İNCELENMESİ VE 6063 ALÜMİNYUM ALAŞIMINA UYGULANMASI" adlı tez çalışması Enstitümüz Yönetim Kurulunun 16.05.2017 tarih ve 2017/11 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından *aybırlığı* ile Tezli Yüksek Lisans tezi olarak  *Kabul* edilmiştir.

Öğretim Üyesi Adı Soyadı

İmzası

Tez Savunma Tarihi : 30.05.2017

1) Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin Erol AKATA

2) Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Behiye YÜKSEL

3) Jüri Üyesi : Doç. Dr. Mehmet BOZCA

.....  
.....  
.....

Not: Öğrencinin Tez savunmasında **Başarılı** olması halinde bu form **imzalanacaktır**. Aksi halde geçersizdir.





## YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “EŞİT KANALLI AÇISAL PRESLEME YÖNTEMİNİN İNCELENMESİ VE 6063 ALÜMİNYUM ALAŞIMINA UYGULANMASI” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (...05/2017)

Şehmuz DEVELİOĞLU





## ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca bilgi, tecrübe ve desteği ile bana yol gösteren Sayın hocam Prof.Dr. Hüseyin Erol AKATA'ya, Yüksek lisans programı süresince desteğini bizden esirgemeyen Sayın hocam Prof. Dr. Zafer UTLU'ya, kendilerinden ders almış olduğum Sayın hocam Yrd.Doç.Dr. Behiye YÜKSEL'e ve Sayın hocam Yrd.Doç.Dr. Sepanta NAİMİ'ye en derin şükranlarımı sunarım. Ayrıca sevgili arkadaşım Ömer Faruk Kahriman'a, kalıbın imalatı sırasında yardımlarından dolayı Kahraman Makine Sanayi Ticaret ve Limited Şirketine ve yapılan deneysel çalışmalar sırasında katkılarından dolayı İstanbul Aydın Üniversitesi Teknoloji merkezi ile İnşaat Mühendisliği laboratuvarları çalışanlarına çok teşekkür ederim. Eğitim hayatım boyunca bana verdikleri desteklerinden dolayı sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

**Mavis, 2017**

**Şehmuz DEVELİOĞLU**

**(Makina Mühendisi)**





## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	x
KISALTMALAR.....	xii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvi
ÖZET.....	xviii
ABSTRACT.....	xx
<b>1 GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2 AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON (APD) İŞLEMLERİ.....</b>	<b>5</b>
2.1 Aşırı Plastik Deformasyon (APD) Yöntemleri.....	5
2.1.1 Biriktirmeli haddeli birleştirme.....	5
2.1.2 Yüksek basınçta burma.....	6
2.1.3 Tekrarlı bükme ve doğrultma.....	7
2.1.4 Tekrarlı ekstrüzyon basması.....	8
<b>3 EŞİT KANALLI AÇISAL PRESLEME YÖNTEMİ (EKAP).....</b>	<b>9</b>
3.1 EKAP İşlem Parametreleri.....	12
3.1.1 Kalıp açıları.....	12
3.1.1.1 Kanal açısı.....	15
3.1.1.2 Dış kavis açısının etkisi ve Sonlu elemanlar analizi.....	17
3.1.2 Presleme hızı.....	22
3.1.3 Presleme sıcaklığı.....	23
3.1.4 İşlem rotaları.....	24
3.1.5 Geçiş sayısı.....	30
3.1.6 Geri presleme (Karşı basınç).....	32
3.1.7 Preslenecek malzeme kesiti.....	33
3.2 EKAP Mikroyapı.....	33
3.3 Eşit Kanallı Açısız Presleme İle Konvansiyonel Ekstrüzyon Karşılaştırılması.....	35
<b>4 ALTERNATİF EKAP YÖNTEMLERİ VE PARALEL KANALLI EKAP.....</b>	<b>37</b>
4.1 Döner Kalıp.....	37
4.2 Kenar Ekstrüzyon.....	38
4.3 Çok Geçişli Kalıp.....	38
4.4 Paralel Kanallı EKAP.....	39
<b>5 ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI.....</b>	<b>41</b>
5.1 İşlem Alüminyum Alaşımları.....	41
5.2 Döküm Alüminyum Alaşımları.....	44
5.3 Alüminyum Alaşımları Temper Tanımları.....	46
5.4 Alaşım Elementleri Ve Etkileri.....	47
<b>6 DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>51</b>
6.1 Deneyin Uygulanacağı Malzeme ve Özellikleri.....	51
6.2 EKAP Kalıbı.....	52

6.3	EKAP Deneyi .....	54
6.4	EKAP Presleme Kuvveti .....	56
6.5	Sertlik Ölçümü.....	57
6.6	Sonuçlar ve Yorum.....	58
6.7	Öneriler.....	59
<b>KAYNAKLAR .....</b>		<b>61</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>		<b>65</b>



## KISALTMALAR

<b>APD</b>	: Aşırı plastik deformasyon
<b>SPD</b>	: Severe plastic deformation
<b>EKAP</b>	: Eşit kanallı açısal presleme
<b>ECAP</b>	: Equal channel angular pressing
<b>EKAE</b>	: Eşit kanallı açısal ekstrüzyon
<b>SAED</b>	: Seçilmiş alan elektron difraksiyonu
<b>TEM</b>	: Geçirimli elektron mikroskobu
<b>SEM</b>	: Taramalı elektron mikroskobu
<b>AKM</b>	: Atomik kuvvet mikroskobu
<b>HSS</b>	: High speed steel (Yüksek hız çeliği)
<b>n</b>	: Nano
<b>μ</b>	: Mikro
<b>GPa</b>	: Gigapascal
<b>Φ</b>	: Kanal açısı
<b>Ψ</b>	: Dış kavis açısı
<b>V<sub>0</sub></b>	: Malzeme hızı
<b>Γ<sub>i</sub></b>	: Giriş yüzeyi
<b>Γ<sub>o</sub></b>	: Çıkış yüzeyi
<b>ε<sub>ef</sub></b>	: Efektif deformasyonu
<b>γ</b>	: Kayma deformasyonu
<b>N</b>	: Geçiş sayısı
<b>ε<sub>N</sub></b>	: N geçiş sonrası deformasyon miktarı
<b>K</b>	: Kelvin
<b>Al</b>	: Alüminyum
<b>Mg</b>	: Magnezyum
<b>Sc</b>	: Skandiyum
<b>r</b>	: Kavis yarıçapı
<b>MPa</b>	: Megapascal
<b>W<sub>0</sub></b>	: Başlangıç kalınlığı
<b>W<sub>1</sub></b>	: İşlemden sonraki kalınlık
<b>Ppm</b>	: Milyonda bir birim
<b>HBT</b>	: Brinell sertlik ölçme metodu
<b>HRC</b>	: Rockwell sertlik değeri



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : Farklı Pres Sayılarında dönme yönleri .....	27
Çizelge 3.2 : Farklı rotalardaki işleme yönleri .....	28
Çizelge 3.3 : Farklı işlem Rotalarında için açısal aralıklar .....	30
Çizelge 5.1 : İşlem alüminyum alaşımlarının gösterimi .....	42
Çizelge 5.2 : Alüminyum döküm alaşımlarının gösterimi .....	44
Çizelge 5.3: Alüminyum Alaşımları Temper Tanımları .....	46
Çizelge 6.1 : Deneylerde kullanılan 6063 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi	51
Çizelge 6.2 : 1.2344 Sıcak iş takım çeliği kimyasal bileşimi .....	52
Çizelge 6.3 : 6063 Alüminyum alaşımı için geçiş sayısına bağlı olarak sertlik değişimi .....	58



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Biriktirmeli haddeli birleştirme prosesinin şematik görüntüsü .....	6
Şekil 2.2 : Yüksek basınç burma prosesinin şematik görüntüsü .....	7
Şekil 2.3 : Tekrarlı bükme ve doğrultma döngüsünün şematik süreci .....	7
Şekil 2.4 : Tekrarlı ekstrüzyon basması şematik gösterimi .....	8
Şekil 3.1 : EKAP yöntemi için temel kalıp geometrisi ve işlem parametreleri .....	9
Şekil 3.2 : EKAP işleminde malzemede meydana gelen kaymanın şematik gösterimi .....	10
Şekil 3.3 : EKAP'ta kullanılan deformasyon modeli .....	11
Şekil 3.4 : EKAP ilkeleri .....	13
Şekil 3.5 : Farklı iç kavis açısı .....	14
Şekil 3.6 : Kanal açısının etkisini değerlendirmek için kullanılan kalıpların gösterimi .....	15
Şekil 3.7 : Şekil 3.6'da gösterilen kalıplar kullanılarak elde edilen SAED desenleri ve mikroyapılar .....	16
Şekil 3.8 : EKAP tarafından işlenmeden önce ve işlendikten sonra saf tungsten numunelerinin görünüşü .....	16
Şekil 3.9 : $\Phi=60^\circ$ kanal açısına sahip olan bir EKAP kalıbının şematik bir gösterimi .....	17
Şekil 3.10 : (a) EKAP'de kullanılan terimler, (b) deformasyonu izlemek için seçilen düğümler .....	18
Şekil 3.11 : Köşe açısı ( $\Psi$ ) ile kavis yarıçapı (r) arasındaki ilişki .....	19
Şekil 3.12 : Çeşitli dış kavis açılara sahip bir gerinim sertleştirme malzemesinin deformasyon modeli (a-f) .....	21
Şekil 3.13 : (a) $8.5 \times 10^{-3}$ mm/s ve (b) 7.6 mm/s basma hızlarında dört EKAP geçişinden sonra saf Al'ın TEM mikrografları .....	22
Şekil 3.14 : 0.25, 0.81, 2.50 ve 25.0 mm/s pres hızlarında ve $325^\circ \text{C}$ 'de EKAP sonrası CP Ti görüntüleri .....	23
Şekil 3.15 : EKAP işlem rotaları .....	25
Şekil 3.16 : 1. presleme sonucu değişimin x,y,z, ortagonal yüzeylerdeki gösterimi .....	25
Şekil 3.17 : 2. presleme sonrası gösterim (rota A) .....	26
Şekil 3.18 : 2. presleme sonrası gösterim (rota B) .....	26
Şekil 3.19 : 2. presleme sonrası gösterim (rota C) .....	26
Şekil 3.20 : X,Y ve Z düzlemlerinde oluşan kayma sistemleri .....	28
Şekil 3.21 : 1, 2, 3 ve 4 geçiş sonunda A, B <sub>A</sub> , B <sub>C</sub> ve C işlem rotaları için X, Y ve Z düzlemlerinde kayma modelleri .....	29
Şekil 3.22 : Karbon çelikleri için çekme mukavemeti ve geçiş sayısı arasındaki ilişki .....	31
Şekil 3.23 : Karbon çelikleri için toplam uzama ve geçiş sayısı arasındaki ilişki [4] .....	31
Şekil 3.24 : % 99.5 saf alüminyumun optik mikroyapıları: (a) preslenmemiş (b) Bir geçiş sonrası (c) iki geçiş sonrası (d) üç geçiş sonrası (e) dört geçiş sonrası .....	34



<b>Şekil 3.25</b> : 8 geçiş sonrası % 99.5 saf alüminyumun AFM görüntüsü .....	34
<b>Şekil 3.26</b> : Konvansiyonel Ekstrüzyon kalıp konstrüksiyonu .....	35
<b>Şekil 4.1</b> : Döner EKAP kalıbı: (a) Başlangıç durumu, (b) 1 geçiş sonrası, (c) Kalıbın 90° döndürülmüş hali .....	37
<b>Şekil 4.2</b> : Kenar ekstrüzyon kalıbı .....	38
<b>Şekil 4.3</b> : Çok geçişli EKAP kalıbı .....	39
<b>Şekil 4.4</b> : Paralel kanallı EKAP kalıbı prensipleri: (a) N yönünde kaymanın şematik görüntüsü, (b) Simülasyon ile elde edilen deformasyon zonları, (c) Deneysel EKAP kalıbı .....	39
<b>Şekil 6.1</b> : EKAP uygulanmamış numune .....	51
<b>Şekil 6.2</b> : EKAP kalıp çekirdeği: a) Üst görünüşü, b) Parçaların yan görünüşü, c) Alt görünüşü .....	52
<b>Şekil 6.3</b> : EKAP kalıp parçaları: a) Dış taşıyıcı gövde, b) Alt kapak ve civatalar, c) Üst kapak ve civatalar, d) Üst sıkıştırma parçası, e) Alt sıkıştırma parçası, f) İç bilezik ve çekirdek, g) Çıkarıcı altlık .....	53
<b>Şekil 6.4</b> : EKAP deneyinin yapılışı .....	54
<b>Şekil 6.5</b> : Presleme ıstampası .....	55
<b>Şekil 6.6</b> : EKAP 1 geçiş sonrası gösterim .....	55
<b>Şekil 6.7</b> : EKAP 2 geçiş sonrası gösterim .....	55
<b>Şekil 6.8</b> : Deneysel çalışmada kullanılan üniversal test cihazı .....	56
<b>Şekil 6.9</b> : EKAP geçişi sırasında uygulanan maksimum kuvvet miktarı .....	57
<b>Şekil 6.10</b> : EMCO-TEST DJ10 sertlik ölçüm cihazı .....	57
<b>Şekil 6.11</b> : EKAP geçiş sayısına bağlı sertlik grafiği .....	58

# EŞİT KANALLI AÇISAL PRESLEME YÖNTEMİNİN İNCELENMESİ VE 6063 ALÜMİNYUM ALAŞIMINA UYGULANMASI

## ÖZET

Aşırı Plastik Deformasyon (APD) işlemleri ultra ince taneler oluşturmak için metal kütesine ultra büyüklükte bir plastik gerilmenin uygulandığı metal şekillendirme prosesidir. APD sürecinin temel amacı çevreye uyumlu, yüksek mukavemetli ve hafif parçalar üretmektir. Eşit Kanallı Açısal Presleme (EKAP) yöntemi düşük sıcaklıklarda mikron altı, ve nano boyutta tane yapısına sahip malzemelerin üretildiği Aşırı Plastik Deformasyon (APD) işlemi ile tane inceltme yöntemidir. EKAP yöntemi uygulanan malzemelerde üstün fiziksel ve mekanik özellikler elde edilmektedir. EKAP işlemi uygulanan malzemeler yüksek mukavemet, iyi süneklik ve düşük sıcaklıklarda süperplastik davranışı göstermektedir. İşlem sürecinde malzeme aynı şekle ve kesit boyutuna sahip iki kanaldan oluşan bir kalıpta preslenmektedir.

EKAP işlemi kalıp açıları, presleme hızı, presleme sıcaklığı, işlem rotaları, geçiş sayısı, geri presleme ve preslenecek malzeme kesiti olmak üzere çeşitli işlem parametrelerini içermektedir.

Bu çalışmada altı ana bölüm bulunmaktadır. Çalışmanın birinci bölümünde Aşırı plastik deformasyon ve Eşit Kanallı Açısal Presleme yöntemi hakkında genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümünde Aşırı Plastik Deformasyon işlemleri, üçüncü bölümünde Eşit Kanallı Açısal Presleme yöntemi ve işlem parametreleri, dördüncü bölümde Alternatif EKAP yöntemleri ve Paralel Kanallı EKAP yöntemi anlatılmıştır. Beşinci bölümde Alüminyum ve Alaşımları hakkında açıklamalar yapılmıştır. Altıncı bölümde EKAP deneyinin uygulanacağı malzeme, EKAP kalıbı, EKAP deneyi, presleme kuvveti, sertlik ölçümü, deney sonuçları ve öneriler konuları incelenmiştir.

DeneySEL bölümünde daha önce yapılan EKAP kalıplarından daha farklı özelliklere sahip yeni bir kalıp tasarımı kullanılmıştır. Kalıbının imalatı ve numunenin hazırlanması sırasında kullanılan malzemeler hakkında bilgiler verilmiştir. EKAP işlemi için tasarlanan kalıp 90° kanal açısına ve 0° dış kavis açısına sahip kanallardan oluşmaktadır. Uygulama işlemi sırasında rota A kullanılmıştır. İşlem kalıba ve numuneye herhangi bir sıcaklık uygulamadan 10 mm/dak pres zımbası ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu yeni kalıpta 10 mm x 10 mm x 54 mm ölçülerindeki 6063 Alüminyum alaşımı malzemeye arka arkaya 2 presleme işlemi uygulanmıştır. Numunenin ilk halinin, 1. presleme sonrası halinin ve 2. presleme sonrası halinin Brinell sertlik değerleri ölçülmüş ve değerlendirilmiştir. Ayrıca 1. presleme sırasında uygulanan kuvvet ile 2. presleme sırasında uygulanan kuvvet belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** EKAP, APD, Ultra ince tane, 6063 Alüminyum Alaşımı, Sertlik, Mekanik özellikler



# EXAMINATION OF EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING METHOD AND APPLICATION TO 6063 ALUMINIUM ALLOY

## ABSTRACT

Severe Plastic Deformation (SPD) processes are metal forming processes in which an ultra-large plastic strain is applied to metal mass to form ultra fine grains. The main aim of the APD process is to produce high strength and lightweight parts that are compatible with the environment. The Equal Channel Angular Pressing (ECAP) method is a method of grain refinement by the Severe Plastic Deformation (SPD) process in which materials with grain structure at submicron and nano size are produced at low temperatures. Superior physical and mechanical properties are obtained in ECAP applied materials. The materials subjected to ECAP treatment show high strength, good ductility and superplastic behavior at low temperatures. In the process, the material is pressed into a mold consisting of two channels having the same shape and cross-sectional dimension.

ECAP process includes various process parameters such as die angles, pressing speed, pressing temperature, process roots, number of passes, back press and material to be pressed.

There are 6 main sections in this study. In the first part of the work, general information about severe plastic deformation and equal channel angular pressing method is given. In the second part, severe plastic deformation processes, in the third part, equal channel angular pressing method and process parameters, in the fourth part, alternative ECAP methods and parallel channel ECAP method are explained. In the fifth chapter, explanations were made about Aluminum and Alloys. In the sixth part, the material to be applied to the ECAP test, ECAP mold, ECAP test, pressing force, hardness measurement, test results and suggestions were examined.

In the experimental section, a new mold design with different properties than previous ECAP molds was used. Information has been given on the materials used during the preparation of the mold and the preparation of the sample. The mold designed for ECAP process consists of channels with 90° channel angle and 0° angle of curvature. Route A was used for during the application process. The process was carried out at a punching speed of 10 mm / min without applying any temperature to the mold and sample. In this new mold made, 6063 Aluminum alloy material measuring 10 mm x 10 mm x 54 mm applied 2 consecutive pressing processes. The Brinell hardness values of the first sample, the first post-press, and the second post-press were measured and evaluated. In addition, the force applied during 1st pressing and the force applied during 2nd pressing are determined and compared.

**Keywords:** *ECAP, SPD, ultra fine grain, 6063 aluminium alloy, hardness, mechanical features*





## 1 GİRİŞ

Endüstri ve proseslerinde ultra ince taneli ve nano kristal malzemeler ile ilgili bilim dalı önemli bir büyüme göstermektedir. Bu malzemelerdeki diğerlerinden farklı ve önemli özellikler endüstrinin ilgilisi çekmektedir [1].

Ultra ince taneli boyutlarda malzemelerin imalatı konusuna büyük ilgi vardır. Bu ilgi ultra ince taneli materyallerin Hall-Petch ilişkisiyle düşük sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve yüksek test sıcaklıklarında süperplastikliğe ulaşma potansiyeli gibi çeşitli cazip özellikleri sundukları için ortaya çıkar. Bu materyalleri hazırlamak için halen inert gaz kondansasyonu, yüksek enerjili bilyalı öğütme ve kayma aşınması yöntemleri kullanılmaktadır. Bununla birlikte bu prosedürlerin dezavantajı imal edilen materyallerin tamamen yoğun olmaması ve büyük numunelerin imalatı için bu tekniklerle ölçeklendirmenin zor olmasıdır. Bu zorlukların bir sonucu olarak dikkat aşırı plastik deformasyon (APD) içeren prosedürleri kullanarak çok ince taneli materyallerin geliştirilmesine odaklanmıştır [2].

Plastik deformasyon farklı malzemeler için yapı değişikliği ve özellik geliştirme için etkili bir yöntemdir. Şimdiye kadar ekstrüzyon, dövme ve haddeleme gibi geleneksel metal şekillendirme işlemleri bu amaca ulaşmak için kullanılmıştır. Bu proseslerde başlangıçtaki malzeme kesiti çok fazla azalmakta, yüksek basınçlar gerektirmekte ve çalışma esnasında gerilme-deformasyon düzensizliği oluşmaktadır. Çoğu zaman güçlü makinelere ve pahalı aletlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar yüksek kaliteli ve büyük ürünler üretirken aşılması gereken zor problemlerdir. Bu durum konvansiyonel işlemlerin optimum olmadığını ve ileri teknoloji ile özel deformasyon yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiği göstermektedir [3].

Aşırı plastik deformasyon (APD) işlemleri ultra ince taneler oluşturmak için metal kütesine ultra büyüklükte bir plastik gerilmenin uygulandığı metal şekillendirme prosesidir. APD sürecinin temel amacı çevreye uyumlu, yüksek mukavemetli ve hafif parçalar üretmektir. Haddeleme, dövme ve ekstrüzyon

gibi geleneksel metal şekillendirme işlemlerinde uygulanan plastik deformasyon genellikle yaklaşık 2.0'dan düşüktür. Çok geçişli haddeleme, çekme ve ekstrüzyon işlemleri 2.0'dan daha büyük bir plastik deformasyona kadar gerçekleştirildiğinde kalınlık ve çap çok ince hale gelir ve yapısal parçalar için kullanılamaz. Şekil değiştirmeden metal kütlesi üzerinde aşırı büyük bir gerilme elde etmek için APD prosesleri geliştirilmiştir [4].

Plastik deformasyon prosesleri ile ilgili olarak aşırı plastik deformasyon (APD) metodu yüksek deformasyon oranlarına bağlı olarak basit kalıplar ve kalıp düzenlemeleri ile yüksek mukavemet artışının ve özellikle tanecik boyutunun inceltilmesinin en etkili yoludur. Bu tür işlemlerde tek geçişte bile nispeten % 100'e veya daha yüksek seviyelere kadar deformasyonlar elde edilebilir [5].

Aşırı plastik deformasyon yöntemleri malzemelerde nano yapı oluşumunu geliştirirken dikkate alınması gereken bir takım şartları sağlamalıdır. Öncelikle yüksek açılı tane sınırlarına sahip ultra ince taneli yapılar elde etmek önemlidir. İşlenmiş malzemelerin kararlı özelliklerinin sağlanması için numunenin tüm hacminde tek biçimli nano yapılar oluşturulması gereklidir. Ayrıca numuneler büyük plastik deformasyonlara maruz kaldıklarında mekanik bir hasar veya çatlak olmamalıdır. Haddeleme, çekme, ekstrüzyon gibi geleneksel plastik deformasyon yöntemleri bu gereksinimleri karşılayamamaktadır [6].

Basit kayma yöntemi ile metal çalışması yapı ve doku oluşumu için ideale yakın deformasyon yöntemi olarak görülebilir. Eşit kanallı açısız presleme (EKAP) bu yöntemi gerçekleştirmek için kullanılan özel bir endüstriyel prosestir. Geleneksel metal işleme yöntemlerine kıyasla bu proses bir takım avantajlara sahiptir. En önemlisi ürünleri elde edebilmek için nispeten düşük basınç ve yük altında çok büyük, tamamen üniform ve tek yönlü deformasyonların üretilmesidir. Çeşitli metallerin ve alaşımların hem yapısında hem de fiziksel-mekanik özelliklerinde görülen alışılmadık etkiler malzeme işlenmesinde basit kayma yönteminin uygulanmasını önermektedir [3].

Mevcut teknolojilerle süperplastisite yalnızca kısıtlı alaşımlarda, yüksek sıcaklıklarda, çok düşük gerilme oranlarında ve sac ürünlerinde elde edilmektedir. EKAP işleminde yeteri sayıda geçiş sonrası birçok alaşım yüksek gerilme hızında veya düşük sıcaklıklarda süperplastik özellik göstermektedir.



Böylece birçok malzeme EKAP işlemi sonrasında süperplastik özellik sergileyebilmektedir. Mikron altı tane yapısına sahip malzemelerde ve diğer işleme teknikleriyle elde edilemeyen büyük kesitlerde yüksek mukavemet ve iyi süneklik kombinasyonu sağlanmaktadır. Özel elastik, manyetik, süper iletken, optik, yarı iletken ve diğer alaşımların birçok fiziksel özelliklerinin çok geçişli EKAP sırasında iyileştirilebileceği veya modifiye edilebileceği bulunmuştur [7].

EKAP tarafından işlenen polikristal malzemeler benzersiz bir mikro yapıya ve olağanüstü mekanik özelliklere sahiptir. İşlenen malzemeler ultra yüksek mukavemet, yüksek süneklik ve aynı zamanda süperplastik şekillendirme davranışı göstermektedir. EKAP malzemelerinde gözlemlenen yüksek mukavemet ve süneklik aşırı plastik deformasyonla işlenen metallerin mikroyapı özellik ilişkileri konusundaki mevcut anlayışı zorlamaktadır [8].

Polikristal malzemelerin tane boyutu 1 nm - 100 nm aralığında ise nanokristal, ortalama tane boyutu 100 nm - 500 nm aralığında ise ultra-ince taneli, tane boyutu 0.5 µm - 10 µm aralığında ise ince taneli ve tane boyutu 10 µm'den büyükse kaba taneli olarak sınıflandırılabilir [9].

EKAP yönteminin cazip bir işleme tekniği olmasının nedenleri:

- **Birincisi**, oldukça büyük malzemelere uygulanabilir böylece geniş bir yelpazede yapısal uygulamalar için kullanılacak malzemeler üretme potansiyeli vardır.
- **İkincisi**, geniş bir alaşım aralığı üzerinde kolayca uygulanabilen nispeten basit bir prosedürdür. EKAP'ta kullanılan ekipman çoğu laboratuarda kolaylıkla temin edilebilmektedir.
- **Üçüncüsü**, EKAP farklı kristal yapıya sahip materyallerden, çökeltme ile sertleştirilmiş alaşımlara, intermetaliklere ve metal matris kompozitlerine kadar birçok materyal için geliştirilebilir ve uygulanabilir.
- **Dördüncüsü**, yeterince yüksek bir gerilmeyi sağlayan preslemelerle malzemelerde makul homojenlik elde edilir.
- **Beşincisi**, işlem nispeten büyük numunelerin preslenmesi için ölçeklendirilebilir ve ticari metal işleme yöntemi olarak kullanılmak üzere EKAP geliştirmek için bir potansiyel vardır. Bu çeşitli ilgi çekici özellikler birçok deneysel çalışmaya ve yeni gelişmelere neden olmuştur [10].



## **2 AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON (APD) İŞLEMLERİ**

APD prosesi numunenin toplam boyutlarında herhangi bir önemli değişiklik yapılmasına gerek olmadan çok yüksek bir gerilme uygulanarak yoğun bir hidrostatik basınç altında metal şekillendirme yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Büyük kayma gerilmeleri ile kombinasyon halinde yüksek bir hidrostatik basıncın varlığı yüksek yoğunluklu kristal kafes kusurlarının özellikle de tanelerin belirgin şekilde inceltmesine neden olabilen dislokasyonların üretilmesi için şarttır. Yük metal üzerine uygulandığında malzeme akma kuvveti olarak bilinen bir noktaya ulaşır. Bu noktaya geldiğinde metali oluşturan moleküllerin modeli kaymaya başlar. Nihai sonuç moleküllerin nesneye uygulanan dış gerilme ile şekillendirilen bir düzende yeniden hizalanmasıdır. İş parçasının boyutları bir APD operasyonunda hemen hemen değişmediğinden süreç son derece yüksek gerilmeleri uygulamak için art arda tekrar edilebilir. Aşırı plastik deformasyonda nesnenin boyutunu veya şeklini tersinir olmayan bir şekilde değiştirmek için yeterli gerilme metal üzerine etki etmektedir [11]. Çoğu metal şekillendirme işlemleri malzeme ya da takım hatası ile sınırlı olduğundan aşırı plastik deformasyon (APD) elde etmek zor bir iştir [12].

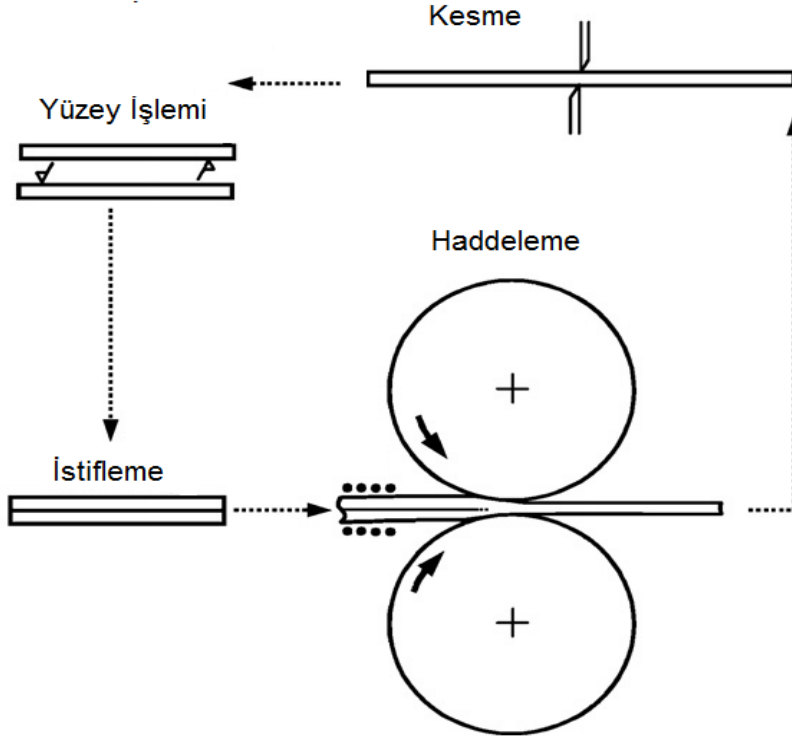
Geliştirilen aşırı plastik deformasyon teknikleri arasında en çok karşılaşılan yöntemler Biriktirmeli haddeli birleştirme, Yüksek basınçta burma, Tekrarlı bükme ve doğrultma, Tekrarlı ekstrüzyon basması ve Eş kanallı açısız presleme yöntemleridir.

### **2.1 Aşırı Plastik Deformasyon (APD) Yöntemleri**

#### **2.1.1 Biriktirmeli haddeli birleştirme**

Biriktirmeli haddeli birleştirme süreci prensibi sistematik olarak Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Tabakaların istiflenmesi ve konvansiyonel rulo yapıştırma işlemi tekrarlanır. İlk olarak bir şerit düzgün bir şekilde başka bir şerit üzerine yerleştirilir. İki şeridin ara yüzleri arasındaki bağlanma mukavemetini arttırmak için önceden yüzey işlemine tabi tutulur. İki katman geleneksel haddeleme

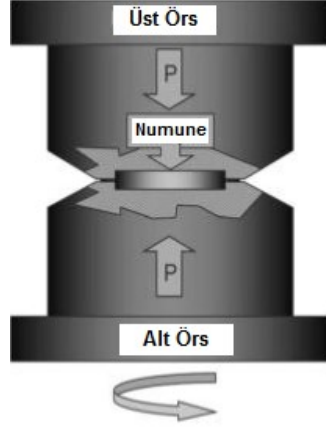
işleminde olduğu gibi birbirine birleştirilir. Ardından haddelenmiş malzemenin uzunluğu iki yarıya bölünür. Şeritler yine yüzey işleme tabi tutulur tekrar istiflenir ve haddelenir. Bu prosedürler ilke olarak sınırsız olarak tekrar edilebilir böylece malzemeye çok büyük bir plastik gerilme uygulanabilir [12].



Şekil 2.1: Biriktirmeli haddeli birleştirme prosesinin şematik görüntüsü [12]

### 2.1.2 Yüksek basınçta burma

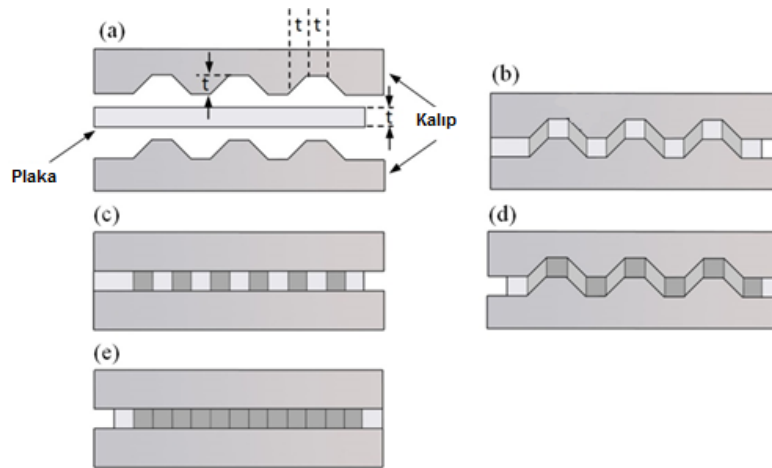
Yöntem Şekil 2.2’de gösterildiği gibi burulma zorlamasıyla yüksek (GPa) basınç kombinasyonunu içerir. Metodun önemli bir engeli sadece 10-15 mm çapında ve 1 mm kalınlığında küçük madeni paralar şeklindeki numunelerin işlenebilmesidir. Boyut kısıtlamaları nedeniyle Yüksek basınçta burma tarafından üretilen numuneler öncelikle araştırma amaçlı kullanılır. Birçok APD yönteminde olduğu gibi Yüksek Basınçta Burma yönteminde de önemli bir sorun deformasyonun homojen olmamasıdır [12].



Şekil 2.2 : Yüksek basınç burma prosesinin şematik görüntüsü [12]

### 2.1.3 Tekrarlı bükme ve doğrultma

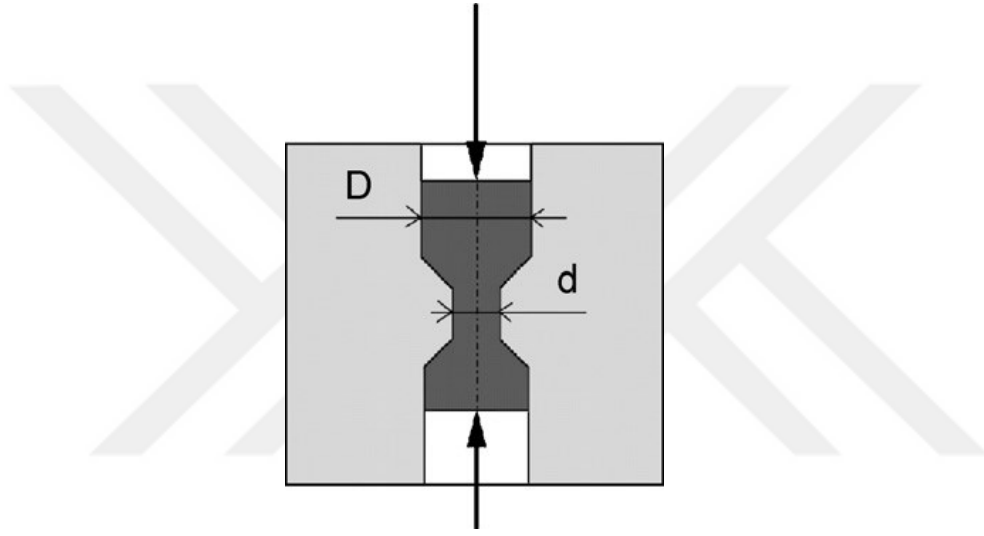
Tekrarlayan oluk açma ve düzeltmeye dayanan bir APD metodudur. Bu yöntem düz levhanın oluklu aletlerle bükülmesini ve daha sonra düz aletle levhanın düz şekle getirilmesini içerir. Malzemenin oluklara basılması ve daha sonra bir dizi düz kalıp arasında düzeltilmesi durumunu gösteren prosesin ayrıntıları Şekil 2.3'de gösterilmiştir. Kaba taneli yapıyı inceltmek için gerekli olan etkili gerinimi elde etmek için işlemin tekrarlanması gereklidir. Yapının inceltmesinde saca veya plaka metale büyük plastik deformasyonunun uygulanabilmektedir. Bununla birlikte bu prosesin bir dezavantajı yüklenen gerilmeye bağlı olarak mikro yapıda deformasyon heterojenliğinin varlığıdır [11].



Şekil 2.3 : Tekrarlı bükme ve doğrultma döngüsünün şematik süreci [13]

#### 2.1.4 Tekrarlı ekstrüzyon basması

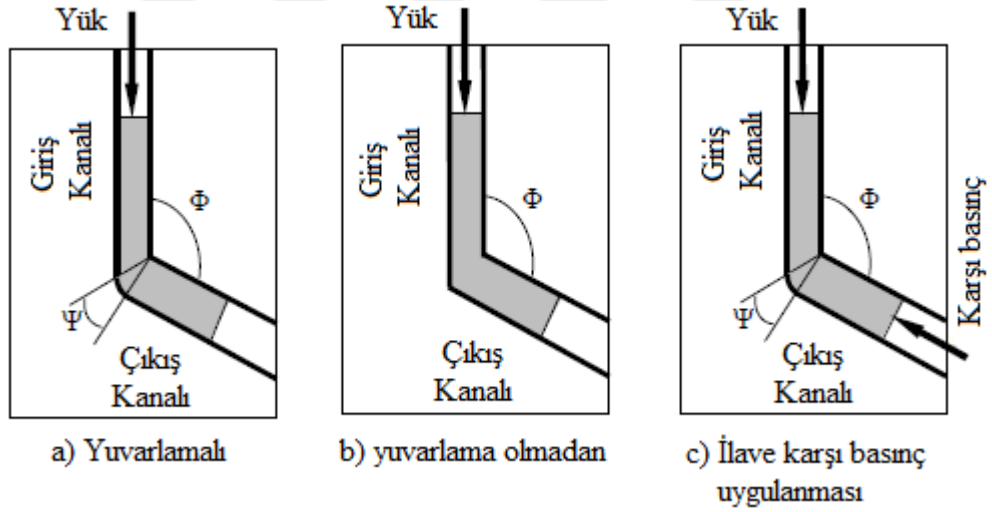
Şekil 2.4'de gösterildiği gibi işlem sırasında hazne içerisinde bir numune bulunur ve daha sonra geriye ve ileriye doğru tekrarlı ekstrüzyon yapılır. Bu işlem n geçişte sonra orijinal numunenin şeklini muhafaza ederek büyük deformasyonuna sağlamaktadır. İşlem sürecinde malzeme her iki uçtan sıkıştırıldığından yüksek bir hidrostatik basınç uygulanmaktadır. Ekstrüzyon sıkıştırma yükü yüksek olduğundan özel ön gerilmeli araçlar gereklidir aksi takdirde takım ömrü kısalmır. Bu işlem alüminyum alaşımları gibi yumuşak malzemelerin işlenmesi için daha uygundur [4].



Şekil 2.4 : Tekrarlı ekstrüzyon basması şematik gösterimi [4]

### 3 EŞİT KANALLI AÇISAL PRESLEME YÖNTEMİ (EKAP)

Eşit kanallı açısız ekstrüzyon (EKAE) olarak da bilinen eşit kanallı açısız presleme (EKAP) yöntemini ilk olarak Segal ve çalışma arkadaşları 1970’li ve 1980’li yıllarda Sovyetler birliğinde Minskteki enstitüde ortaya çıkarmışlardır. Temel amaç metal malzemelere şekil verebilmek için çubuklara yüksek miktarda yük uygulayarak kayma gerilmesine maruz bırakmaktır. Amaç başarılı olmuştur ama EKAP yöntemi bilim dünyasında yeterli ilgi görmemiştir. Bu durum 1990’lı yıllarda değişmiştir. Raporlar ve çalışmalar yeni ve benzersiz özelliklere sahip ultra ince taneli ve mikrometre altı metalleri üretmek için EKAP ürünlerindeki potansiyeli ortaya koymuştur. Faydalı sonuçlar ve çalışmalar EKAP yöntemini endüstriyel bir uygulama haline getirmiştir [14].



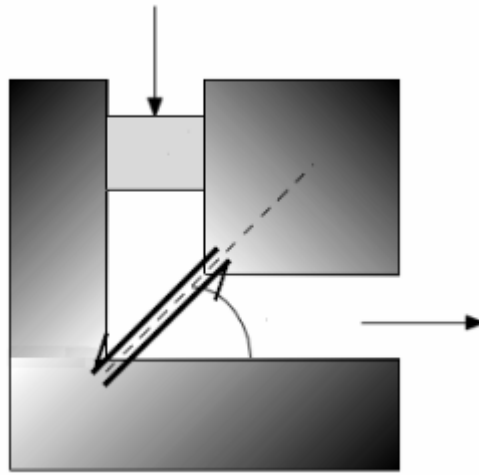
Şekil 3.1 : EKAP yöntemi için temel kalıp geometrisi ve işlem parametreleri [15]

Eşit kanallı açısız presleme prosesi bir malzemenin aynı şekle ve kesit boyutuna sahip iki kanaldan oluşan bir kalıpta preslenmesini işlemidir. Kalıpta Şekil 3.1’de gösterildiği gibi kanal açısı ( $\Phi$ ) ve iki kanalın kesişiminin dış noktasında eğrilik yayını tanımlayan dış kavis açısı ( $\Psi$ ) bulunmaktadır. Malzeme kalıp içinde preslenirken iki kanalın kesiştiği noktada Şekil 3.2’de gösterildiği gibi iki çizgi ile gösterilen kayma düzlemi boyunca deforme olur.  $\Psi=0^\circ$  bir dış köşe

açısı kullanılıyorsa kayma düzlemi sabittir. Sıfır olmayan açılar kullanılırsa kayma düzlemi köşe şeklini izleyerek kademeli olarak döner [16].

Numune esas olarak basit kayma deformasyonuna uğrar ve aynı kesit geometrisini korur. Presleme işlemi ile malzemenin tane büyüklüğünü özelliği tarafından belirlenen ölçüye kadar inceltmek üzere geçişleri tekrarlamak mümkündür. İşlem aynı zamanda malzemede güçlü kristalografik dokunun oluşmasını sağlar. EKAP'ta malzeme her geçiş arasında eksenini etrafında döndürülerek farklı rotalar oluşturulması mümkündür [17].

EKAP'ın en karakteristik özelliği işlemden sonra malzemenin kesit alanını sabit tutmaktır. Dolayısıyla kesit değişikliği olmaksızın yüksek gerilmelerle plastik deformasyon mümkündür. Bir numune plastik gerilmeyi arttırmak için birden fazla geçişle ciddi deformasyona maruz kalabilir. Bu süreçte, işlem sırasında parçanın plastik deformasyon davranışına dair bilgi, kalıp tasarımı, hız, sıcaklık, sürtünme ve ön şekil tasarımı gibi optimum işlem koşullarının belirlenmesi için çok önemlidir [18].



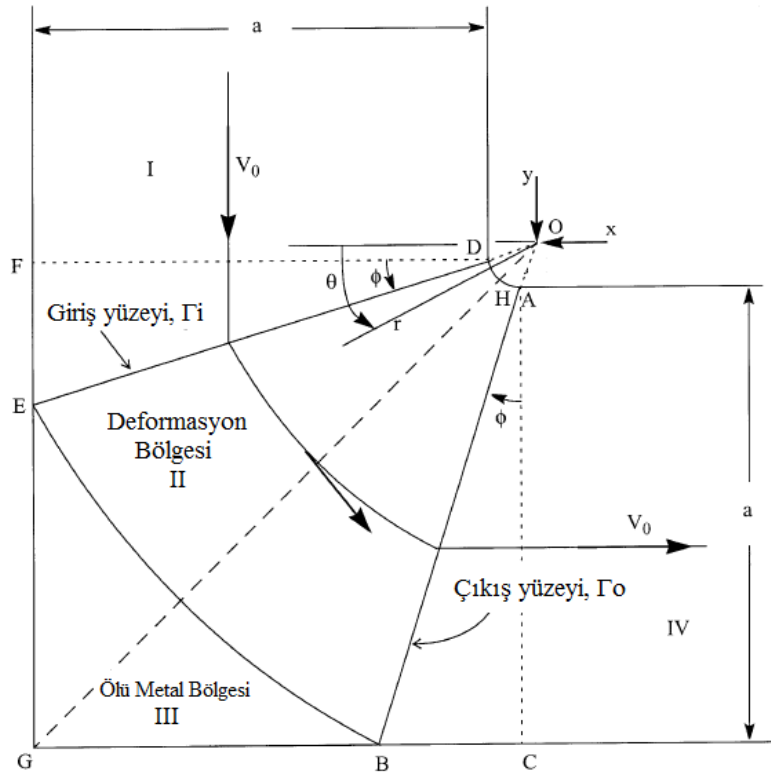
**Şekil 3.2** : EKAP işleminde malzemede meydana gelen kaymanın şematik gösterimi [8]

EKAP işleminde yüksek miktardaki yük ıstamp ve diğer kalıp parçaları için yüksek mukavemetli malzemeler gerektirir. Burulma küçük kesitlere ve yüksek yüklere bağlı olarak zımbalar için büyük bir sorundur. Kare ve dikdörtgen kesitli kalıp köşelerinde çok yüksek gerilme konsantrasyonundan dolayı çatlama oluşmaktadır [19]. Burulma riskini gidermek için zımbalar bazen kısa parçalar halinde yapılır ve kalıplara düzgün şekilde yerleştirilir. Bazı durumlarda çentik



etkisini ve dolayısıyla çatlak oluşumu en aza indirmek için kanal kesitleri dairesel olarak yapılır [15].

Deformasyon modelinde Şekil 3.3'de gösterildiği gibi EKAP kalıbı dört bölüme ayrılmıştır. Bölge I'de malzeme  $V_0$  hızıyla rijit bir şekilde aşağı doğru hareket eder. "Deformasyon bölgesi" olarak adlandırılan Bölge II malzemenin kesintisiz plastik deformasyona uğradığı yerdir. Bu bölgede malzemenin merkezi O olan merkezli daireler boyunca hareket ettiği varsayılmaktadır. Bölge III malzemenin sabit olduğu "ölü metal bölgesi" olarak adlandırılmaktadır. Bölgede IV'te malzeme daha fazla deformasyon olmaksızın sağa kaymaktadır. Bölge II, Bölge I'den giriş yüzeyi  $\Gamma_i$  ile ve Bölge IV'den çıkış yüzeyi  $\Gamma_o$  ile ayrılmıştır. Malzeme sabit deformasyon hızı  $V_0$  ile GH deformasyon düzlemine erişene kadar aşağı doğru hareket eder ve sağa doğru aynı hızla deformasyon düzleminde çıkar. Tüm deformasyon iki kanalın kesişme düzlemi olarak adlandırılan Şekil 3.3'deki GH hattı boyunca oluşur [20].



Şekil 3.3 : EKAP'ta kullanılan deformasyon modeli [20]

### 3.1 EKAP İşlem Parametreleri

EKAP prosesi kalıp açıları, presleme hızı, presleme sıcaklığı, işlem rotaları, geçiş sayısı, geri presleme ve preslenecek malzeme kesiti olmak üzere çeşitli işlem parametrelerini içermektedir.

#### 3.1.1 Kalıp açıları

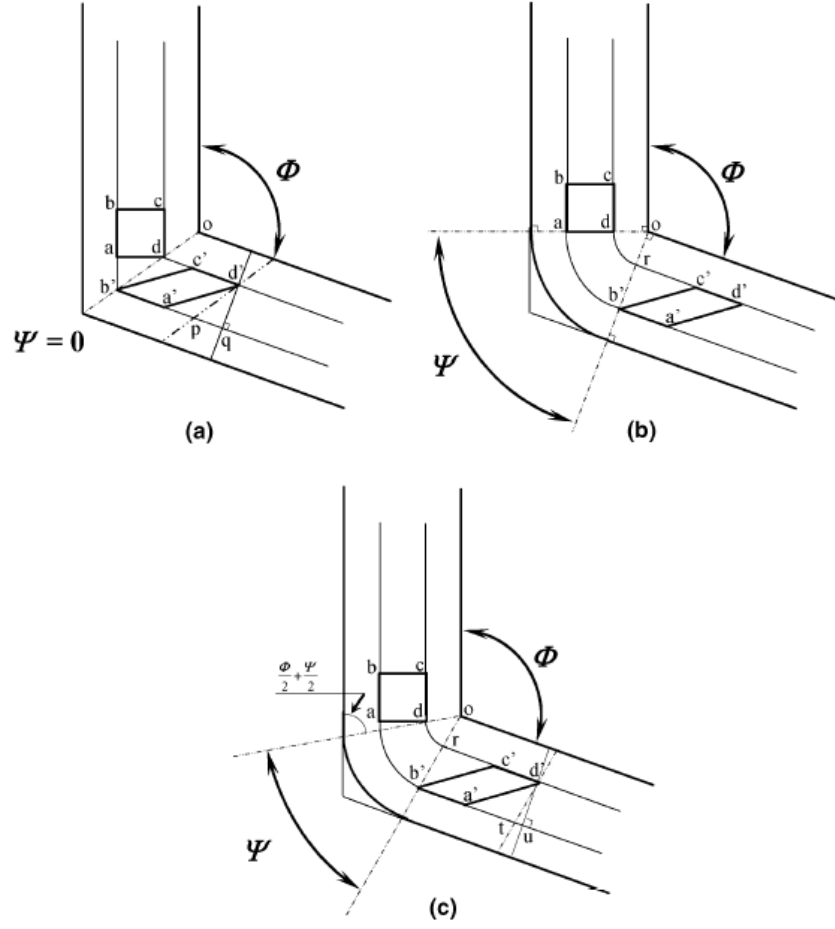
EKAP'ta geçiş esnasında bir numuneye uygulanan gerilme öncelikli olarak kanal açısına ( $\Phi$ ) bağlıdır. Dış kavis açısında ( $\Psi$ ) gerilme üzerinde az da olsa etkisi vardır. Literatürde EKAP işleminin uygulaması ile geliştirilen mikroyapıları tanımlayan çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların çoğunda  $90^\circ$  kanal açısına sahip bir EKAP kalıbı kullanılmaktadır.  $90^\circ$ 'den daha büyük bir kanal açısına ( $\Phi$ ) sahip kalıp kullanıldığında presleme giderek daha kolaylaşmaktadır. Böylece deforme olması zor ve düşük sünekliğe sahip metal malzemeler daha kolay preslenmektedir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuç  $\Phi = 90^\circ$  değerinin tüm araştırmalarda kullanılması gereken optimum kanal açısı olduğudur. Ancak malzeme yeterince sert veya kırılgan olduğunda başarılı preslemeyi sağlamak için  $90^\circ$ 'den büyük kanal açısı gerekir [21].

Eşit kanallı açısal preslemede kalıp boyunca tek bir geçişte meydana gelen deformasyon Şekil 3.4'de gösterildiği gibi kanal açısı ( $\Phi$ ) ve dış kavis açısı ( $\psi$ ) kullanılarak hesaplanabilir. İdeal koşullar altında ve  $\Psi = 0^\circ$  dış kavis açısı kullanıldığında oluşan kayma deformasyonu ( $\gamma$ ) Eşitlik (3.1)'de verilmiştir [22].

$$\gamma = 2 \cot\left(\frac{\Phi}{2}\right) \quad (3.1)$$

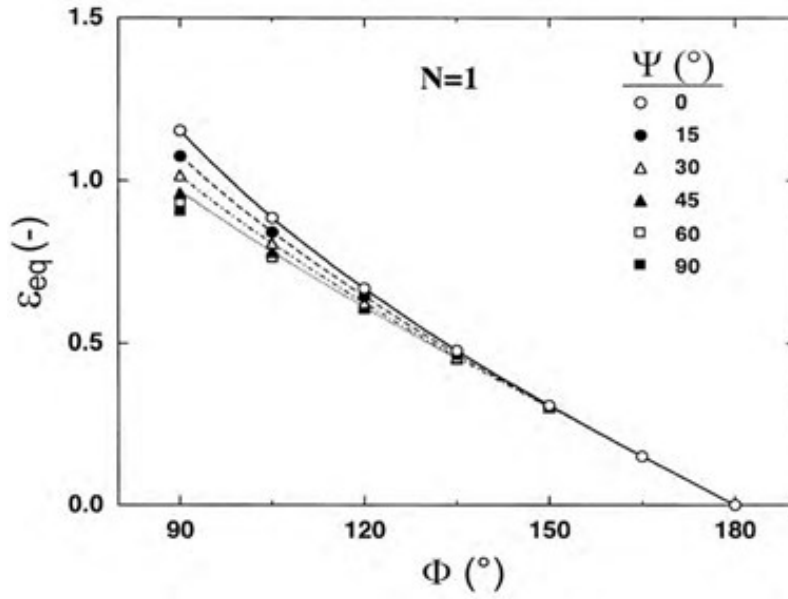
Gerçek koşullar altında, dış kavis açısının ( $\Psi$ ) kayma deformasyonu üzerindeki etkisini içerecek şekilde tek bir geçişten sonra parçada oluşan kayma deformasyonunda Eşitlik (3.2)'de verilen bağıntı kullanılır [22].

$$\gamma = 2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \quad (3.2)$$



**Şekil 3.4 :** EKAP ilkeleri: (a)  $\Psi = 0^\circ$ , (b)  $\Psi = \pi - \phi$ , (c)  $\Psi$  açısı;  $\Psi = 0^\circ$  ile  $\Psi = \pi - \phi$  arasında [6]

Von Mises efektif deformasyonu ( $\epsilon_{ef}$ ) veya diğer adıyla eşdeğer deformasyon, kayma deformasyonunun ( $\gamma$ ) için kareköküne bölünmesiyle kolayca hesaplanabilir. Çok geçişli presleme durumunda, efektif deformasyon geçiş sayısı ile ( $n$ ) çarpılarak hesaplanır. Tek bir geçişteki eşdeğer deformasyon, artan kanal açısı ( $\Phi$ ) ve dış kavis açısı ( $\Psi$ ) ile birlikte azalır. Şekil 3.5’de eşdeğer deformasyonun, farklı kanal açısı ve dış kavis açılarında nasıl geliştiği gösterilmektedir. EKAP sırasında eşdeğer deformasyon maksimum  $\epsilon_{ef} = 1.15$  ( $\Phi = 180^\circ$ ,  $\Psi = 0^\circ$ ) ile minimum  $\epsilon_{ef} = 0$  ( $\Phi = 90^\circ$  ve  $\Psi = 0^\circ$ ) arasında değişmektedir. Farklı kanal açısı ve dış kavis açısının her geçişte eşdeğer gerilme ve dolayısıyla tane inceltme üzerindeki etkisi bulunmaktadır. Eğri bir köşe eşdeğer gerilmeyi düşürmekte ve homojen olmayan plastik akışa neden olmaktadır. Buna ek olarak kanal açısının EKAP sırasında üretilen gerilme üzerinde ve dış kavis açısı göre daha fazla etkisi olduğu açıktır [22].



**Şekil 3.5 :** Farklı iç kavis açısı ( $\Phi$ ) ve dış kavis açılarında ( $\Psi$ ) eşdeğer deformasyon [22]

Segal ve arkadaşları tarafından malzemenin kalıp boyunca ilerlerken üniform şekilde deformasyona maruz kalmadığı kanıtlanmıştır. Parçada üst yüzeyden alt yüzeye, bir uçtan diğer bir uca kadar eşit olmayan deformasyon dağılımı vardır. Segal tarafından önerilen dış kavis açısı  $\Psi = 0^\circ$  olarak varsayılarak N geçiş sonrası malzemede oluşan deformasyon miktarı Eşitlik (3.3)'de verilmiştir [23].

$$\varepsilon_N = \frac{2N}{\sqrt{3}} 2 \cot\left(\frac{\Phi}{2}\right) \quad (3.3)$$

Daha sonra eşitliğe dış kavis açısını ( $\Psi$ ) da eklenerek Eşitlik (3.4) ortaya konulmuştur [23].

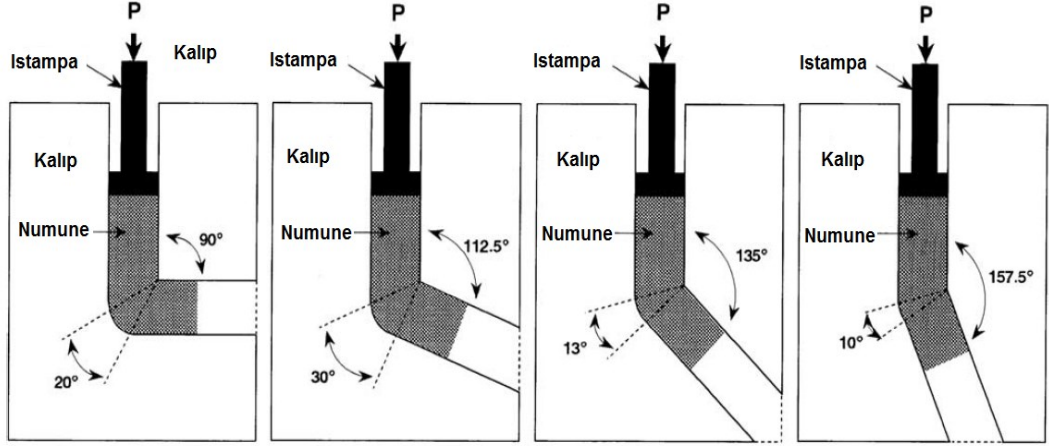
$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[ 2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \right] \quad (3.4)$$

Yakın zamanda da N geçiş sonrası deformasyon miktarını hesaplamak için Eşitlik (3.5)'te verilen bağıntı ortaya konulmuştur [23].

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[ 2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \right] \quad (3.5)$$

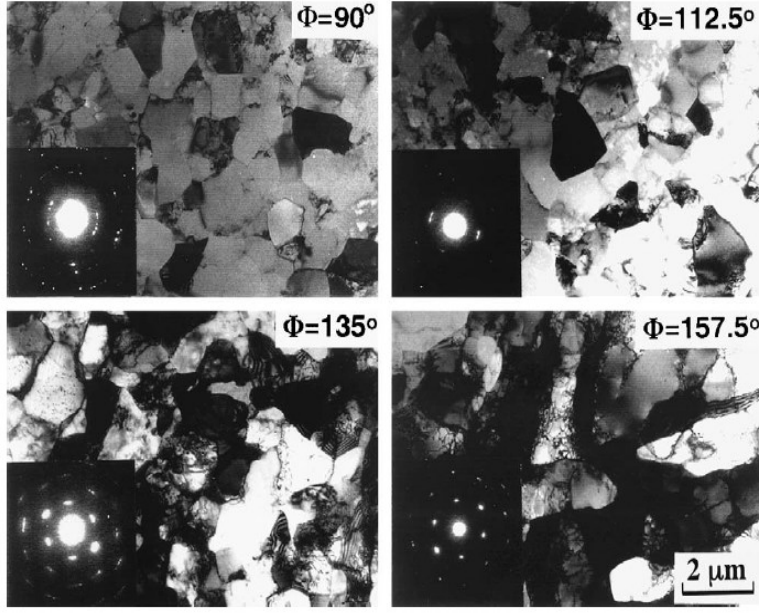
### 3.1.1.1 Kanal açısı

Kanal açısı ( $\Phi$ ) her geçişte malzemeye uygulanan toplam gerilimi belirlediğinden en önemli deneysel faktördür ve dolayısıyla presleme sonucu mikro yapı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir [14].



Şekil 3.6 : Kanal açısının etkisini değerlendirmek için kullanılan kalıpların gösterimi [14]

Kanal açısının öneminin deneysel değerlendirmelerini açıklayan çalışmada saf alüminyum üzerinde  $90^\circ$ ,  $112.5^\circ$ ,  $135^\circ$  ve  $157.5^\circ$  kanal açılına sahip dört ayrı kalıp kullanılarak deneyler gerçekleştirildi. Bu dört kalıp Şekil 3.6'da şematik olarak gösterilmiştir ve dış kavis açısı ( $\Psi$ ) değerlerini de içermektedir. Ortaya çıkan mikro yapıların  $12.3 \mu\text{m}$  çapa sahip bölgelerden alınan seçilmiş alan elektron difraksiyon (SAED) modelleri Şekil 3.7'de gösterilmektedir. Bu fotomikrografların incelenmesinden sonra numune  $90^\circ$  kanal açılı bir kalıp kullanılarak çok yoğun bir plastik gerilmeye tabi tutulduğunda çok ince eşit eksenli taneler dizisinin daha kolay elde edildiği sonucuna ulaşılmaktadır. Bu çalışma pratikte ideal EKAP kalıbının  $90^\circ$  yakın bir kanal açısına sahip olacağı anlamına gelir [14].

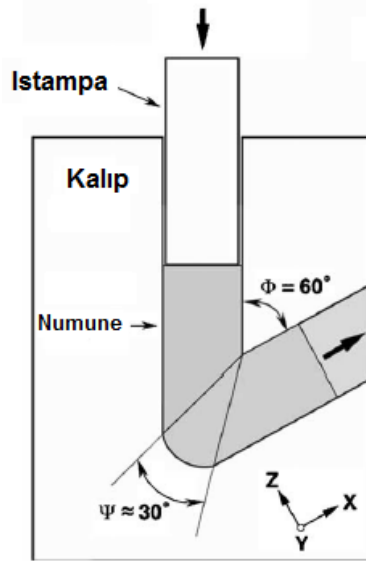


**Şekil 3.7 :** Şekil 3.6'da gösterilen kalıplar kullanılarak elde edilen SAED desenleri ve mikroyapılar [14]

$\Phi = 90^\circ$  kanal açılı EKAP kalıplarının verimliliğine rağmen  $90^\circ$ 'den büyük açılı kalıpları kullanırken numuneleri preslemek daha kolay bir yöntemdir. Bazı çok sert malzemeler veya düşük sünekliğe sahip malzemeler için bu önemli bir husustur. Örneğin deneyler numunedeki çatlama nedeniyle  $\sim 1273$  K sıcaklıkta  $90^\circ$  kanal açılı bir kalıpta ticari saflıkta tungsten basmanın uygun olmadığını gösterdi. Kanal açısı  $110^\circ$ 'ye yükseldiğinde aynı pres sıcaklığında mükemmel sonuçlar elde edildi. Şekil 3.8'de  $\Phi = 110^\circ$  kanal açısı ile C rotasını kullanarak 8 geçiş yapılan presleme işleminin öncesi ve sonrasında tungsten numunesini göstermektedir [14].



**Şekil 3.8 :** EKAP tarafından işlenmeden önce ve işlendikten sonra saf tungsten numunelerinin görünüşü [14]



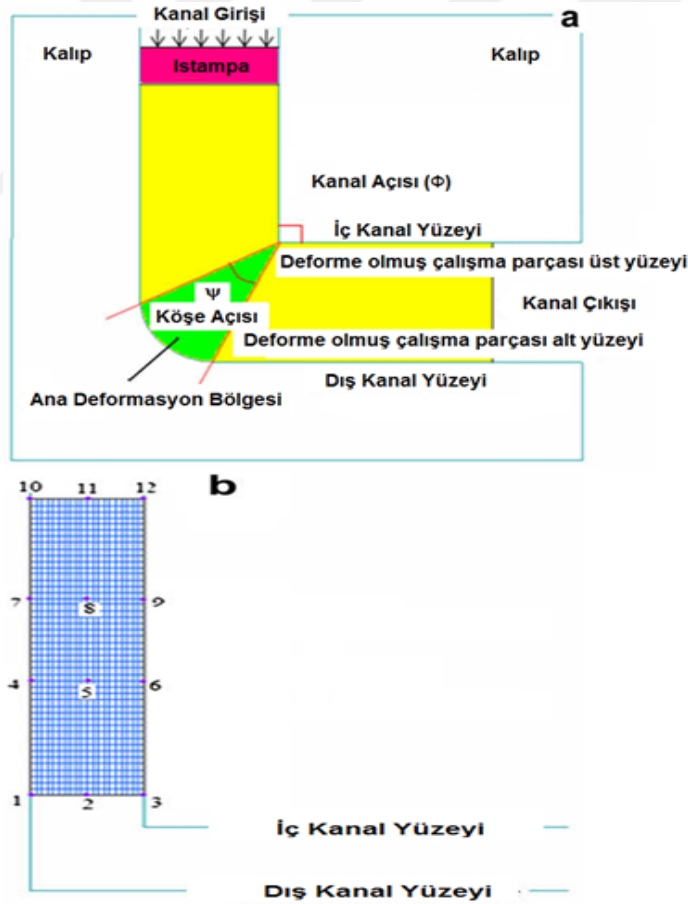
**Şekil 3.9 :**  $\Phi=60^\circ$  kanal açısına sahip olan bir EKAP kalıbının şematik bir gösterimi [14]

EKAP'da uygulanan zorlanma kanal açısının azalması ile arttığı için  $90^\circ$ 'den küçük olan kanal açılarından presleme yapmak avantajlı olabilir. Bir çalışmada Şekil 3.9'da gösterildiği gibi  $60^\circ$  kanal açısına sahip bir kalıp kullanılarak saf alüminyum ve Al-Mg-Sc alaşımının preslenmesi tanımlanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar  $\Phi=60^\circ$  olan bir kalıp kullanarak mükemmel mikro yapıların üretilmesinin mümkün olduğunu ve ortalama tane boyutlarının  $\Phi=90^\circ$  sahip olan kalıplara kıyasla biraz daha az olduğunu göstermiştir. Böylece  $60^\circ$  ve  $90^\circ$  kalıplar için tane boyutları saf Al için  $1.1 \mu\text{m}$  ve  $1.2 \mu\text{m}$  ve Al-Mg-Sc alaşımı için sırasıyla  $0.30 \mu\text{m}$  ve  $0.36 \mu\text{m}$  m'dir.  $90^\circ$ 'den küçük olan bir kalıp kullanmanın belirgin avantajına rağmen herhangi bir çatlamaya neden olmadan üretim yapmak için yüksek basınçlara ihtiyaç duyulmaktadır. Buna göre  $90^\circ$  'lik bir kanal açısının EKAP kalıbı için optimum durumu temsil ettiği sonucuna varılabilir [14].

### 3.1.1.2 Dış kavis açısının etkisi ve Sonlu elemanlar analizi

Dış kavis açısı eşdeğer gerilme tahminleri ile gösterildiği gibi numuneye uygulanan gerilmenin belirlenmesinde küçük bir rol oynar. Bununla birlikte bu açının ultra ince taneli malzemelerin üretimindeki etkisini araştırmak önemlidir. Sonlu elemanlar modellemesi kullanılarak EKAP'ta oluşan deformasyonun analizi yapılmış ve dış kavis açısı ( $\Psi$ ) önemi değerlendirilmiştir [14].

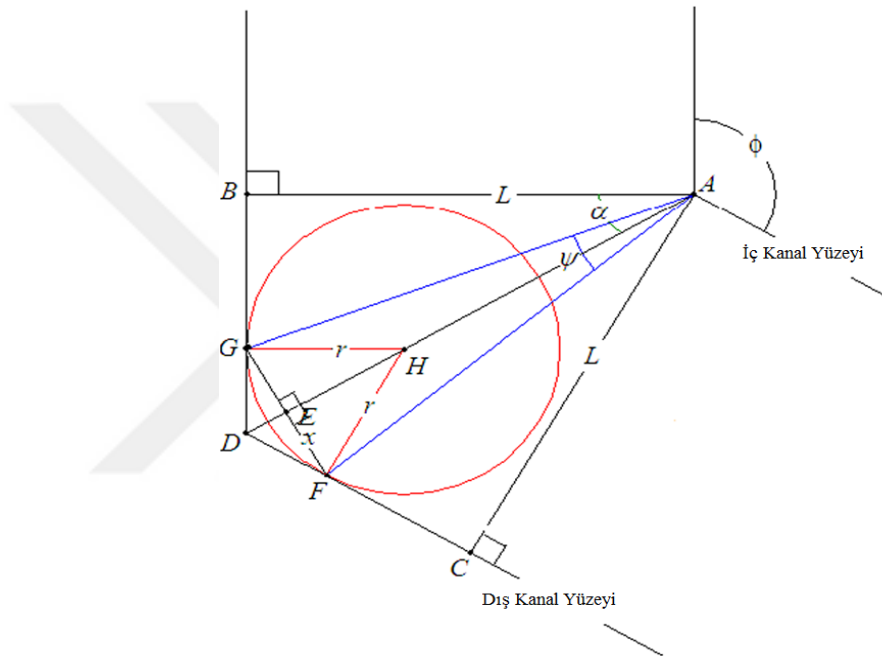
Yapılan bir sonlu elemanlar analizi çalışmasında 90° kanal açılı bir EKAP kalıbında 20 mm x 20 mm x 160 mm boyutlu kare kesitli bir numunenin deformasyon davranışı izotermal düzlem gerilme koşulları altında Msc.Marc2005r3'ün bir değerlendirme versiyonu kullanılarak simüle edilmiştir. EKAP'ta kullanılan çalışma parçası, kalıp profili ve terimler Şekil 3.10a'da gösterilmektedir. Deforme edilebilir çalışma parçası, 4-düğümlü lineer düzlem gerilme elemanları ile örüldü ve katı plastik kabul edildi. İlk örgü kaba olmasına rağmen deformasyon sırasında örgü büyük gerilmeleri barındıracak şekilde otomatik yeniden tespit ile inceltildi. Öğelerin sayısı ilk düzeltme işlemi sırasında arttırılmış ve simülasyon boyunca sabit kalmıştır. Ağ duyarlılık analizinden 3600 elemanın deformasyon davranışını güvenilir bir şekilde modellemek için yeterli olduğu bulunmuştur. Hem iç hem de dış kanal yüzeyleri X ve Y yönleri boyunca sıfır yer değiştirme sınır şartı uygulanarak yani  $U_x = U_y = 0$  sabit ve durağan olarak kabul edilmiştir [23].



**Şekil 3.10 :** (a) EKAP'de kullanılan terimler, (b) deformasyonu izlemek için seçilen düğümler [23]



Istampanın katı olduğu varsayılmış ve aşağı doğru bir yer değiştirme ile atanmıştır. 1 mm/s'lik sabit ıstampa hızı mevcut tüm deney çalışmaları için kullanılmaktadır. Belirlenen deformasyonun elde edilmesi için gereken hız, gerekli süre, alt adımların sayısı içeren bir kontrol dosyası tarafından kontrol edilmiştir. Simülasyon sırasında, Şekil 3.10b'de gösterildiği gibi çeşitli bölgelerde bulunan 12 düğüm seçilmiştir. Deformasyon boyunca düğümlerin hareketleri izlenmiştir. Parametrelerin, deformasyon davranışı, gerilme dağılımı ve EKAP sırasında yük gereksinimi üzerindeki bireysel ve sinerjik etkilerini değerlendirmek için sonlu elemanlar analizi yapılmıştır [23].



Şekil 3.11 : Köşe açısı ( $\Psi$ ) ile kavis yarıçapı ( $r$ ) arasındaki ilişki [23]

Herhangi bir kanal açısı ( $\Phi$ ) için bir dış kavis açısının ( $\Psi$ ) alabileceği minimum ve maksimum değerler sırasıyla 0 ve  $\pi - \Phi$ 'dir. FEA için dış kavis açısı ( $\Psi$ ) Şekil 3.11'de gösterildiği gibi dış kanal yüzeyindeki ana deformasyon bölgesinde eşdeğer bir kavis yarıçapı ( $r$ ) belirlenerek modellenenabilir. Kanal açısı ( $\Phi$ ) ve genişlik ( $L$ ) olan herhangi bir EKAP kanalı için dış kavis açısı ( $\Psi$ ) ile kavis yarıçapı ( $r$ ) arasındaki ilişki Şekil 3.11'den kolayca oluşturulabilir [23].

$$\tan\left(\frac{\Psi}{2}\right) = \frac{EF}{AE} = \frac{EF}{AD-DE} = \frac{\frac{r \cdot \sin(\pi/2)}{\tan(\pi/2)}}{\left(\frac{L}{\sin(\pi/2)}\right) - \left(\frac{r \cdot \sin(\pi/2)}{(\tan(\pi/2))^2}\right)} \quad (3.6)$$

Eşitlik (3.6) düzenlendiğinde eşitlik (3.7) elde edilmektedir.

$$\Psi = 2 \tan^{-1} \left[ \frac{r \cdot \cos(\pi/2) \sin(\pi/2)}{L - r \cdot (\cos(\pi/2))^2} \right] \quad (3.7)$$

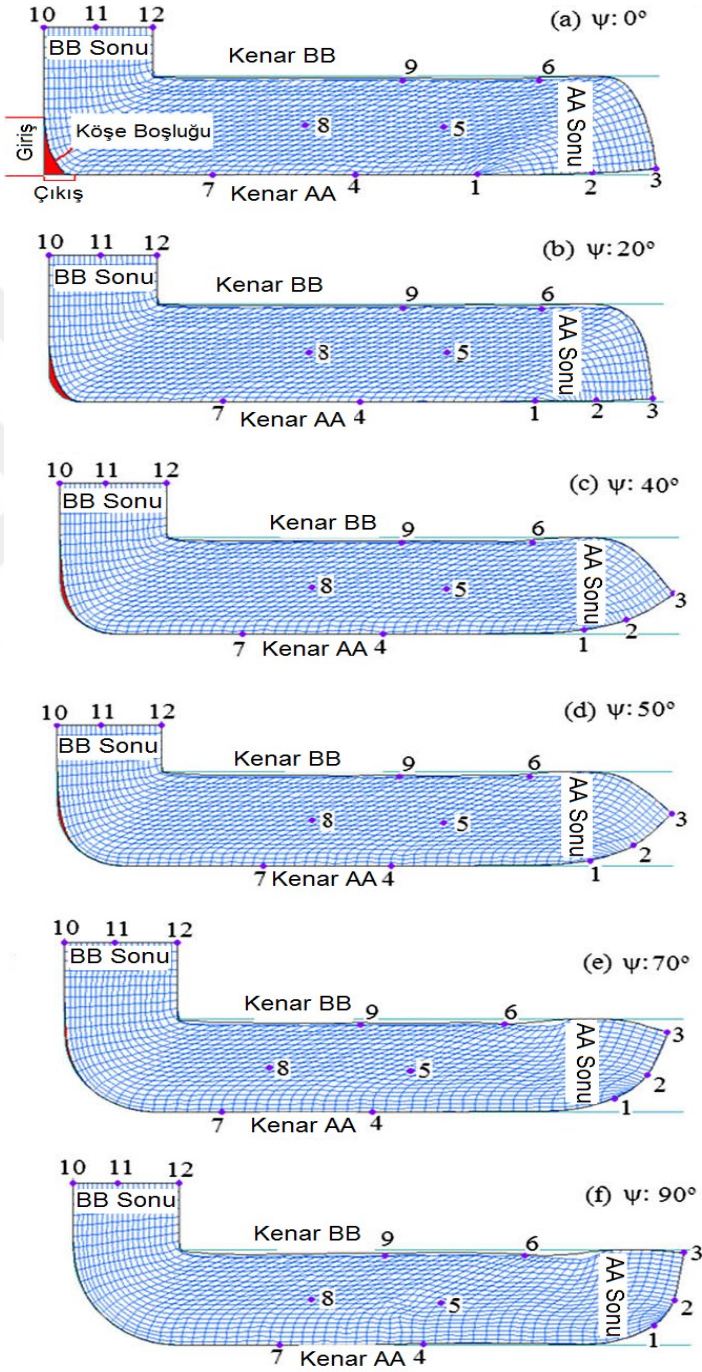
Kanal açısı ( $\Phi$ ) = 90° için eşitlik (3.7) indirgenildiğinde dış kavis açısının değeri eşitlik (3.8)'de verilmiştir.

$$\Psi = 2 \cdot \tan^{-1} \left[ \frac{r}{2L - r} \right] \quad (3.8)$$

Ticari saf alüminyumun deformasyon davranışı gerinim sertleşmesi yapısal malzeme davranışı ile çeşitli dış kavis açıları ( $\Psi$ ) için 0 ile 90 ° aralığında simüle edildi. Sürtünme etkileri dahil edilmedi. Simülasyon sonuçları Şekil 3.12a-f'de gösterilmektedir. Dış kavis açılarının düşük olması durumunda, deforme olmamış çalışma parçasının 'A' sonuna karşılık gelen düğümler # 1, 2 ve 3 deforme olmuş iş parçasında 'AA kenarı' olur ve Şekil 3.12a ve Şekil 3.12b'de gösterildiği gibi dış kanal yüzeyinde uzanır. Orta seviyede dış kavis açılarında Şekil 3.12c ve Şekil 3.12d gösterildiği gibi düğümler # 1, 2 ve 3 artık dış kanal yüzeyinde bulunmamaktadır. Yüksek dış kavis açıları için, Şekil 3.12e ve Şekil 3.12f'de gösterildiği gibi 'A' sonuna karşılık gelen düğümler # 1, 2 ve 3 deforme olmuş iş parçasının (AA sonu) olarak kalır. Dış kavis açısı ( $\Psi$ ) 40°'den küçük veya eşitse deforme olmayan iş parçasında mevcut olan dikdörtgen elemanlar deforme olmuş iş parçasının hem üst hem de alt yüzeyinde (Şekil 3.12a-c) paralel bir şekil alırlar. Deformasyon modu esas olarak basit kayma özelliğindedir. 40°'den büyük dış kavis açılarında ( $\Psi$ ) ilk baştaki dikdörtgen elemanlar üst yüzeyde paralelkenar olurken dikdörtgen olarak kalırlar, ancak deforme olmuş iş parçasının alt yüzeyinde boyları uzatılmış ve yükseklikte sıkıştırılmışlardır (Şekil 3.12d-f). Bu durum kayma ve bükülme deformasyon modlarının varlığını işaret eder [23].

Deforme olan çalışma parçasının üst yüzeyi ile iç kanal yüzeyi arasındaki boşluk gözlenmiştir. Bu boşluk oluşumu iki düz kanalın buluştuğu iç kanal birleşimindeki keskin köşeye dayandırılabilir. Boşluğun köşe açısından bağımsız olduğu tespit edilmiştir. Şekli 3.12a'da gösterilen ana deformasyon bölgesinde deforme olan iş parçasının alt yüzeyi ile dış kanal yüzeyi arasındaki boşluk izlenir. Bu köşe boşluğu asimetriktir, boşluğun uzunluğu kanalın giriş tarafında çıkış tarafında olduğundan daha fazladır. Dış kavis açısı 40°'nin

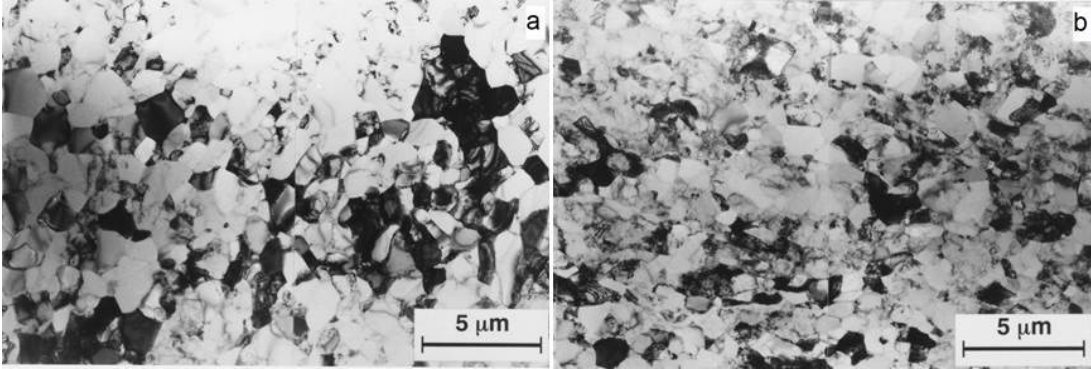
üzerine çıktığında boşluk çıkış tarafında gözlenmez (Şekil 3.12d-f) ve giriş tarafında azalmaya başlar. Dış kavis açısı ( $\Psi$ )  $90^\circ$  olduğunda Şekil 3.12f'de görüldüğü gibi giriş tarafındaki boşluk da kaybolur. Bu durumda ana deformasyon bölgesinde dış kanaldaki dış kavis açısını tanımlayan kavis yarıçapı kanal genişliği ile tam olarak eşleşir (kanal genişliği = iş parçası genişliği = 20 mm) ve dolayısıyla boşluk gözlenmez [23].



Şekil 3.12 : Çeşitli dış kavis açılına sahip bir gerinim sertleştirme malzemesinin deformasyon modeli (a-f) [23].

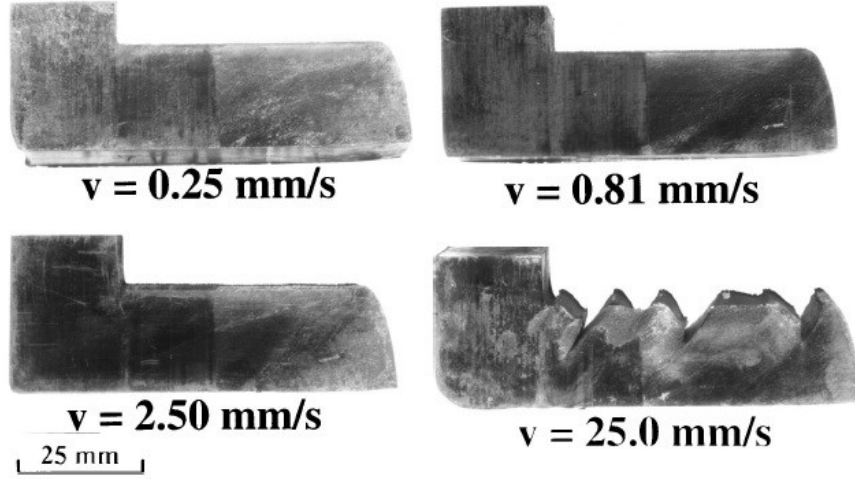
### 3.1.2 Presleme hızı

Daha önceki araştırmalara göre pres hızının sonuçta elde edilen tane boyutu üzerinde önemli bir etkisi olmadığı düşünülmektedir. Yapılan Bir çalışmada saf alüminyum üzerinde oda sıcaklığında dört farklı pres hızında EKAP işlemleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada  $8.5 \times 10^{-3}$  mm/s,  $8.5 \times 10^{-2}$  mm/s,  $8.5 \times 10^{-2}$  mm/s ve 7.6 mm/s pres hızları kullanılmıştır. En yavaş ve en hızlı presleme hızını kullanarak numunelerin TEM mikrografları Şekil 3.13'de gösterilmektedir. Her iki koşul için ortalama tane boyutlarının yaklaşık  $1.2 \mu\text{m}$  olduğu görülmektedir. Yüksek hızlı preslemeden sonra tanelerde birlikte birçok dış dislokasyon bulunduğu gözlemlenirken, yavaş preslenmiş numunedeki dislokasyon yoğunluğu nispeten düşüktür. Bu iyileşmenin yavaş EKAP prosedürü sırasında gerçekleştiği anlamına gelmektedir. Sonuç olarak ölçülen mikro sertlik ve akma gerilmesinin daha hızlı preslemelerde biraz daha yüksek olduğu görüldü [24].



**Şekil 3.13 :** (a)  $8.5 \times 10^{-3}$  mm/s ve (b) 7.6 mm/s basma hızlarında dört EKAP geçişinden sonra saf Al'ın TEM mikrografları [24]

Pres hızının düşürülmesi malzeme akışının Şekil 3.14'de gösterildiği gibi uniform olmasını kolaylaştırır. Yapılan bir çalışmada CP Ti 0.25, 0.81, 2.50 ve 25.0 mm/s'lik çeşitli hızlarla preslendi. EKAP sırasında düzgün akış 0.25 mm/s ile 2.50 mm/s arasındaki pres hızlarında sağlanırken bölünmüş akış 25.0 mm/s'lik en yüksek hızda elde edildi [24].



**Şekil 3.14** : 0.25, 0.81, 2.50 ve 25.0 mm/s pres hızlarında ve 325 ° C'de EKAP sonrası CP Ti görüntüleri [24].

EKAP işlemlerinde genellikle yüksek hızlarda çalışan hidrolik presler kullanılır. Genellikle pres hızları 1-20 mm/s aralığındadır. EKAP işleminde pres hızının oluşturulan çok ince tanelerin denge boyutu üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Ancak daha yavaş hızlarda presleme yaparken toparlanma daha kolay gerçekleştiğinden düşük hızlarda daha dengelenmiş taneler üretilir. [25].

Eşit kanallı açısız presleme (EKAP) yönteminde presleme hızının etkisi ile ilgili yapılan çalışmada saf Al ve Al-%1Mg alaşımı numuneler ile  $\sim 10^{-2}$  ile  $\sim 10$  mm  $s^{-1}$  arasındaki presleme hız aralığı kullanılarak araştırma yapılmıştır. Sonuçlar presleme hızının denge taneciği boyutunda en azından bu deneylerde kullanılan aralığın üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermektedir. Presleme hızında bir azalma toparlanma için daha uzun bir süre sağlamaktadır. Böylece ekstrinsik yer değiştirmelerin daha yüksek bir kısmı tane sınırlarında emilir ve bu daha dengeli bir altyapının oluşmasını sağlar [26].

### 3.1.3 Presleme sıcaklığı

EKAP'ta özellikle tane büyümesinin sınırlı olduğu daha düşük sıcaklıklarda presleme yapılmasının tane boyunun küçülmesinde etkili olduğu açıktır [27]. Artan deformasyon sıcaklığı alt tane boyutunun artmasına neden olur [28].

EKAP işleminde sıcaklık en çok incelenen EKAP değişkenlerinden biridir. Yüksek sıcaklıklarda ekstrüzyon sınırlı sünekliğe sahip malzemeler için faydalıdır. Çünkü üretilen kuvvetli kayma gerilmesi numunelerde çatlama

neden olabilir. Alüminyum alaşımları üzerine yapılan araştırmalar işlem sıcaklığındaki artışın üretilen tane boyutu üzerinde bir artışa neden olduğunu göstermiştir. Ayrıca tanelerin daha eş eksenli hale geldiği ve düşük açılı tane sınırlarının sayısı arttığı gösterilmiştir [29].

Şu ana kadar EKAP ile çelik presleme çalışmaları sadece düşük sıcaklıklarda sınırlandırıldı. Daha yüksek presleme sıcaklığının kullanılması presleme basıncını önemli ölçüde düşürebilir ve tavlama işlemini hariç tutarak işlemleri kolaylaştırabilir [30].

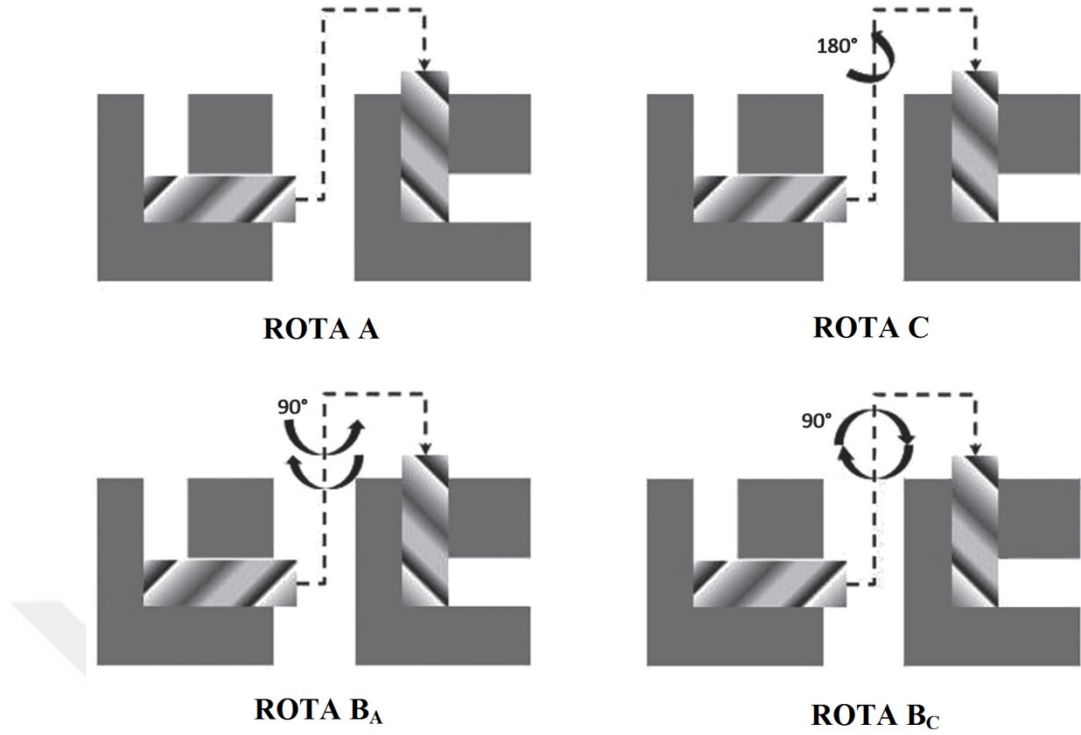
EKAP işleminde tanecik boyutunu etkileyen faktörlerden biri deformasyon ve yeniden kristalleşmenin gerçekleştiği numune sıcaklığıdır. Pratik olarak numune sıcaklığı numunenin ön ısıtma sıcaklığı aracılığıyla kontrol edilir. Bununla birlikte bir EKAP işlemi sırasında numune sıcaklığı mekanik işlemden dolayı üretilen ısı nedeniyle ön ısıtma sıcaklığının önemli ölçüde üzerindedir. Bu nedenle yeniden kristalleşmenin ve tane boyutunun hassas kontrolü için EKAP sırasında gerçek numune sıcaklığının ölçülmesi gereklidir. EKAP sırasında sıcaklık artışı hem numune malzemesine hem de deformasyon hızına bağlı olarak değerlendirilmektedir. EKAP işlemi esnasında uygulanan mekanik iş ısı oluşumuna neden olur, malzemenin iç enerjisini değiştirir ve sürtünme kaybı olarak da dağıtılır. Sıcaklık artışı ısı oluşumunun doğrudan bir sonucudur [31].

#### **3.1.4 İşlem rotaları**

EKAP preslemede farklı işlemlerde Rotaları vardır. Numune her bir işlem arasında Şekil 3.15’de gösterildiği gibi farklı yönlere döndürülmektedir. En yaygın olarak kullanılan Rotalar;

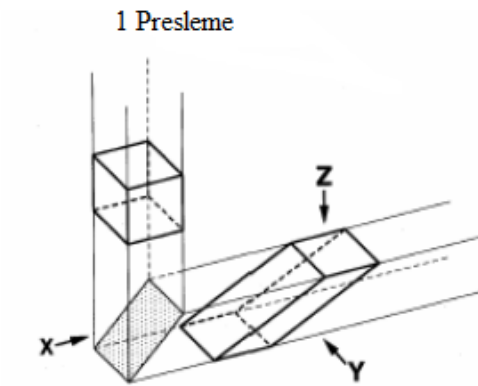
- Numune döndürülmeden yapılan işlem (Rota A)
- Numune  $\pm 90^\circ$  döndürülerek yapılan işlem (Rota BA)
- Numune  $+90^\circ$  döndürülerek yapılan işlem (Rota Bc)
- Numune  $+180^\circ$  döndürülerek yapılan işlem (Rota C)

Bu analizde standart yöntem ele alınmaktadır. ( $\Phi=90^\circ$  ve  $\Psi=0^\circ$ ) [32]



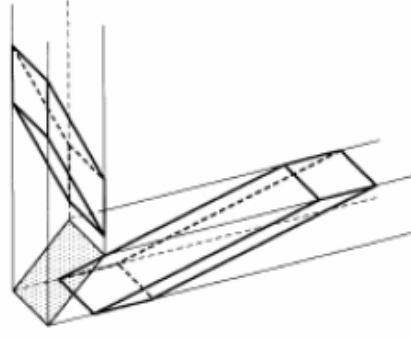
Şekil 3.15 : EKAP işlem rotaları [33]

Şekil 3.16’da görüldüğü 1. presleme sonucu kalıptan geçen kübik parça dikdörtgen biçimli bir forma dönüşmüştür. Daha sonraki preslemelerde oluşacak deformasyon, numunenin herhangi bir rotasına bağlı olarak ortaya çıkacaktır [32].



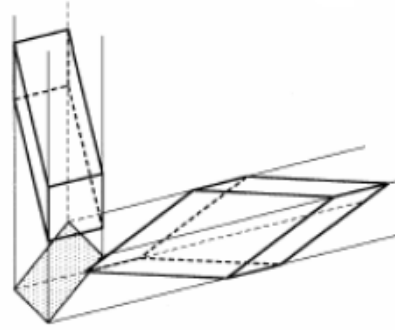
Şekil 3.16 : 1. presleme sonucu değişimin x,y,z, ortogonal yüzeylerdeki gösterimi [32]

Rota A 2 Presleme



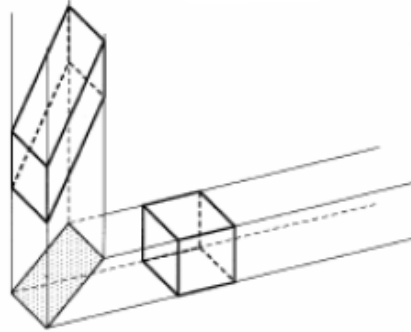
Şekil 3.17 : 2. presleme sonrası gösterim (rota A) [32]

Rota B 2 Presleme



Şekil 3.18 : 2. presleme sonrası gösterim (rota B) [32]

Rota C 2 Presleme



Şekil 3.19 : 2. presleme sonrası gösterim (rota C) [32]

EKAP kalıbından ikinci geçişin etkisi şekil 3.17, şekil 3.18 ve şekil 3.19’da gösterilmiştir. 2. preslemede rota A yönünde malzemedeki çarpılma artışlarını, rota B yönünde x ve z yüzeylerindeki çarpımalardaki artışı, rota C yönünde yeniden kübik yapı oluşumu meydana gelmektedir [32].



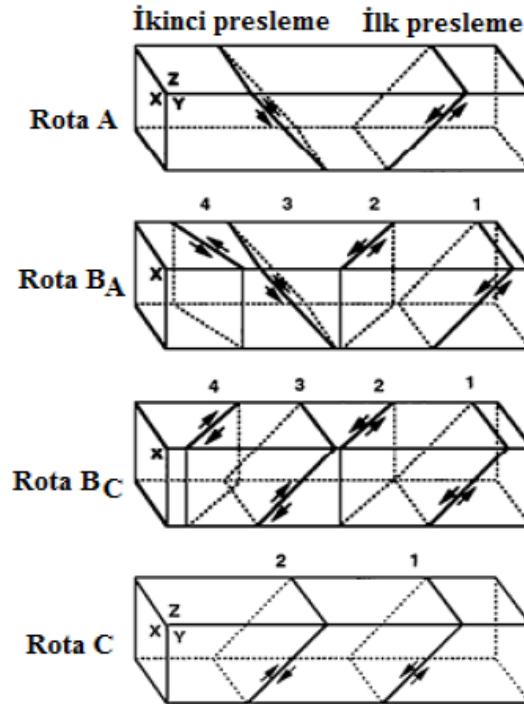
**Çizelge 3.1** : Farklı Pres Sayılarında dönme yönleri [32]

Rota	Presleme Sayısı						
	2	3	4	5	6	7	8
A	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
B <sub>A</sub>	90° ↙	90° ↘	90° ↙	90° ↘	90° ↙	90° ↘	90° ↙
B <sub>C</sub>	90° ↙	90° ↙	90° ↙	90° ↙	90° ↙	90° ↙	90° ↙
C	180°	180°	180°	180°	180°	180°	180°
B <sub>A</sub> -A	90° ↙	0°	90° ↘	0°	90° ↙	0°	90° ↘
B <sub>C</sub> -A	90° ↙	0°	90° ↙	0°	90° ↙	0°	90° ↙

Çizelge 3.1’de gösterildiği gibi 6 farklı üretim rotası bulunmaktadır. BA ve Bc kombinasyon BA-A ve Bc-A birlikte verilmiştir. Çizelge 3.2’de numunenin x,y,z ortogonal yüzeylerdeki izdüşümünü göstermektedir. Farklı rotalardaki işlemlerin sonucuna buradan ulaşılabilmektedir. Rota BA’nın (0°-90°-0°-90°) karakteristik özellikleri Rota A’ya, Rota Bc’nin (0°-90°-180°-270°) karakteristik özellikleri Rota C’ye benzemektedir. Rota A yönünde değişim x ve y düzleminde oluşurken z düzleminde deformasyon oluşmamaktadır. Rota BA yönünde deformasyon tüm yüzeylerde oluşmaktadır. Rota Bc yönünde 4 işlem sonunda kübik parça eski halini almaktadır. Rota C yönünde de 2 işlem sonucunda kübik parça eski haline dönmektedir. Rota C’de z düzleminde deformasyon oluşmamaktadır. Rota BA ve Rota A’ya göre Rota Bc ve Rota C daha iyidir. Çünkü işlemin son halinde kübik yapı tekrar oluşmaktadır. Rota C’ye göre de Rota Bc tercih edilmektedir. Çünkü Rota C’de z düzleminde deformasyon meydana gelmemektedir. Rota BA-A prosesi 3 ortogonal yüzeyde distorsiyonları arttırdığı için cazip değildir. Rota Bc ve Rota A kombinasyonu olan Bc-A en iyi pres sonuçlarını vermektedir. Bu kombine yöntemde yüksek kayma gerilmeleri bütün düzlemlerde oluşmakta ve 8 işlem sonucunda numune tekrar kübik yapıya geri dönmektedir [32].

**Çizelge 3.2 :** Farklı rotalardaki işleme yönleri [32]

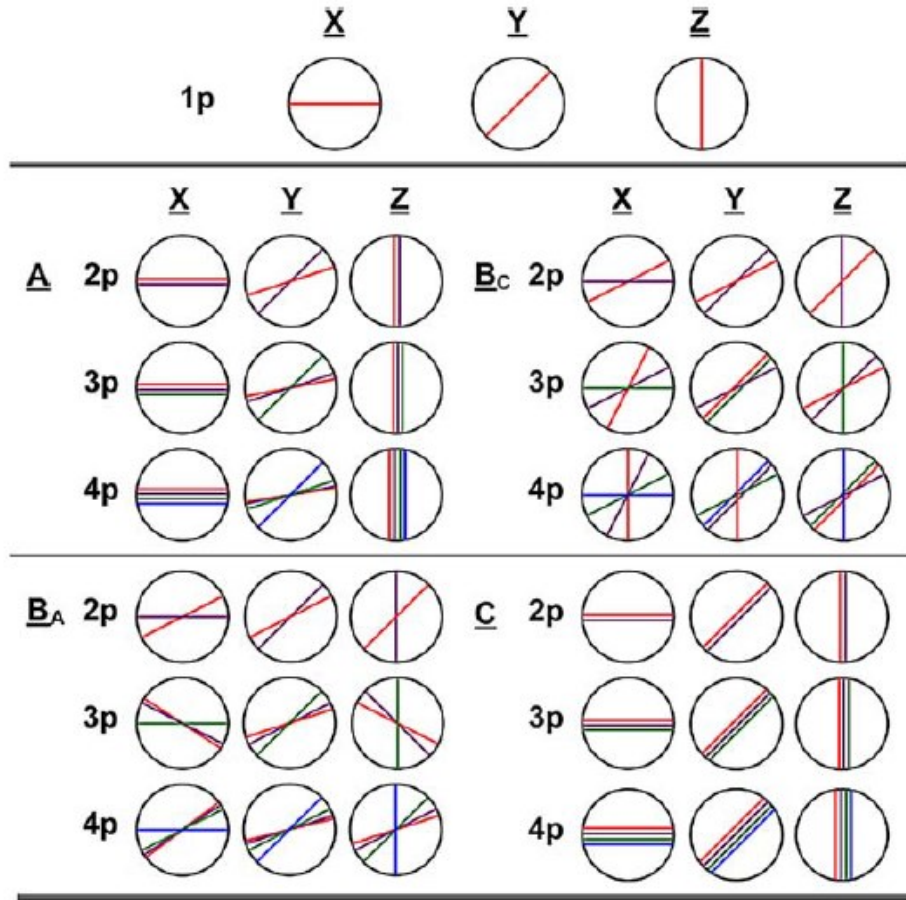
Rota	Düzlem	Presleme Sayısı								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
A	X	□	□	□	□	□	□	□	□	□
	Y	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Z	□	□	□	□	□	□	□	□	□
B <sub>A</sub>	X	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Y	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Z	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
B <sub>C</sub>	X	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Y	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Z	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
C	X	□	□	□	□	□	□	□	□	□
	Y	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Z	□	□	□	□	□	□	□	□	□



**Şekil 3.20 :** X,Y ve Z düzlemlerinde oluşan kayma sistemleri [14]

Farklı İşlem rotalarındaki kayma sistemleri Şekil 3.20’de gösterilmiştir. EKAP’ta her bir rota için 4 geçişte kayma düzlemleri 1’den 4’e kadar işaretlenmiştir. Rota C’de kayma kalıp boyunca her geçişte aynı düzlemde

devam etmektedir fakat her geçişte kayma yönü tersine dönmektedir. Bu nedenle Rota C’de çok fazla deformasyonun meydana geldiği rotadır. Rota Bc’de çok fazla deformasyonun meydana geldiği bir rotadır. 1. Pasoda oluşan kayma 3. Pasoda oluşan kayma ile 2.pasoda oluşan kayma da 4. Pasoda oluşan kayma ile iptal edilmektedir. Buna karşın Rota A ve Rota BA’da deformasyon yüksek değildir. Rota A’da  $90^\circ$  açı ile kesişen iki farklı kayma düzlemi Rota BA’da ise  $120^\circ$  açı ile kesişen 4 farklı kayma düzlemi bulunmaktadır. Rota A ve Rota BA’da kalıptan her geçişte artan deformasyon meydana gelmektedir [14].



**Şekil 3.21** : 1, 2, 3 ve 4 geçiş sonunda A, BA, BC ve C işlem rotaları için X, Y ve Z düzlemlerinde kayma modelleri [14]

Şekil 3.21’de X eksenini etrafında bir dönüşe sahip bir  $90^\circ$  kanal açısına sahip EKAP kalıbı kullanılarak kayma modellerini dört farklı rotada gösterilmektedir. En üstteki bölüm 1 (1p) geçişten sonra X, Y ve Z düzlemlerinde görünen kaymayı göstermektedir. Diğer bölümler 2 (2p), 3 (3p) ve 4 (4p) geçiş sonrası A, BA, BC ve C rotaları için desenleri göstermektedir. Çizgiler sırasıyla birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü geçişlere karşılık gelecek şekilde kırmızı, açık mor,

yeşil ve mavi renklerle kodlanmıştır. Bu çizgiler EKAP sırasında seçilen herhangi bir düzlemde görülen kaymanın toplam açısal aralığında önemli bir farklılığın olduğunu göstermektedir. Kolaylık bakımından bu açısal aralık  $\eta$  ile gösterilir ve her bir düzlem ve her geçiş için  $\eta$ 'nin değerleri çizelge 3.3'de gösterilmiştir. Rota Bc X, Y ve Z düzlemlerinde 4 geçişten sonra sırasıyla  $90^\circ$ ,  $63^\circ$  ve  $63^\circ$  değerlerine sahip en geniş açısal aralığı verir [14].

**Çizelge 3.3** : Farklı işlem Rotalarında için açısal aralıklar [14]

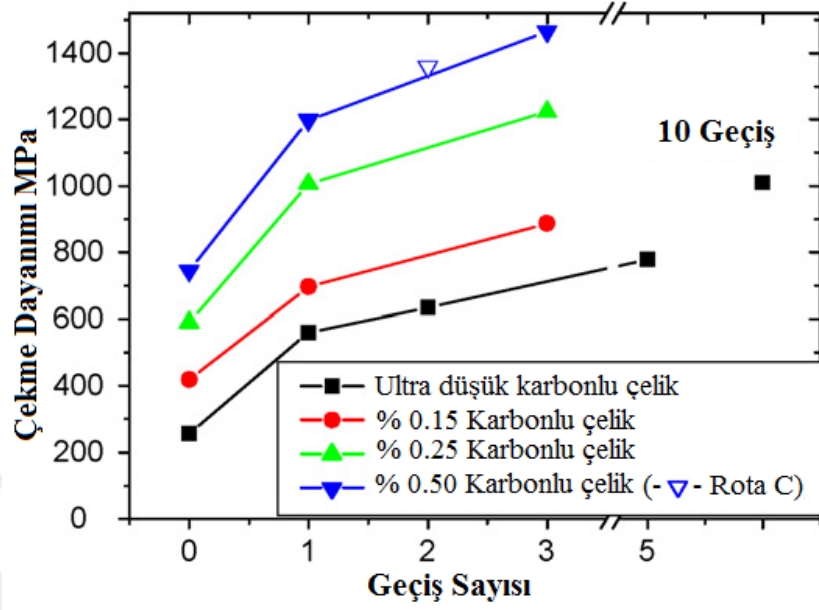
İşlem Rotası	Geçiş Sayısı	Toplam Açısal Aralık, $\eta$		
		X	Y	Z
A	2p	$0^\circ$	$27^\circ$	$0^\circ$
	3p	$0^\circ$	$34^\circ$	$0^\circ$
	4p	$0^\circ$	$37^\circ$	$0^\circ$
B <sub>A</sub>	2p	$27^\circ$	$18^\circ$	$45^\circ$
	3p	$33^\circ$	$27^\circ$	$63^\circ$
	4p	$37^\circ$	$31^\circ$	$72^\circ$
B <sub>C</sub>	2p	$27^\circ$	$18^\circ$	$45^\circ$
	3p	$63^\circ$	$18^\circ$	$63^\circ$
	4p	$90^\circ$	$63^\circ$	$63^\circ$
C	2p	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$
	3p	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$
	4p	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$

### 3.1.5 Geçiş sayısı

EKAP işleminde kalıp içerisinden geçiş sayısı doğrudan numuneye uygulanan toplam gerilme ile orantılıdır [34]. EKAP işleminde homojen bir mikroyapı elde etmek için temel karakteristiklerden birisi yeterli geçiş sayısıdır. Düşük oranlarda orijinal haline dönmek isteyen metallere ince tane boyutları üretmek işlemi oldukça caziptir. Ancak bu malzemelerde homojen tane dizilişi elde etmek için gereken geçiş sayısı artmaktadır [35].

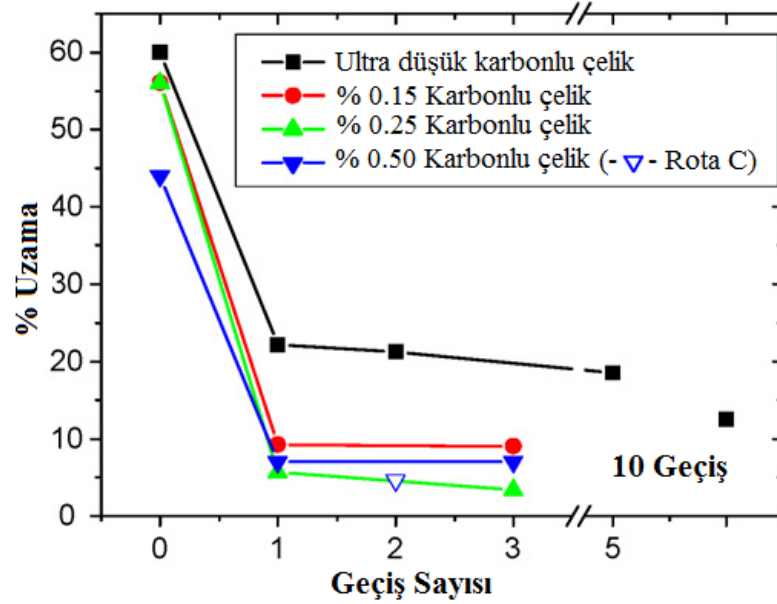
EKAP işleminde metallere optik mikro yapısındaki güçlü filamentli yapının 5 geçiş boyunca artan sayıda geçiş ile geliştirildiği gözlenmiştir. Şekil 3.22 karbon çeliklerinin çekme mukavemeti ve geçiş numarası arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Çekme mukavemeti artan EKAP geçiş sayısı ile birlikte artmaktadır. Ultra-düşük karbonlu çeliğin 10 geçişten sonra çekme mukavemeti

1000 MPa'dan yüksek bir değerdedir. Malzemenin ilk haline ile karşılaştırıldığında 3 kat artış göstermiştir [4].



Şekil 3.22 : Karbon çelikleri için çekme mukavemeti ve geçiş sayısı arasındaki ilişki[4]

Şekil 3.23 karbon çelikleri için toplam uzama ve geçiş sayısı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Düşük karbon çeliği için 3 geçiş sonrasında uzama miktarı % 20'ye düşerken diğer karbon çelikler için 3 geçişten sonra uzama miktarı % 10'a düşmektedir [4].



Şekil 3.23 : Karbon çelikleri için toplam uzama ve geçiş sayısı arasındaki ilişki [4]

Taneler arasındaki yanlış yönlendmenin birinci geçişte oluşan alt tanelere göre ikinci geçişte oluşan alt tanelerde aşırı plastik deformasyon sonucu arttığı görülmektedir. Ayrıca düşük açılı tane sınırının alt tanelerinin geçiş sayısındaki artışla birlikte yüksek açılı tane sınırına dönüştüğünü görülmektedir [36].

Yapılan bir çalışmada ticari saf alüminyum EKAP yöntemi kullanılarak BC rotası ile 8 geçişe kadar preslenmiştir. Süreç boyunca dislokasyon yoğunluğu artmakta ve ortalama sınır aralığı azalmaktadır. Her ikisi de malzemenin güçlendirilmesine katkıda bulunmaktadır. Bu eğilim 4 geçişe kadar devam etmektedir. 4 geçişten sonra dislokasyon yoğunluğunun güçlenmeye katkısı azalırken tane sınırlarının katkısı yaklaşık olarak sabit kalır. Bu nedenle EKAP süreci boyunca ticari saf Al'ın sertlik değeri ve akma gerilmeleri 4 geçişten sonra maksimuma ulaşır. 4 geçişten 8 geçişe doğru yavaş yavaş azalır [37].

### **3.1.6 Geri presleme (Karşı basınç)**

EKAP işleminde karşı basınç basit kayma düzensizliğini azaltmak ve numune hatalarını ortadan kaldırmak için başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Karşı basınç uygulamak deformasyon bölgesinin genişliğine bağlı olarak düzgün bir ultra ince taneli yapı oluşturmak için gerekli olan toplam gerilimi düşürür. Karşı basınç uygulaması EKAP işlemi sırasında dış köşenin doldurulmasına ve bunun sonucu olarak ölü bölgenin ortadan kaldırılmasını sağlar [38].

Karşı basıncın artırılması intermetalik parçacıklarda çatlamayı geciktirir ve EKAP tarafından işlenen alaşımın işlenebilirliğinde ve sünekliğinde iyileşmeyi teşvik eder. Aynı geçiş sayısında karşı basınçta bir artış mukavemette önemli olmayan bir azalma ile uzamada artışa neden olur. Karşı basınç sünekliği düşük alaşımlar için özellikle önemlidir ve uygulandığında numunelerde hasar oluşumu azalır [39].

Karşı basınç uygulamasının numune ile kalıp arasındaki boşluğu ortadan kaldırmakta ve deformasyon modunu basit bir kaymaya dönüştürmektedir. Gerilme-deformasyon dağılımı düzgün hale gelmekte ve düşük sünekliteki malzemeler başarılı bir şekilde preslenebilmektedir. Gösterilen karşı basınç aynı zamanda tane inceltme sırasında tane boyutunu da etkiler. Alüminyum alaşımları için aşırı plastik deformasyona (APD) ve hidrostatik basınca bağlı olarak hasarın oluşumu ve iyileştirilmesi için yapılan araştırmada hasar

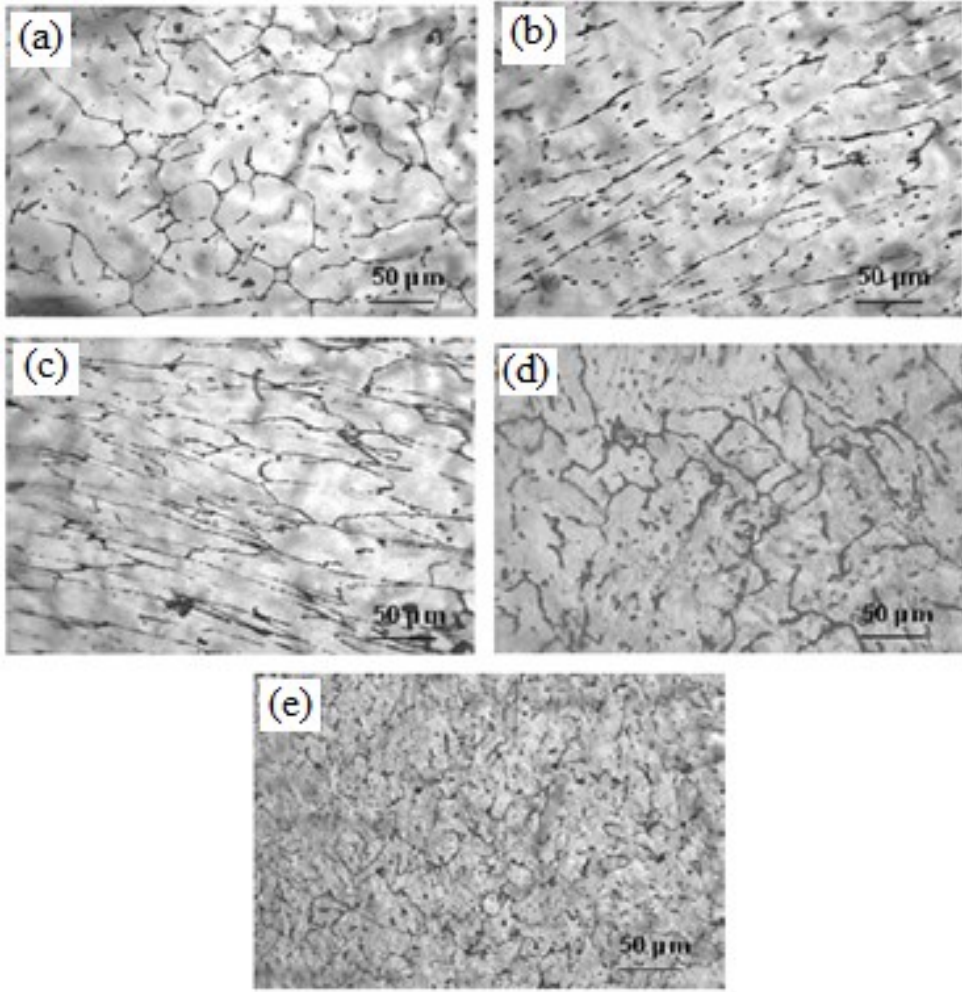
birikiminin plastik gerilme miktarı ile orantılı olduğu gösterilmektedir. Hasar birikimin yoğunluğu stres durumuna bağlıdır. Karşı basınç uygulamasının hasar birikiminin ve kusurların oluşmasını önlemektedir. Karşı basınç uygulamasının olmaması aşırı plastik deformasyona (APD) bağlı kusurların gelişimine yol açar [40].

### **3.1.7 Preslenecek malzeme kesiti**

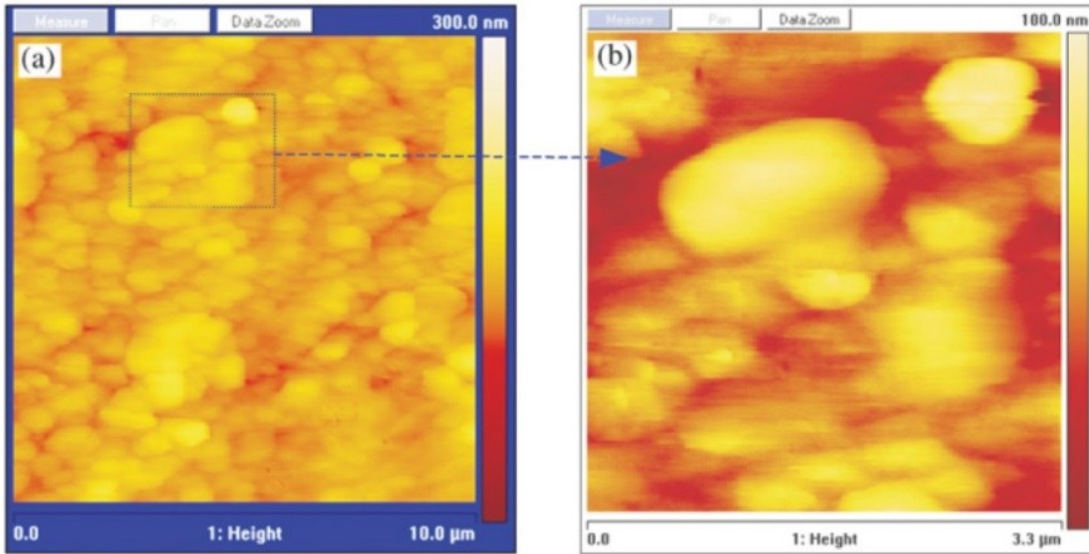
12,5 mm x 12,5 mm, 50 mm x 50 mm, 100 mm x 100 mm kesit değerlerine sahip 6061 alüminyum alaşımı ile yapılan EKAP işleminde farklı kesit alanındaki malzemelerdeki sertlik miktarının artan gerilim miktarı ile arttığı görülmektedir ve sertleşme süreci işlemin tüm boyutlarında çok benzerdir. Aynı çalışmada 6061 alüminyum alaşımının tane boyutu EKAP işlemi sonrasında farklı kesitlerdeki malzemelerde 3.0 veya daha yüksek birikmiş gerilime değerine kadar ortalama 0.5  $\mu\text{m}$ 'ye düşmüştür [41].

### **3.2 EKAP Mikroyapı**

Yapılan bir çalışmada % 99.5 saf alüminyuma 4 geçiş EKAP işlemi uygulanmış ve optik mikroyapı incelenmiştir. Başlangıçta preslenmemiş malzeme şekil 3.24a'da gösterildiği gibi ortalama tane boyutu 150  $\mu\text{m}$  olan büyük tanelerden oluşmaktadır. Bir EKAP geçişinden sonra ilk taneler şekil 3.28b'de gösterildiği gibi düzgün bir şekilde uzatılmıştır. Şekil 3.24c'de gösterildiği gibi ikinci geçişten sonra kayma çizgileri kaybolur ve malzemede artan gerilme ve rotasyon seviyeleri ile daha ince ve eşit eksenli taneler oluşur. Şekil 3.24e dördüncü geçiş sonrası tane yapısının daha da incelmesini gösteren mikroyapı resmini ortaya koymaktadır. Geçiş sayısı 8'e kadar yükseldiğinde, dislokasyon yoğunluğu artar ve taneler son derece ince hale gelir . Bundan dolayı taneler ve tane sınırları optik mikroskop altında görünmez ve malzeme kontak modu işlemi ile atomik kuvvet mikroskobu (AKM) tekniği ile karakterize edilir. Şekil 3.25'de 8 geçiş sonrası alüminyumun AKM görüntüsünü verilmiştir. AKM görüntüsünden tane boyutunun 620 nm olduğu tespit edilmiştir [42].



**Şekil 3.24 :** % 99.5 saf alüminyumun optik mikroyapıları: (a) preslenmemiş (b) Bir geçiş sonrası (c) iki geçiş sonrası (d) üç geçiş sonrası (e) dört geçiş sonrası [42]



**Şekil 3.25 :** 8 geçiş sonrası % 99.5 saf alüminyumun AFM görüntüsü [42]

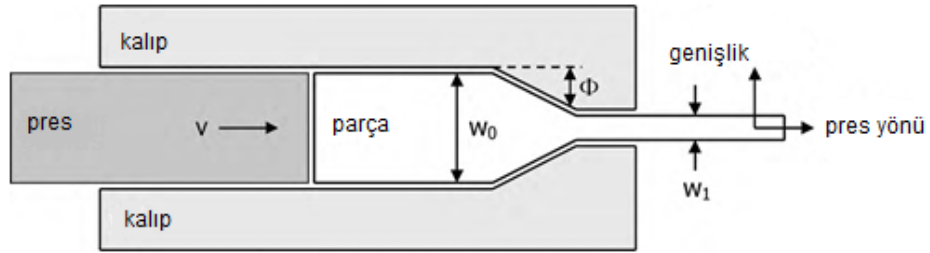


### 3.3 Eşit Kanallı Açısal Presleme İle Konvansiyonel Ekstrüzyon Karşılaştırılması

Eşit kanallı açısal presleme ile konvansiyonel ekstrüzyon karşılaştırırken temel farklılık kalıp konstrüksiyonundadır. Eşit kanallı açısal preslemede giriş ve çıkış kanallarında kesit şekli ve boyutu aynı kalmaktadır. Öte yandan şekil 3.26'da gösterildiği gibi geleneksel bir ekstrüzyon yönteminde giriş kanalı ile çıkış kanalı arasındaki şekil ve boyutta ciddi bir değişiklik vardır. Bu farktan dolayı konvansiyonel ekstrüzyonla deformasyonun sadece bir kez uygulanabileceği düşünülmektedir. Diğer taraftan eşit kanallı açısal presleme kullanıldığında bir malzemeye sonsuz sayıda baskı yapmak teorik olarak mümkündür. Dolayısıyla, toplam etkili deformasyon, konvansiyonel ekstrüzyonda eşitlik 3.9'da gösterildiği gibi tek preslemenin deformasyonuna ve eşit kanallı açısal preslemede ise eşitlik 3.10'da gösterildiği gibi her presleme sonucunda oluşan toplam deformasyona eşittir.  $V$  pres hızını,  $W_0$  parçanın başlangıçtaki kalınlığı,  $W_1$  kütüğün işlemden sonraki kalınlığı,  $\Phi$  kalıp ağzının eğim açısı ifade etmektedir [22].

**Konvansiyonel ekstrüzyon:**  $\epsilon_{\text{Toplam}} = \epsilon_1$  (3.9)

**Eşit kanallı açısal presleme:**  $\epsilon_{\text{Toplam}} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_n = n \epsilon_i$  (3.10)



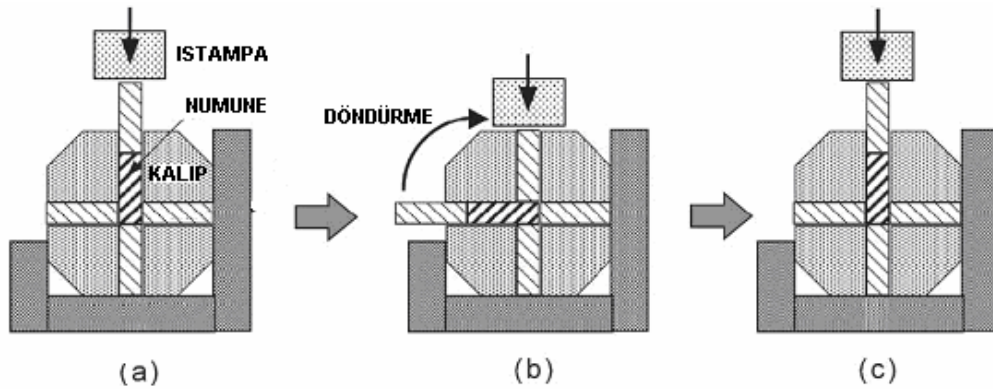
Şekil 3.26 : Konvansiyonel Ekstrüzyon kalıp konstrüksiyonu [22]



## 4 ALTERNATİF EKAP YÖNTEMLERİ VE PARALEL KANALLI EKAP

### 4.1 Döner Kalıp

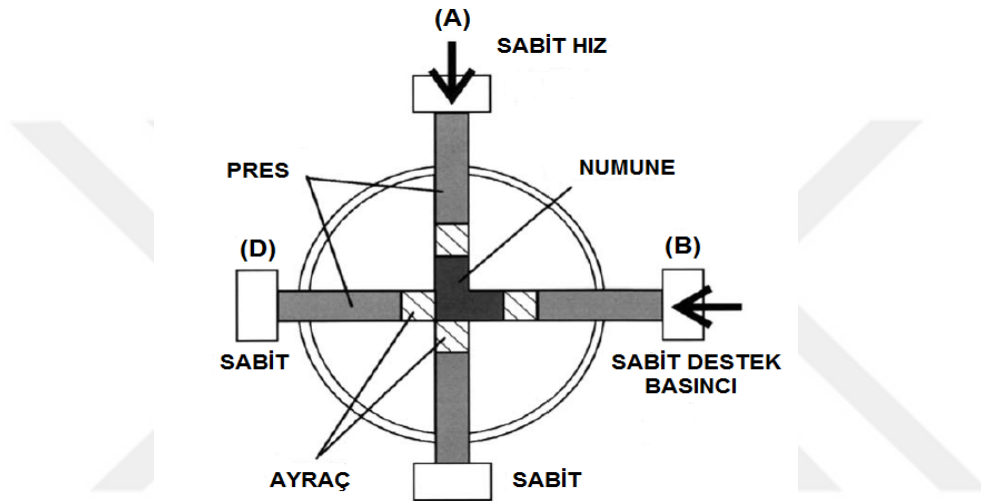
Geleneksel EKAP yöntemindeki sınırlama parçayı kalıptan çıkarıp tekrar takmak ve bu arada döndürme işlemidir. Başarılı sonuçlar alabilmek için çok sayıda geçiş ve yüksek miktarda yük gerekmektedir. Farklı yöntemler geliştirilerek bu sınırlamalar önlenmektedir. Basit bir yöntemle parçanın her seferinde kalıptan çıkarılması gereksinimini ortadan kaldırmak için döner kalıp yöntemi kullanılmaktadır. Bu yaklaşım şekil 4.1’de gösterilmiştir. Bu yöntem aynı kesite sahip  $90^\circ$  bir açı ile kalıp merkezinde kesişen iki kanal ihtiva eden bir kalıptan oluşmaktadır. Şekil 4.1a’da gösterildiği gibi 3 adet eşit uzunluktaki ıstampa dikey olarak alt kanala ve yatay kanallara yerleştirilir. Parça kalıp içine dikey olarak konulur. Alttaki ıstampa ile üstteki ıstampa arasında preslenir. Bu durum şekil 4.1b’de gösterilmiştir. Şekil 4.1c’de gösterildiği gibi kalıp tekrar presleme yapabilmek için  $90^\circ$  döndürülür. Burada numune hiç döndürülmemektedir ve rota A ya eşdeğer tipte bir imalat yöntemine sahiptir. Bu yöntemin önemli avantajı işlem kolaylığıdır. Döner kalıp EKAP yöntemi ile arka arkaya maksimum 32 geçiş yapılabilmektedir [43].



**Şekil 4.1 :** Döner EKAP kalıbı: (a) Başlangıç durumu, (b) 1 geçiş sonrası, (c) Kalıbın  $90^\circ$  döndürülmüş hali [43]

## 4.2 Kenar Ekstrüzyon

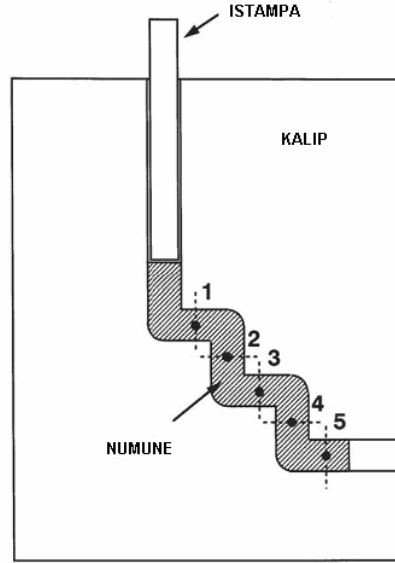
Döner kalıp yöntemine alternatif fakat fiziksel olarak benzer bir yaklaşım kenar ekstrüzyon yöntemi şekil 4.2’de gösterilmiştir. Bu proseste yüksek miktarda yük uygulama özelliğine sahip 4 adet ıstampa ile destekli kamalar kullanılmaktadır. B ıstampası tarafından yanıl basınç uygulanan numuneye A ıstampası tarafından yük uygulanmaktadır. Döner EKAP kalıbı gibi tekrarlama özelliğine sahiptir. Etkili bir biçimde 10 geçişe kadar uygulanan bu yöntemde rota A ya eşdeğer bir sistemdir [43].



Şekil 4.2 : Kenar ekstrüzyon kalıbı [43]

## 4.3 Çok Geçişli Kalıp

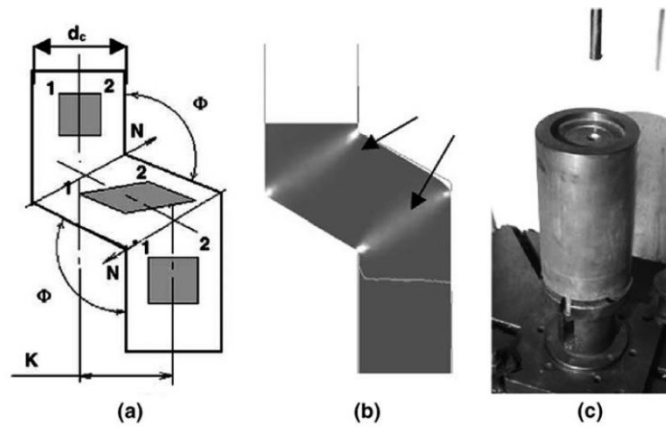
Bu yöntemde Şekil 4.3’de gösterildiği gibi kompleks bir kalıp gerektirmeden çok geçişli şekilde tasarlanmıştır. Kalıp baştan sona doğru aralarındaki açı 90° olacak şekilde bükülmüş 5 kısımdan oluşmaktadır. Parçada ikinci ve sonraki geçişlerde 180° dönüş meydana gelmektedir. Rota C’ye eşdeğer bir işlemdir. Bu tip kalıplarda aynı malzemenin farklı geçişlerdeki mikro yapısal özelliklerini karşılaştırmak için kullanılmaktadır. 1, 2, 3, 4, 5 numaraları ile işaretlenmiş kısımlarda EKAP ile birbirinden farklı 1, 2, 3, 4, 5 geçişi sağlamak için yük uygulanmaktadır. Aynı sayıda geçişlerde çok geçişli kalıp ile geleneksel kalıpta mikro yapısal gelişme ve bölgesel dayanım değerlerinin aynı olduğu görülmektedir [43].



Şekil 4.3 : Çok geçişli EKAP kalıbı [43]

#### 4.4 Paralel Kanallı EKAP

Paralel kanal yönteminde malzemenin kanaldan bir geçişi sırasında iki farklı kesme olayı meydana gelmektedir. Bu da daha az sayıda geçiş ile ultra ince taneli yapının oluşumunu sağlamaktadır. Kanallar arası kesişme açısı  $\Phi$  ve kanallar arası uzaklık  $K$  şekil 4.4’de gösterildiği gibi kalıp geometrisindeki ana parametrelerdir. Doğrudan deneyler ve simülasyon ile iki paralel kanallı preslemenin avantajı kanıtlanmıştır. İki kanal arasındaki yanıl yer değıştirme miktarı kanal genişliğine eşit olduğu zaman en iyi koşul elde edilmektedir [43].



Şekil 4.4 : Paralel kanallı EKAP kalıbı prensipleri: (a) N yönünde kaymanın şematik görüntüsü, (b) Simülasyon ile elde edilen deformasyon zonları, (c) Deneysel EKAP kalıbı [43]



## 5 ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

Metaller saf hallerinde oldukça az kullanılır. Bir metale bir veya daha fazla element ilavesi ile alaşım oluşmaktadır. Böylece metal alaşımsız durumuna göre önemli ölçüde farklı özellikler kazanmaktadır. Alüminyuma alaşım elementlerinin ilavesi ile bazen saf metalin belirli özellikleri (korozyon direnci veya elektrik iletkenliği gibi) azalmaktadır. Bazı uygulamalar için bu kabul edilebilir bir durumdur. Çünkü mukavemet gibi diğer özellikleri çok belirgin bir şekilde artabilmektedir. Yaklaşık 15 alaşım elementi alüminyum ile kullanılır ve genellikle ağırlığa göre alaşımın % 10'dan azını oluştururlar. Malzeme özellikleri önemli ölçüde etkileyebilirler [44].

Alüminyum alaşımları işlem alaşımlar ve dökme alaşımlar olmak üzere iki kategoriye ayrılırlar. İşlem Alüminyum alaşımlarına şekil vermek için işlenmektedir. Dökme alaşımlar ise bir kalıba erimiş bir halde dökülerek elde edilen alaşımlardır [44].

### 5.1 İşlem Alüminyum Alaşımları

Alüminyum Birliği sisteminde birlikle kayıtlı olan her alaşıma dört basamaklı sayı numarası verilir. Dört rakamlı sayısal simgenin ilk rakamı alaşımın hangi temel alaşım elementini içerdiğini gösterir. Son iki basamak sırayla alüminyum birliği tarafından atanır. İkinci basamak bir alaşımın modifikasyonunu gösterir [44].

Örneğin, 6463 alaşımı 6063 alaşımının bir modifikasyonudur. Daha iyi özellikleri elde etmek için demir, manganez ve krom gibi bazı alaşım elementleri üzerinde biraz daha kısıtlama yapılmıştır. İşlem alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementleri çizelge 5.1'de gösterilmiştir [44].

**1xxx:** Bu grup minimum %99 alüminyum içerir. Ticari olarak saf Alüminyum olarak tanımlanmıştır. 1xxx serisinde saflık değeri ve içerdiği elemen miktarına göre alaşım numaraları verilir. Başlıca elementler demir ve silisyumdur. Bu seri

alaşımların temel özelliği elektrik iletimi ve kimyasal depolama ya da saklama işlemleridir çünkü bu serilerin alaşımlarının en iyi özellikleri, elektrik iletkenliği ve korozyon direncidir. Alaşım numarasının son iki hanesi, alüminyum malzemenin virgülden sonra iki basamağı belirtir. Örneğin, 1060 alaşımı % 99.60 alüminyum oranını gösterir. Dayanım saf alüminyumda nispeten düşüktür [44].

**Çizelge 5.1 :** İşlem alüminyum alaşımlarının gösterimi [45]

Alaşım	Ana Alaşım Elementi
1xxx	Saf Alüminyum
2xxx	Bakır
3xxx	Manganez
4xxx	Silisyum
5xxx	Magnezyum
6xxx	Magnezyum- Silisyum
7xxx	Çinko
8xxx	Diğer elementler
9xxx	Kullanılmayan dizi

**2xxx:** Bu grubun temel alaşım elementi yüksek mukavemet üreten fakat korozyona karşı direnci azaltan bakırdır. Bu alaşımlar geliştirilen ilk alüminyum alaşımları arasındaydı ve başlangıçta duralümin olarak adlandırılmıştır. Alaşım 2024 uçaklarda en çok bilinen ve en çok kullanılan alaşımdır. Orijinal alüminyum-bakır alaşımlarının kaynak özelliği iyi değildi. Daha sonra alaşım geliştirilerek bu durum ortadan kaldırıldı [44].

**3xxx:** Manganez 3xxx serisinin ana alaşım elementidir ve alaşımsız alüminyumun mukavemetini yaklaşık % 20 artırır. Başlıca 3003, 3004 ve 3105 alaşımlarından oluşan bu gruptaki alaşımların korozyon direnci ve işlenebilirliği iyidir. 3xxx serisi alaşımlar yağmur taşıma ürünleri, çatı kaplama ve siding gibi mimari ürünlere çok uygundur [44].



**4xxx:** Kaynak ve lehimleme uygulamaları için erime noktasını düşürmek için 4xxx serisinin alaşımlarına silisyum eklenir. Silisyum aynı zamanda iyi akış özellikleri sağlar. Bu alaşım dövme işlemlerinde karmaşık kalıp şekillerinin daha eksiksiz doldurulmasında kullanılır. 4043 alaşımı yaygın olarak kaynak dolgu telinde kullanılır [44].

**5xxx:** Bu alaşımlar yüksek mukavemet ve aşınma direnci ile sonuçlanan magnezyum içermektedir. Bu grubun alaşımları gemi gövdelerinde, denizcilik uygulamalarında ve kaynak teli için kullanılır. Bu serideki alaşımların mukavemeti yaklaşık % 6'ya kadar magnezyum içeriğiyle doğru orantılı olarak artmaktadır [44].

**6xxx:** Bu gruptaki alaşımlarda magnezyum ve silisyum Magnezyum silisid ( $Mg_2Si$ ) şeklinde bileşik oluşturmaktadır. Bu alaşımların korozyon direnci ve mukavemeti iyi dengelenmiştir. Al 6061 tüm alüminyum alaşımlarının en popülerlerinden biridir ve hafif karbon çeliğiyle karşılaştırılabilir bir akma mukavemetine sahiptir. 6xxx serisi alaşımlar çok kolay ekstrüzyona tabi tutulurlar bu nedenle üretilen ekstrüzyon ürünlerinin çoğunluğunu oluştururlar. Bina, inşaat ve diğer yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar [44].

**7xxx:** Bu serinin temel alaşım elementi çinkodur. 7xxx serisi alüminyum-çinko-magnezyum alaşımları (örneğin 7005) ve alüminyum-çinko-magnezyum-bakır alaşımları (7075 ve 7178 gibi) olmak üzere iki tür alaşım içermektedir. Bu serinin alaşımları minimum çekme mukavemeti 580 MPa olan 7178 gibi güçlü alüminyum alaşımlarından bazılarını içerir ve uçak çerçevelerinde ve yapısal bileşenlerde kullanılır. Bununla birlikte bakır ile alaşımlanmış bu 7xxx serisi alaşımların korozyon direnci 1xxx, 3xxx, 5xxx veya 6xxx serilerinden daha azdır. Bakır içermeyen 7xxx alaşımları korozyona dayanıklıdır ve bazıları (örneğin 7008 ve 7072) katodik olarak daha az korozyona dayanıklı alüminyum alaşımlarını korumak için kaplama olarak kullanılırlar [44].

**8xxx:** 8xxx serisi, 2xxx - 7xxx serisi için kullanılanlar dışındaki alaşım elementleri için ayrılmıştır. Demir ve nikel, 8017 gibi iletken alaşımlarda olduğu gibi elektrik iletkenliğinde önemli bir kayıp olmaksızın mukavemeti artırmak için kullanılır [44].

**9xxx:** Bu dizi şu anda kullanılmıyor [44]

## 5.2 Döküm Alüminyum Alaşımları

Döküm alaşımları işlem alaşımlarından daha büyük oranlarda alaşım elementleri içerir. Bu genellikle dövme alaşımlarının homojen yapısından daha az sünek olan heterojen bir yapıya neden olur. Döküm alaşımlarında döküm yapmak için gerekli akışkanlığı sağlamak için dövme alaşımlarından daha fazla silisyum içerir. Döküm alaşım tanımlama sistemi üç basamaklıdır bunu bir ondalık basamak izlemektedir. Birinci basamak temel alaşım elementini gösterir. İkinci ve üçüncü basamaklar alüminyumun saflık değerini belirtir. Noktadan sonraki rakam ise döküm şeklini gösterir. İngot malzemeler 1 veya 2 (safsızlık seviyelerine bağlı olarak) ile döküm malzemeler 0 ile gösterilir. Döküm alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementleri çizelge 5.2’de gösterilmiştir [44].

**Çizelge 5.2 :** Alüminyum döküm alaşımlarının gösterimi [45]

Alaşım	Ana Alaşım Elementi
1xx.x	Saf Alüminyum, max.% 99.00
2xx.x	Bakır
3xx.x	Bakır veya magnezyum eklenmiş silisyum
4xx.x	Silisyum
5xx.x	Magnezyum
6xx.x	Kullanılmayan seri
7xx.x	Çinko
8xx.x	Kalay
9xx.x	Diğer elementler

**1xx.x:** Bunlar ticari olarak dökme saf alüminyum alaşımlardır. Bunların kullanıldığı alan döküm motor rotorlarıdır [44].

**2xx.x:** Temel alaşım elementi olarak bakır kullanımını çok güçlü döküm alaşımlarının oluşmasını sağlar. Bu grup alaşımlar takım tezgahları, uçaklar ve makina parçaları için kullanılır. Alaşım 203.0 yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemete sahiptir ve 200 °C'de kullanım için uygundur [44].

**3xx.x:** Bu seride silisyum, bakır veya magnezyum ile birlikte kullanılır. Bu alaşımlar mükemmel akışkanlık ve mukavemete sahiptir. En çok kullanılan alüminyum döküm alaşımlardır. Alaşım 356.0 ve modifikasyonları çok popülerdir ve birçok farklı uygulamada kullanılmaktadır. Yüksek silisyum alaşımları iyi aşınma direncine sahiptir. Otomotiv motor blokları ve pistonlarında kullanılırlar [44].

**4xx.x:** Bu seride silisyum kullanımını dökme alaşımlarda mükemmel akışkanlık sağlar ve bu nedenle bunlar karmaşık dökümlere çok uygundur ve genel korozyona karşı iyi dirençlidir. 444.0 alaşımının dayanımı azdır ancak sünekliği iyidir [44].

**5xx.x:** Magnezyumla birlikte kullanılan döküm alaşımları özellikle deniz ortamlarında (örneğin 514.0) iyi aşınma direncine ve iyi işlenebilirlik özelliğine sahiptir. Bununla birlikte dökümü 200, 300 ve 400 serilerinden daha zordur [44].

**6xx.x :** Bu seri kullanılmamaktadır [44].

**7xx.x:** Öncelikle çinko ile alaşımlı olan bu serinin dökümü zordur ve bu nedenle sonlandırma özelliklerinin veya işlenebilirliğin önemli olduğu yerlerde kullanılır. Bu alaşımların orta ve iyi mukavemet değerlerine sahiptir. İyi genel korozyon direnci vardır ancak yüksek sıcaklıklar için uygun değildir [44].

**8xx.x:** Bu seri yaklaşık % 6 kalay ile alaşımlanmış olup öncelikli olarak rulmanlar için kullanılır ve bu amaçla diğer birçok malzemeye göre üstünlük sağlar. Bu alaşımlar büyük mil yatakları, bağlantı çubukları ve dizel motorları krank mili yataklarında kullanılır [44].

**9xx.x:** Bu seri diğer serilerden farklı elementler ile alaşımlanmış dökümler için ayrılmıştır [44].

### 5.3 Alüminyum Alaşımları Temper Tanımları

Alüminyum alaşımlarına alaşım elementleri ilave ederek malzemeyi güçlendirmenin haricinde mukavemeti arttırmak için ısıtıl işlem uygulayarak veya gerinim sertleştirilmesi ile temperleme yapılır. Alaşımlar, ısıtıl işlem uygulanarak veya ısıtıl işlem uygulanmadan mukavemetlerini arttırmalarına bağlı olarak iki gruba ayrılırlar. Isıtıl işlem uygulanabilen ve ısıtıl işlem uygulanamayan her iki alaşım grubu da soğuk işlem adı verilen gerinim sertleştirilmesi ile güçlendirilebilir. Isıtıl işlem uygulanmayan alaşımlar sadece soğuk işlemle güçlendirilebilir. Bir alaşımın ısıtıl uygulanabilir olup olmadığı alaşım elementlerine bağlıdır [44].

Temper tanımlama sistemi hem işlem hem de döküm alaşımlar için aynıdır. Temper tanımı alaşım tanımlamasını izler ve ikisi bir - işareti ile ayrılır. (örneğin, 5052-H32). Temel temper tanımları harflerdir. Temel temper alt bölümleri harfi takip eden bir veya daha fazla sayı ile verilir. Çizelge 5.3'te Alüminyum alaşımlarının temper tanımları gösterilmiştir [44].

**Çizelge 5.3:** Alüminyum Alaşımları Temper Tanımları [44]

Temper Tanımı	Açıklama
<b>F</b>	İmal edildiği şekilde
<b>O</b>	Tavlanmış
<b>H</b>	Soğuk işlem görmüş
<b>W</b>	Çözelti ısıtıl işlemi görmüş
<b>T</b>	Yaşlandırılmış
<b>H1</b>	Sadece soğuk işlem görmüş
<b>H2</b>	Soğuk işlem görmüş ve kısmen tavlanmış
<b>H3</b>	Soğuk işlem görmüş ve kararlılaştırılmış
<b>T1</b>	Yüksek sıcaklıkta şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve doğal yaşlanma ile kararlı hale getirilmiş.
<b>T2</b>	Yüksek sıcaklıkta şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırılmış
<b>T3</b>	Çözelti ısıtıl işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve kararlı hale kadar doğal yaşlandırılmış kadar doğal yaşlandırılmış

**Çizelge 5.3: (devam)Alüminyum Alaşımları Temper Tanımları [44]**

<b>T4</b>	<b>Çözelti ısı işlemi uygulanmış, ve kararlı hale kadar doğal yaşlandırılmış</b>
<b>T5</b>	Yüksek sıcaklıkta şekillendirme işleminden soğutulmuş ve yapay yaşlandırılmış
<b>T6</b>	Çözelti ısı işlemi uygulanmış ve yapay yaşlandırılmış
<b>T7</b>	Çözelti ısı işlemi uygulanmış ve aşırı yaşlandırılmış
<b>T8</b>	Çözelti ısı işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış.
<b>T9</b>	Çözelti ısı işlemi görmüş, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş
<b>T10</b>	Yüksek sıcaklıkta şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırılmış

#### 5.4 Alaşım Elementleri Ve Etkileri

**Bakır:** Alüminyum-bakır alaşımları % 2 ile % 10 arasında bakır içermektedir. Diğer katkıları ile birlikte önemli alaşım ailesini oluşturmaktadır. Döküm ve işlem alüminyum-bakır alaşımları çözelti ısı işlemine ve yaşlanmaya dayanıklılık ve sertlikte artış uzamada ise azalma ile tepki verir. Dayanıklılık mevcut diğer bileşenlere bağlı olarak % 4 ile % 6 bakır arasında maksimum seviyededir [46].

**Silisyum:** İşlem alaşımlarda silisyum 6xxx ısı ile işlenebilir alaşım serisinde  $Mg_2Si$  üretmek için % 1.5'a kadar magnezyum ile birlikte kullanılır. Herhangi bir silisyum içeren alaşıma az miktarda magnezyum ilave edildiğinde ısıyla işlenebilir hale gelecektir.  $Mg_2Si$  oluşturmak için gerekenin üzerinde olan fazla magnezyum, bu bileşiğin katı eriyebilirliğini azaltmaktadır. Silisyumun modifikasyonu, ötektik ve hipoötektik alaşımlarda sodyumun eklenmesiyle ve hiperötektik alaşımlarda fosfor ile gerçekleştirilebilir. Lehim levhası için kaplama olarak kullanılan işlem alaşımlarında % 12'ye kadar Si eklenir. Aşınma uygulamaları için kullanılan hiperötektik döküm alaşımları % 23 Si içerir [46].

**Magnezyum:** Magnezyum 5xxx serisindeki alaşımların ana alaşım elementidir. Alüminyumun içinde maksimum katı çözülebilirliği % 17.4'tür ancak mevcut işlem alaşımlarındaki magnezyum içeriği % 5.5'i aşmamaktadır. Magnezyumun ilavesi sünekliği çok fazla azaltmaksızın alüminyumun dayanımını belirgin bir şekilde artırır. Korozyon direnci ve kaynak edilebilirliği iyidir [46].

**Manganez:** Manganez alüminyumun konsantrasyonunda normalde 5 ila 50 ppm arasında değişen miktarda bulunan temel bir katkıdır. Korozyon direnci üzerinde olumsuz bir etkisi yoktur. Manganez normal katkıların varlığında alüminyumda çok sınırlı bir katı çözünebilirliğe sahiptir. Mukavemeti artırmak ve tane yapısını kontrol etmek için kullanılır. Manganezin etkisi yeniden kristalleştirme sıcaklığını arttırmak ve sıcak işleme üzerine lifli yapı oluşumunu desteklemektir. Toparlanmayı yavaşlatmada ve tane büyümesini önlemede etkilidir [46].

**Çinko:** Alüminyum-çinko alaşımları uzun yıllardır bilinmektedir. Ancak döküm alaşımlarının sıcak çatlaması ve işlem alaşımlarının gerilme-aşınma kırılmasına yatkınlığı kullanımlarını azalttı. Diğer elementleri içeren alüminyum-çinko alaşımları işlem alüminyum alaşımlarında en yüksek gerilme mukavemeti kombinasyonunu sunar [46].

**Demir:** Demir alüminyumda en yaygın bulunan katkıdır. Erimiş alüminyumda yüksek bir çözünebilirliğe sahiptir. Demir dövülmüş ürünlerde tane ebadını azaltır. 8006 gibi üçlü ötektik içeriğe yakın demir ve manganez alaşımları, oda sıcaklığında mukavemet ve süneklik kombinasyonlarına sahip olabilir aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda mukavemeti koruyabilir. Yüksek sıcaklıklarda mukavemeti artırmak için alüminyum-bakır-nikel grubu alaşımlarına demir ilave edilir [46].

**Krom:** Krom ticari saflık derecesinde alüminyumda (5 ila 50 ppm) küçük miktarda görülürler. Elektrik direnci üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Krom alüminyum-magnezyum, alüminyum-magnezyum-silikon ve alüminyum-magnezyum-çinko gruplarının birçok alaşımında ortak bir katkı olup genel olarak % 0.35'i aşmayan miktarlarda eklenir. Krom yavaş bir difüzyon oranına sahiptir ve işlem ürünlerde ince dağılmış fazlar oluşturmaktadır. Bu dağıntık fazlar çekirdeklenme ve tane büyümesini engeller. Krom tane yapısını kontrol etmek ve alüminyum-magnezyum alaşımlarında tane gelişimini önlemek için kullanılır. Isıl işlem sırasında alüminyum-magnezyum-silikon veya alüminyum-çinko alaşımlarında yeniden kristalleşmeyi önlemek için kullanılır [46].

**Titanyum:** Ticari saflık alüminyumda 10 ile 100 ppm arasında titanyum bulunur. Titanyum öncelikle alüminyum alaşımlarında bir tane inceltici olarak

kullanılır. Eriyik içinde bor varlığında ya da büyük oranda  $TiB_2$  olarak birleştirilen bor içeren bir ana alaşım olarak eklendiğinde tane inceltme etkisi artar. Titanyum, kaynak doldurma teline ilave edilmektedir. Kaynak yapısını rafine eder ve kaynak kırılmasını önler [46].

**Nikel:** Nikelin alüminyum içindeki katı çözünürlüğü % 0.04'ü aşmamaktadır. Nikel % 2'ye kadar yüksek saflıkta alüminyumun mukavemetini arttırır ancak sünekliği azaltır. İkili alüminyum-nikel alaşımları artık kullanılmıyor ancak yükseltilmiş sıcaklıklarda sertlik ve mukavemeti arttırmak ve genişleme katsayısını azaltmak için alüminyum-bakır ve alüminyum-silikon alaşımlarına nikel ekleniyor. Yüksek basınçlı buhara karşı korozyon direncini arttırmak için demirle birlikte arzu edilen bir katkıdır [46].





## 6 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 6.1 Deneyin Uygulanacağı Malzeme ve Özellikleri

EKAP işleminin uygulandığı deney çalışmada kullanılmak üzere 6063 Alüminyum alaşımı seçilmiştir. 6063 Al alaşımının kimyasal bileşimi Çizelge 6.1’de verilmiştir.

**Çizelge 6.1 :** Deneylerde kullanılan 6063 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Diğer	Al
0,5	0,7-1,3	0,1	0,4-1,0	0,6-1,2	0,2	0,15	0,15	Kalan

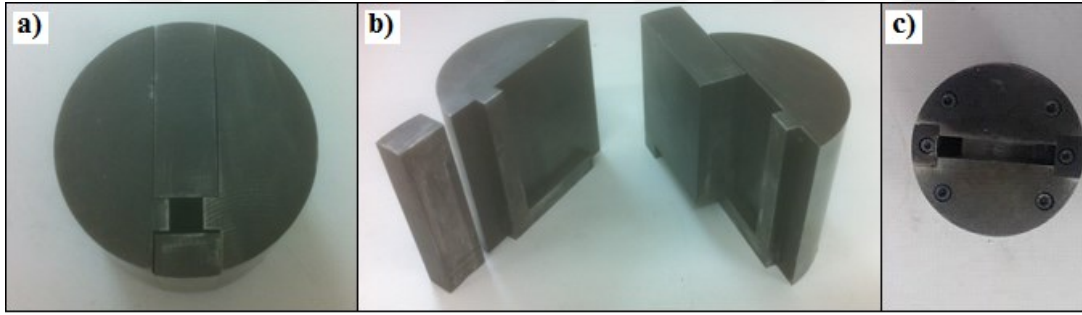
6063 Al alaşımı 10 mm x 10 mm kesit alanında ve çubuk formunda temin edilmiştir. Daha sonra çubuk şeklindeki malzeme elmas testereli gönye kesim makinası ile kesilerek şekil 6.1’de gösterildiği gibi 10 mm x 10 mm x 55 mm ölçülerinde numuneler hazırlanmıştır. 6063 Al alaşımı “O” ısıl işlem formundadır.



**Şekil 6.1 :** EKAP uygulanmamış numune

## 6.2 EKAP Kalıbı

Kalıp yeni bir tasarım ile iç kalıp ve dış kalıptan oluşacak şekilde parçalı biçimde üretilmiştir. Çekirdek kısmı iç kalıbı oluştururken iç yüzeyi mors koniği şeklinde işlenmiş dış taşıyıcı gövde, dış yüzeyi mors koniği şeklinde işlenmiş iç bilezik, alt kapak, üst kapak, alt sıkıştırma parçası, üst sıkıştırma parçası ve civatalar dış kalıp kısmını oluşturmaktadır. Kalıbın EKAP işleminin uygulanacağı kanal kısmını oluşturan parçalar çekirdek bölümüdür. Çekirdek bölümünün parçalı şekilde üretilmesindeki amaç yüksek yüklere maruz kalacak olan çekirdek kısmın çatlamasını veya kırılmasını engellemektir. Çekirdek kısmı şekil 6.2’de gösterildiği gibi 8 parçadan oluşacak şekilde silindirik biçimde üretilmiştir.



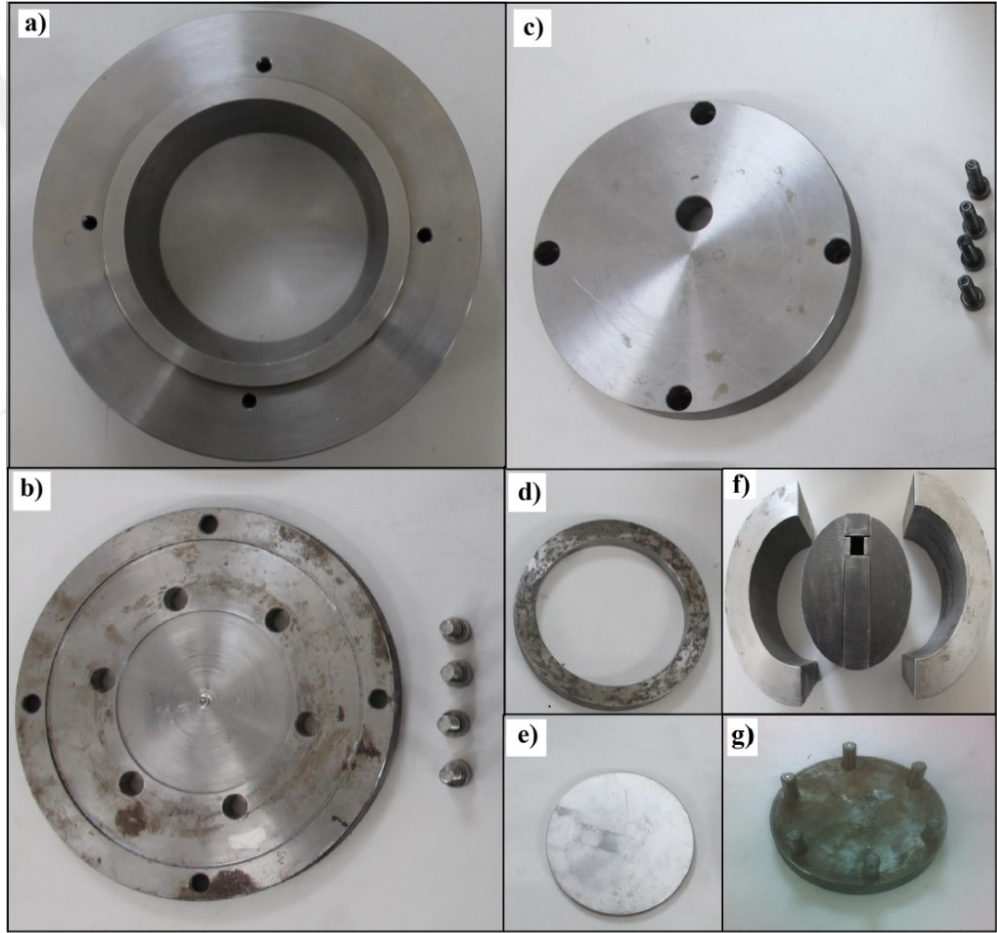
**Şekil 6.2 :** EKAP kalıp çekirdeği: a) Üst görünüşü, b) Parçaların yan görünüşü, c) Alt görünüşü

Çekirdek bölümü kimyasal bileşimi Çizelge 6.2’de verilen 1.2344 sıcak iş takım çeliği malzemeden imal edilmiş ve 58 HRC sertlik elde edilecek şekilde menevişlenerek kullanılmıştır. Hafif metallerin enjeksiyon kalıplarında, dövme kalıplarında ve ekstrüzyon kalıplarında yaygın olarak kullanılan sıcak iş takım çeliği oluşturduğumuz kalıp çekirdeği için en ideal malzeme olarak seçilmiştir. Ayrıca sıcak iş takım çelikleri çok yüksek aşınma direncine sahiptirler ve uygulanan yükü plastik şekil değişimine uğramadan karşılarlar.

**Çizelge 6.2 :** 1.2344 Sıcak iş takım çeliği kimyasal bileşimi

C(%)	Si(%)	Cr(%)	Mo(%)	V(%)
0,40	1,00	5,30	1,40	1,00

Çekirdek parçalarını bir arada tutabilmek için şekil 6.3a’da gösterildiği gibi dış taşıyıcı gövde yapılmıştır. Dış taşıyıcı gövdenin iç yüzeyi 5° eğimli olacak şekilde mors koniği şeklinde işlenmiştir. Şekil 6.3b ve şekil 6.3c’de gösterildiği gibi alt ve üst kapaklar kullanılarak çekirdeğin kalıp içerisinde aşağı ve yukarı hareketi engellenmiştir. Alt kapak 4 Adet M8 civatalar ile ve üst kapak 4 Adet M8 civatalar ile dış taşıyıcı gövdeye yükü karşılayacak sabitlenmiştir. Üst kapak kısmında presleme ıstampasının kalıp içerisindeki kanala geçişini sağlamak için dairesel şekilde boşluk oluşturulmuştur. Şekil 6.3d ve şekil 6.3e’de gösterildiği gibi alt ve üst kapaklar ile çekirdek arasında alt bölümde alt sıkıştırma parçası ve üst bölümde üst sıkıştırma parçası kullanılmıştır.



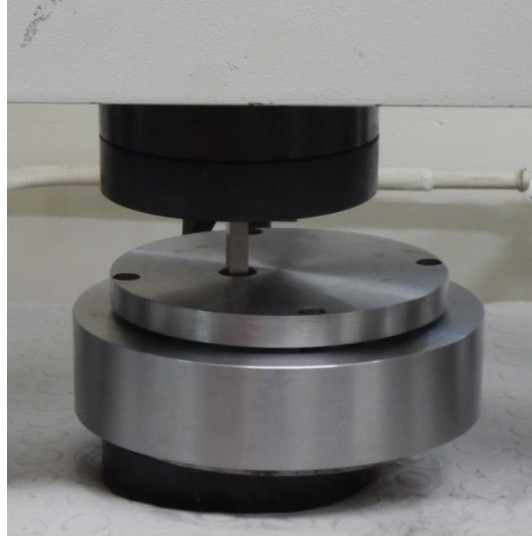
**Şekil 6.3 :** EKAP kalıp parçaları: a) Dış taşıyıcı gövde, b) Alt kapak ve civatalar, c) Üst kapak ve civatalar, d) Üst sıkıştırma parçası, e) Alt sıkıştırma parçası, f) İç bilezik ve çekirdek, g) Çıkarıcı altlık

Çekirdek parçalarının dış kalıp içerisinde sabitlemek ve hareketini engellemek için iç bilezik kullanılmıştır. İç bilezik dış taşıyıcı gövde tarafındaki yüzeyi 5° eğimli olan mors koniği şeklinde işlenmiştir ve şekil 6.3f’de gösterildiği gibi 2

eşit parçadan oluşmaktadır. Ayrıca presleme işleminden sonra sıkışan kalıp parçalarının hızlı bir şekilde demontajının yapılabilmesi için 12 mm çapında 6 adet pim ve alt tabladan oluşan şekil 6.3g'de gösterilen çıkarıcı altlık imal edilmiştir. Çıkarıcı altlıkta bulunan pimler deney işleminin tamamlanmasından alt kapaktaki boşlulardan girerek iç bileziğe alttan baskı yaparak sıkışan çekirdek parçalarının kolay sökülmesini sağlamaktadır. Dış taşıyıcı gövde, alt kapak, üst kapak, alt sıkıştırma parçası, üst sıkıştırma parçası, iç bilezik ve çıkarıcı altlık kalıp setleri 1040 imalat çeliği malzemeden üretilmiştir.

### 6.3 EKAP Deneyi

EKAP deneyinin yapılışı sırasında malzemeye ve kalıba herhangi bir ısıl işlem veya sıcaklık artırımı uygulanmamıştır. İşlemler oda sıcaklığında yapılmıştır. Şekil 6.4'de gösterildiği gibi deney esnasında numune kanal açısı ( $\Phi=90^\circ$ ) ve dış kavis açısı ( $\Psi=0^\circ$ ) olan kapalı kalıp kullanılarak 1000 kN kapasiteli UTEST marka UTM-7000 üniversal çekme-basma test cihazında ve 10 mm/dak presleme hızında aşırı plastik deformasyona (APD) tabi tutulmuştur.



Şekil 6.4 : EKAP deneyinin yapılışı

İşlem rota A kullanarak gerçekleştirilmiştir. Presleme hız ve yük kontrollü olup presleme ıstampası olarak şekil 6.5'de gösterilen  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  kesitli 64 HRC seviyesinde sertleştirilmiş HSS torna kalem kullanılmıştır.



**Şekil 6.5 : Presleme ıstampası**

Uygulama esnasında sürtünmeyi azaltmak amacıyla numune ve kalıp kanallarına sürülmek üzere  $\text{MoS}_2$  yağlayıcı kullanılmıştır. Şekil 6.6 ve Şekil 6.7'da gösterildiği gibi işlem esnasında karşılaşılan problemleri ortadan kaldırıldıktan sonra başarılı şekilde 2 geçiş sağlanmıştır. Çekirdek kısmında ve kalıbın diğer parçalarında çatlak, kırılma ve deformasyon meydana gelmemiştir. Kanal içerisinde malzeme akışı sağlanmış ve kalıp istenen biçimde çalışmıştır.



**Şekil 6.6 : EKAP 1 geçiş sonrası gösterim**



**Şekil 6.7 : EKAP 2 geçiş sonrası gösterim**

Bu çalışmada, bir EKAP test düzeneği başarılı bir şekilde kurulmuş ve Alüminyum 6063 malzeme kullanılarak işler hale getirilmiştir. Alüminyum 6063 alaşım kanal içerisinde presleme ıstampasının uyguladığı kuvvet ile ilerleyerek malzeme kayma düzleminde deformasyona uğratılmıştır.

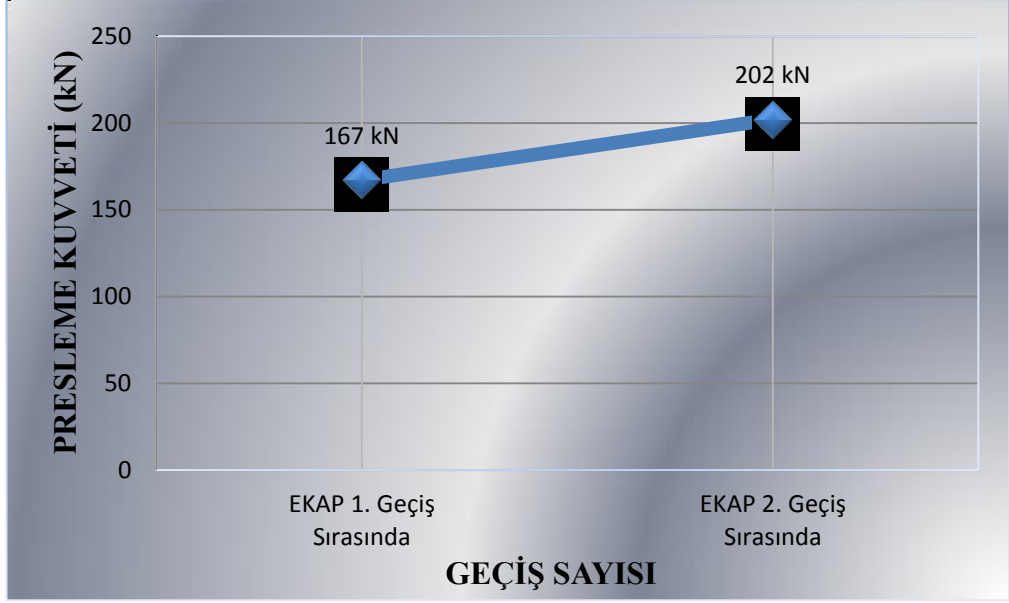
#### 6.4 EKAP Presleme Kuvveti

Numunelere çalışma sırasında Şekil 6.8’de gösterildi gibi İstanbul Aydın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarında bulunan UTEST marka UTM-7000 üniversal çekme-basma test cihazı ile pres kuvveti uygulanmıştır.



**Şekil 6.8 :** Deneysel çalışmada kullanılan üniversal test cihazı

EKAP işlemi sırasında numuneye kalıp kanalarında aşırı plastik deformasyon işlemi uygulanabilmesi için yeterli miktarda presleme kuvveti gerekmektedir. Şekil 6.9’da gösterildiği gibi geçiş sayısındaki artış ile birlikte numuneye uygulanan maksimum kuvvet miktarında da artış meydana gelmiştir.



Şekil 6.9 : EKAP geçişi sırasında uygulanan maksimum kuvvet miktarı

### 6.5 Sertlik Ölçümü

İstanbul Aydın Üniversitesi Teknoloji merkezinde bulunan Şekil 6.10'da gösterilen EMCO-TEST DJ10 sertlik ölçüm cihazı kullanılarak numunelerin derinlik esaslı Brinell sertlik ölçümleri yapılmıştır.



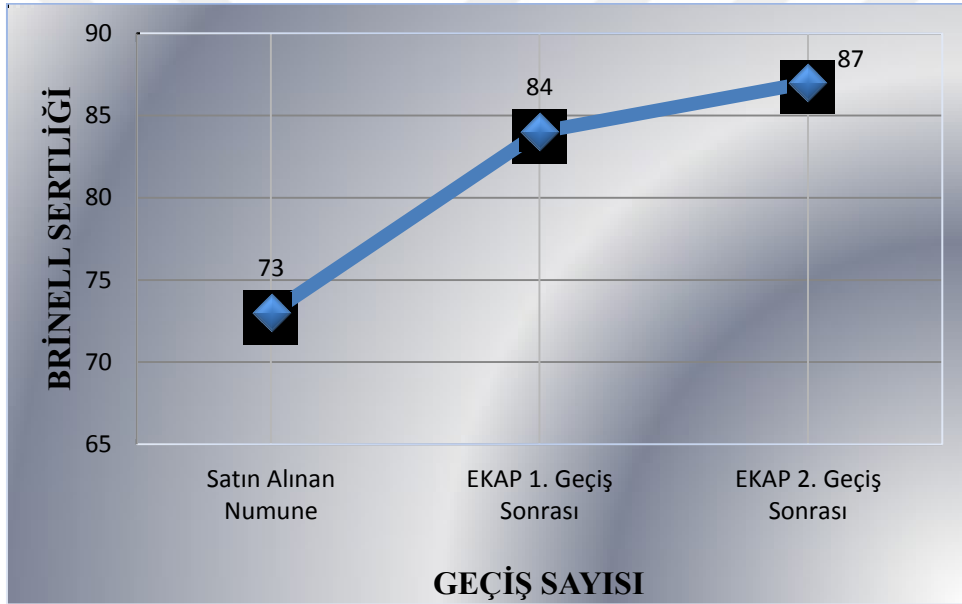
Şekil 6.10 : EMCO-TEST DJ10 sertlik ölçüm cihazı

Sertlik deneyi sırasında numunelere 2,5 mm bilya ile 31,25 kgf test yükü uygulanmıştır. Numuneler üzerinde eşit aralıklar ile 7 farklı noktada ölçüm yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarının ortalaması alınarak sertlik değerleri

belirlenmiştir ve çizelge 6.3’de verilmiştir. Sertlik değerlerinin değişimi Şekil 6.11’de grafiksel olarak gösterilmiştir.

**Çizelge 6.3** : 6063 Alüminyum alaşımı için geçiş sayısına bağlı olarak sertlik değişimi

Geçiş Sayısı	Satın Alınan Numune	EKAP 1. Geçiş Sonrası	EKAP 2. Geçiş Sonrası
Brinell sertliği (Derinlik Esaslı)	73	84	87



**Şekil 6.11** : EKAP geçiş sayısına bağlı sertlik grafiği

## 6.6 Sonuçlar ve Yorum

1. Yapılan deneysel çalışmada kalıplarda karşılaşılan problemlerin giderilmesi için geliştirilen çok parçalı bir EKAP kalıbı kullanılarak 6063 alüminyum alaşımına üstün mekanik özellikler kazandırmak ve daha geniş alanlarda kullanılmasını sağlamak amaçlanmıştır.

2. Yeni ve farklı kalıp tasarımı kullanılması, kalıbın imalatı sırasında doğru malzemelerin ve yöntemlerin kullanılması, çekirdeğin ve HSS torna kaleminin imalatı sırasında yeterli ısıl işlem uygulanması, yeterli civata sayısı, civata



büyüklikleri ve uygun yağlayıcının kullanımı ile birlikte 6063 Al alaşımına başarılı bir şekilde EKAP işlemi uygulanmıştır.

3. İşlem sonrasında uygulanan yüksek miktarda yüke bağlı olarak kalıbın deformasyon bölgesindeki merkez (çekirdek) kısmında özellikle 90° kanal açısının bulunduğu iç köşe bölümünde ve diğer parçalarda çatlak, kırılma ve deformasyon meydana gelmemiştir. Kanal bölümünde malzeme düzgün biçimde şekillendirmiştir. Çekirdek, dış taşıyıcı gövde, alt kapak, üst kapak, alt sıkıştırma parçası, üst sıkıştırma parçası, iç bilezik ve civatalar uygulanan yükü düzgün bir şekilde karşılamışlardır. Kalıp sorunsuz bir şekilde çalışmıştır.

4. Kalıp ergonomik kullanıma uygun olarak ark arkaya hızlı bir şekilde üretimin yapılabilmesi için kolay sökülüp takılacak şekilde tasarlanmıştır.

5. Numunenin satın alındığı durumda Brinell sertlik değeri 73 olarak ölçülmüştür. Numuneye uygulanan 1. EKAP işlemi sonrasında Brinell sertlik değeri 84'ye yükselirken, 2. EKAP işlemi sonrasında Brinell sertlik değeri 87'ye yükselmiştir. Uygulanan 1. EKAP işlemi sonrasında malzemenin sertlik değerinde %15 artış meydana gelirken, 2. EKAP işlemi sonrasında malzemenin sertlik değerinde % 3,5 artış meydana gelmiştir. EKAP uygulaması ile birlikte malzemenin sertliği 1. geçiş sonrasında ilk haline göre hızla yükselmekte ve 2. geçiş sonrasında yükselme azalmaktadır.

6. 1.EKAP işlemi sırasında 167 kN maksimum kuvvet uygulanırken 2. EKAP işlemi sırasında 202 kN maksimum kuvvet uygulanmıştır. Preslemeler sırasında uygulanan maksimum yükler numunelerin preslenmesi işleminin sonunda meydana gelmiştir. 2. EKAP işlemi sırasında 1. EKAP işlemi sırasında uygulanan kuvvet miktarından %20 daha fazla kuvvet uygulamıştır.

## 6.7 Öneriler

1. EKAP işlemi uygulanmış numunelere yorulma, çentik darbe, çekme, aşınma deneyleri uygulanarak malzemenin diğer mekanik özellikleri tespit edilebilir.

2. Daha uzun ve büyük kesit alanına sahip malzemeler için kalıp tasarlanarak malzemenin mekanik özelliklerine etkisi incelenebilir.

3. Deneyin yapılışı sırasında karşı basınç uygulanarak malzemenin mekanik özellikleri incelenebilir.
4. Farklı rotalar kullanılarak yapılan EKAP işlemleri ile mikro yapı üzerinde optik mikroskop, TEM (Geçirimli elektron mikroskobu), SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) incelemeleri yapılabilir.
5. Farklı geçiş sayısında EKAP uygulanmış numuneler için XRD (X ışınları difraksiyonu) incelemesi yapılabilir.
6. Yüksek sıcaklıklarda ve farklı kalıp açılarında EKAP işlemi yapılarak mikro yapı incelemesi yapılabilir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Gleiter, H.** (2001). Nanostructured materials: Basic concepts and microstructure, *Acta Materials*, pp. 48-29.
- [2] **Nakashima, K., Horita, Z., Nemoto, M., Langdon, T.G.** (2000). Development of a Multi-Pass Facility for Equal-Channel Angular Pressing to High Total Strains, *Materials Science and Engineering: A*, **281**, 82-87.
- [3] **Segal, V. M.** (1995). Material Processing by simple shear, *Mater. Sci. Eng., A* 197, 157-164.
- [4] **Azushima, A., Kopp, R., Korhonen, A., Yang, D.Y., Micari, F., Lahoti, G.D., Groche, P., Yanagimoto, J., Tsuji, N., Rosochowski, A., Yanagida, A.** (2008). Severe plastic deformation (SPD) processes for metals, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57, 716–735.
- [5] **Konuk, O., Akata, H.E.** (2013). A Study On The Application Of The Ecap To Surface Plating. *International Journal Of Electronics, Mechanical And Mechatronics Engineering (IJEMME)*, 3(4), 625-630.
- [6] **Valiev, R.Z., Islamgaliev, R.K., Alexandrov, I.V.** (2000). Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Prog. Mater. Sci.*, 45:103-189.
- [7] **Segal, V. M.** (2004). Engineering and commercialization of equal channel angular extrusion (ECAE), *Materials Science and Engineering, A* 386, 269–276
- [8] **Beyerlein, I. J., Lebensohn, R. A., Tome, C. N.** (2003). Modeling texture and microstructural evolution in the equal channel angular extrusion process, *Materials Science and Engineering*, 345 (1-2):122-138.
- [9] **Sanusi, K. O., Makinde, O. D., Oliver, G. J.** (2012). Equal channel angular pressing technique for the formation of ultra-fine grained structures, *South African Journal of Science*, 108(9/10)
- [10] **Melichera, R.** (2009). Numerical Simulation of Plastic Deformation of Aluminum Workpiece Induced by ECAP Technology, *Applied and Computational Mechanics*, Vol.3, pp. 319-330.
- [11] **Srinivas, B., Srinivasu, C., Mahesh, B., Aqheel, M.** (2013). A Review on Severe Plastic Deformation, *Advanced Materials Manufacturing & Characterization*, Vol 3, Issue 1
- [12] **Zrnik, J., Dobatkin, S. V., Mamuzic, I.** (2008). Processing of metals by severe plastic deformation-Structure and mechanical properties respond. *Metallurgia*, 47(3): 211-216.
- [13] **Ghazani, M. S., Vajd, A.** (2014). Finite Element Analysis of the Groove Pressing of Aluminum Alloy. *Modeling and Numerical Simulation of Material Science*, 4, 32-36
- [14] **Valiev, R. Z., Langdon, T. G.** (2006). Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, *Progress in Materials Science*, 51, 881–981

- [15] **Akata, H. E.** (2012). Application of Separated Die Design to Production of Ecap Dies, *Advanced Materials Research*, Vol. 445, pp.120-124.
- [16] **Thiyagarajan, R., Gopinath, A.** (2014). Enhancement of Mechanical Properties of AA 6351 Using Equal Channel Angular Extrusion (ECAE), *Materials Science and Metallurgy Engineering*, vol. 2, no. 2: 26-30.
- [17] **Mathieu, J. P., Suwas, S., Eberhardt, A., Toth, L. S., Moll, P.** (2006). A new design for equal channel angular extrusion, *Journal of Materials Processing Technology*, 173 (1), page 29-33.
- [18] **Sahin, M., Balasubramanian, N., Misirli, C., Akata, H. E., Can, Y., Ozel, K.** (2012). On properties at interfaces of friction welded near-nanostructured Al 5083 alloys, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume: 61, Issue: 9-12, Pages: 935-943
- [19] **Akata, H. E., Kabasakal, S. S., Kovachev, T. M., Kostov E. S.** (2012). A Study On The Application Of Severe Plastic Deformation To Aluminum Alloys, *Journal of the Technical University of Gabrovo*, Vol. 43, (7-9)
- [20] **Altan, B. S., Purcek, G., Miskioglu I.** (2005). An upper-bound analysis for equal-channel angular extrusion, *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 137–146
- [21] **Furuno, K., Akamatsu, H., Oh-ishi, K., Furukawa, M., Horita, Z., Langdon, T. G.** (2004). Microstructural Development In Equal-Channel Angular Pressing Using A 60° Die, *Acta Materialia*, 52, 2497–2507
- [22] **Bergwerf, R.** (2007). Equal-Channel Angular Pressing Of High-Carbon Steel, Master Thesis, Delft University Of Technology Department Of Materials Science And Engineering, Delft
- [23] **Balasundar, I., Rao, M. S., Raghu, T.** (2009). Equal channel angular pressing die to extrude a variety of materials, *Materials and Design*, 30, 1050-1059
- [24] **Shi, Q.** (2015). Recycling of Titanium Alloys from Machining Chips using Equal Channel Angular Pressing, Doctoral Thesis, Loughborough University Institutional Repository, Leicestershire
- [25] **Veeranjaneyulu, K., Siddhartha, C.** (2016). Computational Analysis of Equal Channel Angular Pressing for Aluminum Alloys, *International Journal & Magazine of Engineering, Technology, Management and Research*, ISSN: 2348-4845, Vol. 3, No: 8.
- [26] **Berbon, P. B., Furukawa, M., Horita, Z. Nemoto M., Langdon, T .G.** (1999). Influence of Pressing Speed on Microstructural Development in Equal-Channel Angular Pressing, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Volume 30A, 1989-1997.
- [27] **Yamashita, A., Horita, Z., Langdon, T. G.** (2001). Improving the Mechanical Properties of Magnesium and a Magnesium Alloy through Severe Plastic Deformation, *Materials Science and Engineering A*, 300, 142–147
- [28] **Wang, Y. Y., Sun, P. L., Kao, P. W., Chang, C. P.** (2004). Effect of Deformation Temperature on the Microstructure Developed in

- Commercial Purity Aluminum Processed by ECAP, *Scripta Materialia*, 50, 613-617.
- [29] **Colombo, G.** (2010). The Effect of Equal Channel Angular Extrusion (ECAE) and Boron Additions on the Mechanical Properties of a Biomedical Ti-Nb-Zr-Ta (TNZT) Alloy, All Theses and Dissertations (ETDs), 73.
- [30] **Shin, D. H., Pak, J. J., Kim, Y. K., Park, K. Y. ve Kim Y. S.** (2002). Effect of Pressing Temperature on Microstructure and Tensile Behavior of Low Carbon Steels Processed by Equal Channel Angular Pressing, *Materials Science and Engineering A*, 325, 31–37
- [31] **Nishida, Y., Ando, T., Nagase, M., Lim, S. W., Shigematsu, I., Watazu, A.** (2002). Billet temperature rise during equal-channel angular pressing, *Scripta Materialia*, 46, 211-216.
- [32] **Werenskiold, J. C.** (2004). Equal Channel Angular Pressing (ECAP) of AA6082: Mechanical Properties, Texture and Microstructural Development, Doctoral Theses, Norwegian University, Trondheim.
- [33] **Musa, M. Š., Schauerl, Z.** (2013). ECAP – New consolidation method for production of aluminium matrix composites with ceramic reinforcement, *Processing and Application of Ceramics*, 7 [2], 63–68
- [34] **Komura, S., Furukawa, M., Horita, Z., Nemoto, M., Langdon, T. G.** (2001). Optimizing the Procedure of Equal-Channel Angular Pressing for Maximum Superplasticity, *Mater. Sci. Eng.*, Vol A297, p 111-118
- [35] **Furukawa, M., Horita, Z., Langdon, T. G., Nemoto, M.** (2001). Review Processing of metals by equal-channel angular pressing, *Journal Of Materials Science* 36, 2835 – 2843
- [36] **Lee, J. C., Lee, S. H., Kim, S. W., Hwang, D. Y., Shin, D. H., Lee, S. W.** (2010). The Thermal Behaviour of Aluminium 5083 Alloys Deformed By Equal Channnel Angular Pressing, *Thermochimica Acta*, 499: 100-105.
- [37] **Reihanian, M., Ebrahimi, R., Tsuji, N., Moshksar, M. M.** (2008). Analysis of The Mechanical Properties And Deformation Behavior of Nanostructured Commercially Pure Al Processed By Equal Channel Angular Pressing (ECAP), *Materials Science and Engineering A*, 473: 189-194.
- [38] **Mogucheva, A., Babich, E., Ovsyannikov, B., Kaibyshev, R.** (2013). Microstructural evolution in a 5024 aluminum alloy processed by ECAP with and without back pressure, *Mat. Sci. Eng., A* 560, 178–192.
- [39] **Stolyarov V. V., Lapovok R., Brodova I. G., Thomson P. F.** (2003). Ultrafine-grained Al 5wt.%Fe alloy processed by ECAP with backpressure, *Materials Science and Engineering*, A357, 159-167
- [40] **Lapovok, R.Y.** (2005). The Role of Back-Pressure in Equal Channel Angular Extrusion, *Journal of Materials Science*, 40, 341-346.
- [41] **Chaudhury, P. K., Cherukuri, B., Srinivasan, R.** (2005). Scaling up of Equal-Channel Angular Pressing and Its Effect on Mechanical Properties, Microstructure, and Hot Workability of AA 6061, *Materials Science and Engineering A*, 410-411, 316-318.

- [42] **Saravanan, M., Pillai, R. M., Pai, B. C., Brahmakumar, M., Ravi, K. R.** (2006). Equal channel angular pressing of pure aluminium—an analysis, *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 29, No. 7, pp. 679–684.
- [43] **Valiev, R.Z. and Langdon, T.G.** (2006). Developments in the use of ECAP processing for grain refinement, *Reviews on Advanced Materials Science*, 13, 15-26.
- [44] **Wessel, J. K.** (2004). Aluminum and Aluminum Alloys. *Handbook of Advanced Materials: Enabling New Designs*, John Wiley & Sons, Inc. pp 321-464.
- [45] **Kaufman, J. G.** (2000). *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*, ASM International, Materials Park, OH.
- [46] **Davis, J.R.** (2001). *Aluminum and Aluminum Alloys. Alloying: Understanding the Basics* (ASM International). p351-416.



## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad-Soyad** : Şehmuz DEVELİOĞLU  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 22.02.1984, Develi /KAYSERİ  
**E-posta** : sdevelioglu@gmail.com

## **ÖĞRENİM DURUMU:**

**Lisans** : 2007, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü

## **MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:**

Isıtma, soğutma, havalandırma ve mekanik projeler konularında mesleki tecrübeleri bulunmaktadır.

