

T.C.  
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



EŞİT KANALLI AÇISAL PRESLEME KALIPLARININ GELİŞTİRİLMESİ  
VE ALÜMİNYUM MALZEMEDE UYGULANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer Faruk KAHRİMAN  
(Y1313.050017)

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı  
Makine Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. H. 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 **Y1413.080028** numaralı öğrencisi **Ömer Faruk KAHRİMAN**'ın “**EŞİT KANALLI AÇISAL PRESLEME YÖNTEMİNİN KALIPLARININ GELİŞTİRİLMESİ VE ALÜMİNYUM MALZEMEYE UYGULANMASI**” adlı tez çalışması Enstitümüz Yönetim Kurulunun 16.05.2017 tarih ve 2017/11 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından *oy birliği* 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

.....*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 KALIPLARININ GELİŞTİRİLMESİ VE ALÜMİNYUM MALZEMEDE UYGULANMASI ” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadar ki 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. (.../.../20..)

**Ömer Faruk KAHRİMAN**





*Anne ve Babama,*







## ÖNSÖZ

Tez çalışmamın başlangıcından sonuna kadar desteğini, samimiyetini ve tecrübelerini benden esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. H.Erol AKATA'ya, tezin başlangıcından itibaren gerek araştırmasında, gerekse teknik desteği ile yanımda olan Yüksek Mühendis Esra Özbek'e ve Şeyhmus Develioğlu'na, kalıbın yapımında emeği geçen Kahraman Makine ve Seyfullah Kahrıman'a, kalıbın preste denemesinde İstanbul Aydın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat bölümü laboratuvar çalışanlarına sabır ve desteğinden dolayı, hayatımın her evresinde bana inanan, güvenen yanımda olan ve her türlü desteğini benden esirgemeyen biricik aileme ve her zaman yanımda olan arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

**Mayıs , 2017**

**Ömer Faruk KAHRİMAN**  
**GENETİK VE BİYOMÜHENDİS**



# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖNSÖZ.....	x
İÇİNDEKİLER.....	xii
KISALTMALAR.....	xiv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xviii
ÖZET.....	xx
ABSTRACT.....	xxii
<b>1 GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Konusu.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	1
1.3 Literatür Araştırması.....	2
<b>2 ULTRA İNCE TANELİ MALZEMELER.....</b>	<b>11</b>
2.1 Eşit Kanal Açısal Presleme (EKAP).....	12
2.1.1 EKAP işlemini etkileyen parametreler.....	14
2.1.2 EKAP deformasyon yön ve açıları.....	14
2.1.3 Kanal açıları.....	16
2.1.4 Paso (Geçiş) sayısı.....	18
2.1.5 Sıcaklık.....	20
2.1.6 Presleme hızı.....	21
2.1.7 Uygulama basıncı.....	21
2.1.8 Karşı basınç.....	22
2.1.9 EKAP ile tane boyutunun inceltilmesi.....	22
2.2 EKAP Yönteminde Kalıp Çeşitleri.....	24
2.2.1 Alternatif EKAP yöntemleri.....	24
2.2.2 Döner kalıp.....	24
2.2.3 Kenar ekstrüzyon prosesi.....	25
2.2.4 Çoklu geçiş kalıpları.....	26
2.2.5 Paralel kanallı kalıplar.....	26
2.3 Alüminyum Malzemelerin Kullanım Alanları.....	27
2.3.1 Dövme Alüminyum ve alaşımları.....	29
<b>3 MATERYAL VE METOT.....</b>	<b>31</b>
3.1 Çalışmada Kullanılan Materyal.....	31
3.2 Yeni Dizayn EKAP Kalıbı Tasarımı.....	32
3.2.1 Çekirdek kalıbın kaba işlemi.....	32
3.2.2 Çekirdek kalıbın CNC ile işlenmesi ve taşlanması.....	33
3.2.3 Çekirdek kalıbın tornalama ve ısıl işlemi.....	34
3.2.4 Çekirdek kalıbın silindirik taşlama ve tesviyesi.....	35
3.2.5 Sıkma aparatı imalatı.....	36
3.2.6 Sıkma aparatının bölünmesi ve tesviyesi.....	36
3.2.7 Dış kalıbın imalatı.....	37
3.2.8 Dış kalıbın eğimi ve civata yerleri açılması.....	39

3.2.9	Sıkıştırma halkası imalatı.....	39
3.2.10	Üst kapak imalatı.....	40
3.2.11	Malzeme deliğinin ve ıstampa yolunun yapımı .....	40
3.2.12	Alt kapak imalatı .....	41
3.2.13	Çıkartma aparatı imalatı.....	42
3.2.14	Kalıbın tümüyle entegresi ve tesviyesi .....	42
<b>4</b>	<b>SONUÇ .....</b>	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>TARTIŞMA.....</b>	<b>45</b>
	<b>KAYNAKÇA .....</b>	<b>51</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>55</b>



## KISALTMALAR

<b>EKAP</b>	: Eşit Kanallı Açısal Presleme
<b>CNC</b>	: Computer Numerical Control
<b>HRC</b>	: Rockwell Sertlik Birimi
<b>UİT</b>	: Ultra İnce Taneli
<b>APD</b>	: Aşırı Plastik Deformasyon
<b>SEM</b>	: Scaining Elektrone Mikroskopu
<b>TEM</b>	: Taramalı Elektrone Mikroskopu
<b>UFG</b>	: Ultra Fine Grain
<b>MPa</b>	: Mega Paskal
<b>YMK</b>	: Yüzey Merkezli Kübik
<b>ISO</b>	: Malzemenin içindeki elementlerin karışım yüzdesi
<b>ANSI</b>	: Malzemenin rakamsal sertlik derecesine göre gösterimi
<b>Al</b>	: Alüminyum
<b>Mg</b>	: Magnezyum
<b>Si</b>	: Silisyum
<b>Fe</b>	: Demir
<b>Cu</b>	: Bakır
<b>Mn</b>	: Mangan
<b>Zn</b>	: Çinko
<b>Cr</b>	: Krom
<b>Zi</b>	: Zirkonyum
<b>Cm<sup>3</sup></b>	: Santimetreküp
<b>Pb</b>	: Kurşun
<b>Gr</b>	: Gram
<b>Mol</b>	: Molekül
<b>Mm</b>	: Milimetre
<b>Nm</b>	: Nanometre
<b>µm</b>	: Mikrometre
<b>Φ</b>	: Malzeme yolunun İç Açısı
<b>Ψ</b>	: Malzeme yolunun dış Açısı
<b>σ</b>	: Malzemenin akma gerilmesi
<b>σ<sub>0</sub> ve k</b>	: Malzeme parametresi
<b>d</b>	: Tane çapı
<b>ε<sub>N</sub></b>	: EKAP işleminde malzemede tekrarlı preslemeler ile meydana gelen toplam birim şekil değişimi
<b>P</b>	: Çalışma basıncı
<b>Y</b>	: Malzemenin akma gerilimi
<b>Δε<sub>i</sub></b>	: EKAP işlemi sırasında bir geçiş boyunca verilen birim şekil değişimi



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Çizelge 2.1:</b> EKAP İşlemlerinde ki Rotalama Sıralaması .....	15
<b>Çizelge 2.2:</b> Saf Alüminyumun Özellikleri .....	28
<b>Çizelge 2.3:</b> Dövme Alüminyum ve Alaşımların ANSI 35.1 Standardına Göre Ana Grupları .....	29
<b>Çizelge 2.4:</b> ANSI Standartlarında Belirtilen Bazı Alüminyum Alaşımlarının ISO Karşıtları .....	30
<b>Çizelge 3.1:</b> 6063 Alüminyum Malzemenin Kimyasal Özellikleri .....	31
<b>Çizelge 3.2:</b> 6063 Alüminyum Malzemenin Fiziksel Özellikleri .....	31





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1: EKAP Kalıbı ((1): Zimba, (2):EKAP Kalıp Çekirdeği, (3):Kalıp Yatağı, (4): Altlık Blok) .....	3
Şekil 1.2: İki Parçalı EKAP Kalıbı .....	4
Şekil 1.3: Deney Düzeneği .....	5
Şekil 1.4: EKAP Kalıbı Fırın İçine Yerleştirilirken .....	6
Şekil 1.5: (a) Kalıbın İki Ayrı Parçası ve (b) 120°'lik Malzeme Yolu .....	7
Şekil 1.6: EKAP Kalıbının Resmi ve Malzeme Yolu .....	8
Şekil 1.7: Aşırı Plastik Deformasyon Kalıbı Fotoğrafı (Açık durum) .....	8
Şekil 1.8: EKAP Kalıbının Parçaları .....	9
Şekil 2.1: EKAP Yönteminin Şematik Çalışma Şekli .....	12
Şekil 2.2: EKAP İşleminde Malzemede Meydana Gelen Kaymanın Şematik Gösterimi .....	13
Şekil 2.3: EKAP İşlemi Sırasında Kullanılan Rotalar ve Pas Sayılarına Göre Dönme Açılırları .....	15
Şekil 2.4: EKAP İşleminde Kübik Malzemenin Rotalara Göre Şekil Değişimi .....	16
Şekil 2.5: EKAP İşleminde Kanal Açılarını Gösteren Bir Kalıbın Şematik Görünümü .....	17
Şekil 2.6: $\Phi$ ve $\psi$ Açılırlarına Bağlı Olarak Eş Değer Şekil Değişimi .....	18
Şekil 2.7: Saf Alüminyumun Optik Mikroskop Görüntüleri ((a) Preslenmemiş, (b) 1 Geçiş Sonrası, (c) 2 Geçiş Sonrası, (d) 3 Geçiş Sonrası, (e) 4 Geçiş Sonrası).....	19
Şekil 2.8: Atomik Güç Mikroskop Görüntüleri .....	19
Şekil 2.9: Yüksek Sıcaklıklarda Yapılan EKAP İşleminin Şematik Gösterimi .....	20
Şekil 2.10: Karşı Basıncılı EKAP Uygulamaları .....	22
Şekil 2.11: EKAP'ta Kaymanın Oluşumu .....	23
Şekil 2.12: EKAP Kalıptan Birinci Pasodan Sonra Malzemenin Görünümü .....	23
Şekil 2.13: 1 Pas Yapılmış Al 1050 Alaşımında Dislokasyon Duvarları .....	24
Şekil 2.14: Döner EKAP Kalıbı .....	25
Şekil 2.15: Kenar Ekstrüzyon Kalıbı .....	25
Şekil 2.16: Çoklu Geçiş Kalıbı .....	26
Şekil 2.17: Paralel Kanallı EKAP Kalıbı .....	27
Şekil 3.1: Kalıbın Teknik Çizimi .....	32
Şekil 3.2: Çekirdek Kalıbın Malzemeleri Ve Frezeleme İşlemi .....	33
Şekil 3.3: (a) Sığ Kalıbın Teknik Resmi, (b) Derin Kalıbın Teknik Resmi .....	33
Şekil 3.4: Çekirdek Kalıbın Taşlama İşlemi .....	34
Şekil 3.5: Çekirdek Kalıbın CNC Torna İşleminde Sonraki Hali.....	35
Şekil 3.6: Isıl İşlem Fırınından Çıkan Malzemeler .....	35
Şekil 3.7: Silindirik Taşlamadan Sonra ki Son Hali .....	36
Şekil 3.8: Sıkma Aparatının Torna Sonrası Görünümü .....	36
Şekil 3.9: Sıkma Aparatının Tornada İşlendikten Sonraki Hali .....	37
Şekil 3.10: Sıkma Aparatının Son Hali.....	37

<b>Şekil 3.11:</b> Dış Kalıbın CNC Tornalama İşleminden Sonraki Hali.....	38
<b>Şekil 3.12:</b> Çekirdek Kalıp Sıkma Aparatı ve Dış Kalıbın Birleşmiş Hali.....	38
<b>Şekil 3.13:</b> İmal Edilmiş Sıkıştırma Halkası .....	39
<b>Şekil 3.14:</b> Üst Kapağın Dış Kalıba Bağlanması.....	40
<b>Şekil 3.15:</b> İstampanın Kalıba Girme Durumu .....	41
<b>Şekil 3.16:</b> Alt kapak ve Cıvataları.....	41
<b>Şekil 3.17:</b> Çıkartma Piminin Kalıba Girişi.....	42
<b>Şekil 3.18:</b> Kalıbın Tüm İşlemlerden Sonra Bitmiş Hali.....	42
<b>Şekil 4.1:</b> Plaster Malzeme İle Kalıpların Kontrolü .....	43
<b>Şekil 4.2:</b> (a)Kalıbın Basımı, (b)Kalıbın Çıkartma Aparatı ile Çıkarılması .....	43
<b>Şekil 4.3:</b> (a)Basılan İlk Parçalar (b) Çıkan İlk Paso Parçası .....	44



## EŞİT KANALLI AÇISAL PRESLEME (EKAP) KALIPLARININ GELİŞTİRİLMESİ VE ALÜMİNYUM MALZEMEDE UYGULANMASI

### ÖZET

1970'den beri uçak, otomotiv, medikal ve pek çok sektörde alüminyum kullanımı artmıştır, böylece hayatımızda daha fazla yer almıştır. Alüminyumun kullanım sıklığının artması uzmanları bu konuda daha fazla çalışma yapmaya yöneltmiştir. Bu çalışmalarda Alüminyumun atomik yapısını küçülterek dayanıklılığını arttırmak amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Eşit Kanallı Açısal Presleme (EKAP) yöntemine önem verilmiştir.

Bu çalışmada ise ilk olarak bu zamana kadar yapılan Eşit Kanal Açısal Presleme (EKAP) yöntemi ve kalıpları incelenmiş, günümüze kadar gelen EKAP prosesinde ki sorunlar ve kalıbın problemleri analiz edilmiştir. Çalışmamızda kullanılan kalıp soğuk basmada oluşan problemler, zaman kaybı ve diğer aksaklıkların giderilmesi için tasarlanmıştır.

CNC torna, freze, düz ve silindirik metal taşlamalar ve ısıl işlemlerle birlikte kalıbın imalatı günümüze kadar yapılanların aksine farklı bir dizayn barındırmaktadır. İç içe geçen kalıp dizaynı, çekirdek ve dış kalıbın belirli bir eğimle birbirine kenetlenerek kalıbın 360° sıkması için yapılmıştır. Aynı zamanda çekirdek kalıbın 4 parçası birbirini tamamlayarak kalıbın 90° bir malzeme yolu oluşturmasını sağlamıştır. Kalıbın dayanımının artması için çekirdek kalıbın malzemesinde 1.2344 imalat çeliği kullanılmış ve ısıl işlem yoluyla 54 HRC sertlik derecesine kadar sertleştirilmiştir. Kalıpta kullanılan dış kalıp 5° ters açı ile çekirdek yüzeyindeki yardımcı parçaları sıkarak presleme esnasındaki kalıbın tek parça gibi olmasını sağlamıştır. Kalıbın üst ve alt kapakları çekirdek kalıbın sıkılması ve çıkarılması esnasında oluşacak herhangi bir olumsuzluğa karşı yapılmıştır. Çıkarma pimleri ve aparatları yoğun bir kuvvet altında sıkışan kalıbın yine preslemenin uyguladığı kuvvetle serbest kalmasına yardım etmektedir.

Çalışmamızda yeni bir EKAP kalıbı imal etmek amaçlandığı için, tasarım öncelikle oyun hamuru ile denenmiştir. Bu aşamada herhangi bir problem ile karşılaşılma ve çalışmanın devamında 6063 Alüminyum kullanılmıştır. Alüminyum ile ilk basımda dakikada 2 mm ilerleme test edilmiş ve olumsuz bir sonuç ortaya çıkmamıştır. Bir sonraki adımda dakikada 10 mm ilerleme ile seri şekilde basıma devam edilmiştir. Sonuç olarak; 6063 alüminyum malzemedeki EKAP yönteminden elde edilen numunelerin, artan geçiş sayısına bağlı olarak aşınma direnci, yüzey sertliği ve malzemenin mukavemetinin arttığı gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** EKAP, aşırı plastik deformasyon, alüminyum, kalıp.



## DEVELOPMENT OF EQUALLY CHANNEL ANGULAR PRESSING (ECAP) MOLDS AND APPLY TO ALUMINUM MATERIALS

### ABSTRACT

The use of aluminum has increased in aircraft, automotive, medical and many other sectors since 1970. With the increase in usage of aluminum in our life, more studies have been conducted on it. These studies intended to increase the durability of aluminum by reducing its atomic structure. Equal Channel Angular Pressing (ECAP) has also been emphasized in order to complete this insufficiency.

In this study, Equal Channel Angular Pressing (ECAP) method and molds made up to this time were investigated. By looking at the problems in the ECAP molds and the problems of the mold, problems caused by cold pressing, designed to eliminate time lost and other troubles.

CNC turning and milling, Contrary to flat and cylindrical metal grindings and heat treatment, the production of the mold is different to the day-to-day construction. The design of the passing mold was made for 360° compression of the mold by interlocking the core and the outer mold with a certain inclination. At the same time, the four pieces of the core mold complement each other, allowing the mold to form a material path of 90°. To increase the resistance of the mold, 2344 manufacturing steel was used as the core mold material and 24-hour heat treatment was applied. The outer mold used in the mold is made to be a single piece of mold during pressing by squeezing the auxiliary parts on the core surface with a reverse angle of 5°. The top and bottom covers of the mold are made to resist any adverse effects that may occur during squeezing and removal of the core mold. The ejection pins and apparatus help to forcefully release the mold which is pressed under a heavy force.

In this study, we tried a new design pattern firstly with silly putty which gave good results. Later it was tried using 6063 Aluminum alloys, with a 2-mm advance per minute. Printing with aluminum proceeded in rapid succession with a progress of 10-mm per minute when the first printing was not troublesome. As a result; In the 6063 aluminum material, the wear resistance values of the samples obtained by the ECAP method increased with each increasing number of transition.

**Keywords:** *ECAP, severe plastic deformation, aluminium, mold*







# 1 GİRİŞ

## 1.1 Çalışmanın Konusu

Eşit Kanallı Açısal Presleme (EKAP) yöntemi malzemelerin atomik yapılarında ve yüzeylerinde deformasyon oluşturarak daha dayanımlı olmasını sağlayan Aşırı Plastik Deformasyon (APD) yönteminden biridir. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda kullanılan EKAP kalıpları birbirine benzeyen ve tek parça kalıplardır. Çalışmamızın konusu, literatüre yeni bir kalıp kazandırmak amacıyla Alüminyum 6063 malzemesi kullanılarak yeni bir EKAP kalıbı tasarlanmasıdır.

## 1.2 Tezin Amacı

Düşük yoğunlukları ve üretim maliyetlerinden dolayı, alüminyum (Al) ve benzeri alaşımlar endüstriyel alanda yoğun olarak kullanılan metal ve alaşımları arasında ilk sırada yer almaktadırlar. Özellikle günümüzde büyük bir gelişme gösteren otomotiv sektörü başta olmak üzere gıda, uzay ve uçak sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Al ve alaşımlarının, bu olumlu özelliklerinin yanı sıra mekanik özelliklerinin demir (Fe) alaşımlarına göre düşük olması en büyük dezavantajlarından biridir. Al ve alaşımlarının bu dezavantajları çökeltme sertleşmesi ve termomekanik işlemlerle giderilebilmektedir. Bu yöntemler ısı işlemlerle (yaşlandırma ve/veya çift yaşlandırma) yapı içerisinde ikincil faz homojen olarak dağıtılarak mukavemeti artırılabilir.

Termomekanik işlemler (plastik deformasyon+yeniden kristalleşme) malzemenin tane boyutunun inceltilecek, dayanımın artırılmasında önemli bir yöntemdir. Bu işlem malzeme içerisindeki tanelerde yüksek miktarda gerinim enerjisi oluşturmakta ve belli bir sıcaklık aralığında yeniden kristalleşmesine sebep olmaktadır. Yapılan literatür incelemelerinde termomekanik işlemlerle Al ve alaşımlarının tane boyutunun 10  $\mu\text{m}$ 'nin altına indirilmesinin oldukça zor olduğu bildirilmektedir [1].

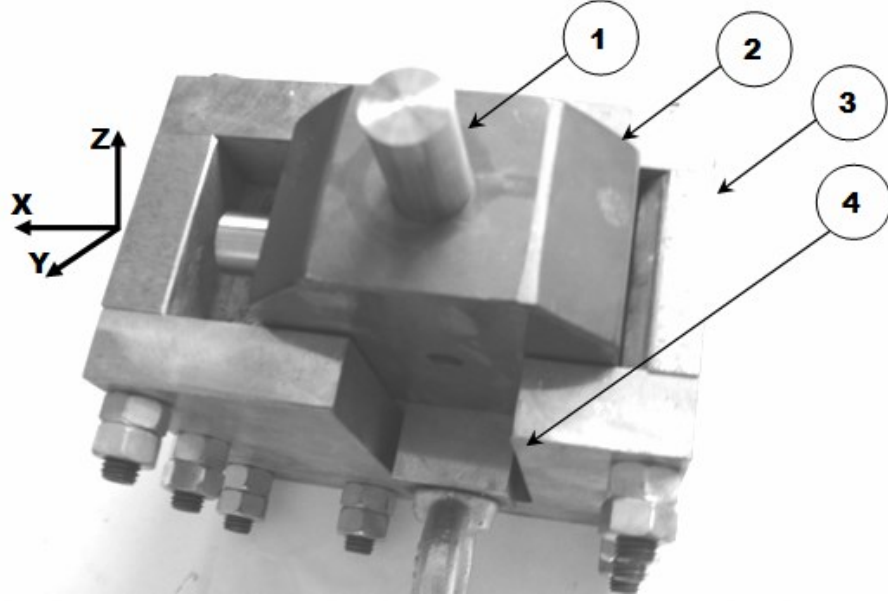
Özellikle 2000’li yılların başında ultra ince taneli yapılar Eşit Kanal Açısız Presleme (EKAP) yöntemi ile gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Bu teknik kullanılarak mikro yapıda ve mikron altı 10-1000 nano yapıda malzeme elde edilmektedir. EKAP işlemi metal ve alaşımların, kayma sistemleri ve kesme düzlemlerinden etkilenir. Ayrıca kalıp geometrisi ve presleme rejimi işlem için en önemli iki parametredir. EKAP işlemi çok adımdan oluşan bir işlemdir ve bu işlem malzemede basit kayma ile aşırı plastik şekil değiştirme oluşturur [1, 2].

2000’li yılların başından bu yana nanoteknoloji ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmakta olup, bu gelişmeler paralelinde daha az malzeme tüketimi ve daha az sayıda işlem basamaklarından (özellikle alüminyum alaşımları) oluşan yöntemler kullanılmaktadır [3,4].

Ultra ince taneli (UIT) malzemelerin üretilmesi için Aşırı Plastik Deformasyon (APD) kullanılması gerekmektedir [5].

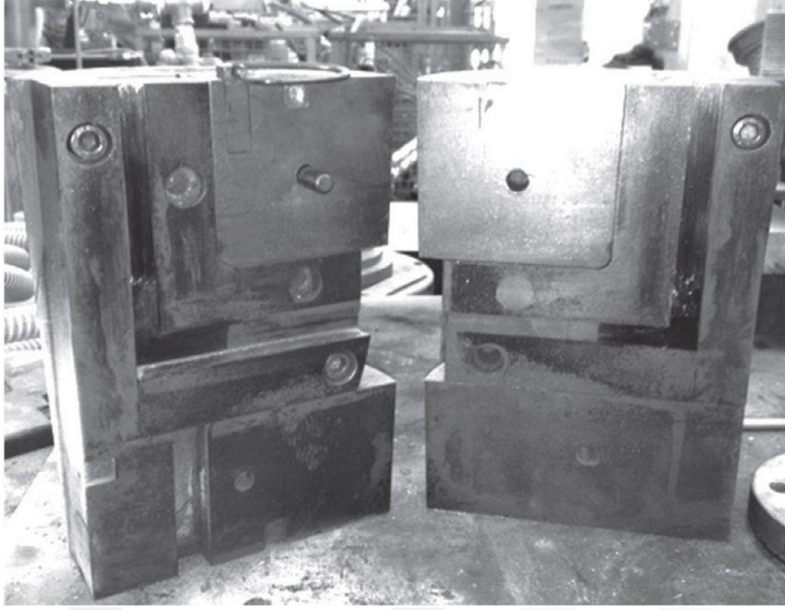
### **1.3 Literatür Araştırması**

Literatürde EKAP kalıbı üzerine yapılan birçok çalışma yer almaktadır. Alper AYTAÇ ve ekibi Gazi Üniversitesi’nde yaptıkları çalışmada alüminyum üzerinde çalışmıştır. EKAP kalıbını fırının içinde çalıştırarak yağlayıcı ısı ve kalıbın presle olan uyumunu incelemiştir. Optimum paso sayısını saptamak amacıyla kalıptaki paso sayısına bağlı olarak gelişen deformasyon şekillerini ve optimum paso sayısında ortaya çıkan etkenleri sınıflandırmışlardır. 8 paso sayısı optimum paso sayısı olarak belirlenmiş olup sertliğin 14 pasoya kadar stabilitesini koruduğu anlaşılmıştır. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) kullanarak işlenmiş malzemenin mikroyapılarını göstermişlerdir. Bunların yanı sıra kalıbın işleyişine bakıldığında kalıp tek parça olduğundan malzemenin basılması güçleşmekte ve yüksek sıcaklıkta çalışıldığında deformasyona uğrama, çarpılma gibi yan etkilerin ortaya çıkmasının kaçınılmaz olduğunu belirtmişlerdir [41]. Çalışmada kullanılan kalıp Şekil 1.1’de gösterilmektedir.



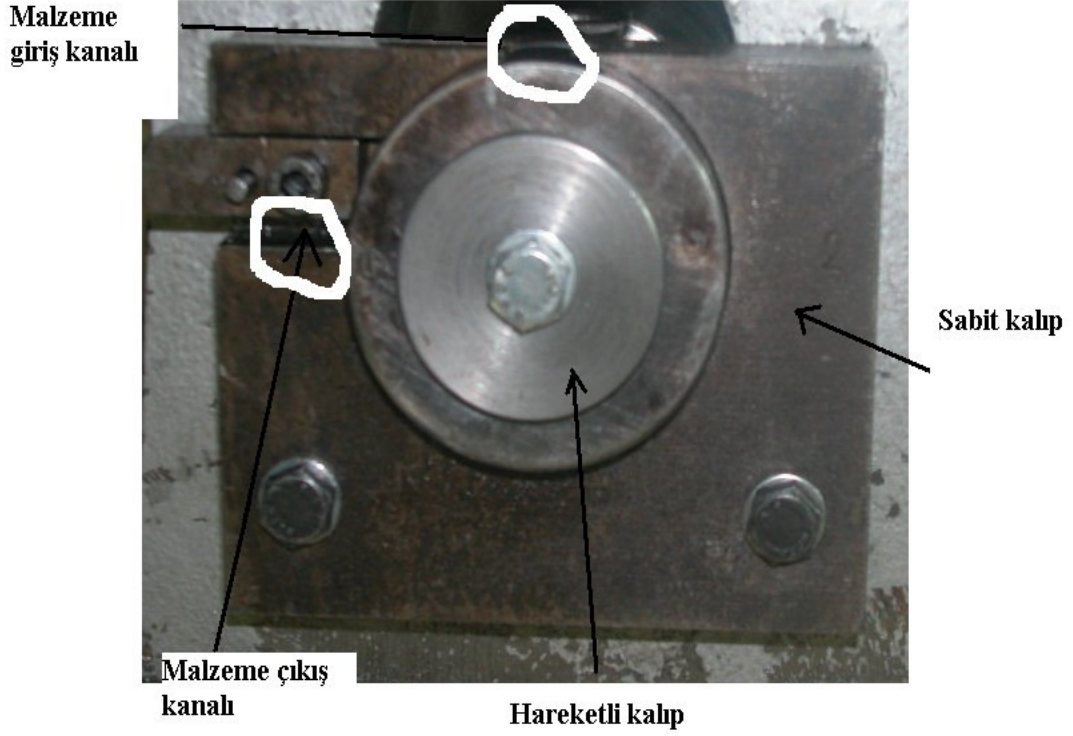
**Şekil 1.1:** EKAP Kalıbı ((1): Zimba, (2):EKAP Kalıp Çekirdeği, (3):Kalıp Yatağı, (4): Altık Blok) [41]

Mateja Šnajdar Musa ve ekibi Zagreb Üniversitesi'nde yaptıkları çalışmada alüminyum malzemelerin sertlik ve dayanımını araştırmak maksadı ile toz alüminyum ve seramik parçacıkları basarak malzeme sertliği ve atomik yapısı üzerinde oluşturduğu etkinin türünü araştırmışlardır. Malzemenin kalıptan çıkarılması sırasında malzeme üzerinde meydana gelebilecek olan deformasyonun minimuma indirilmesini amaçlayarak kalıbı iki parça halinde yapmışlardır. Basım işleminden sonra elde edilen malzemenin diğer EKAP kalıpları kullanılarak imal edilen alüminyum malzemelerden daha etkili ve kullanışlı olduğunu iddia etmişlerdir. Çalışmada kullandıkları kalıbı ele alacak olursak, 90°'lik bir iç açığa ve dış açığa sahip (Şekil 1.2), tek parçalara göre daha avantajlı ama yapısal olarak malzeme yolunda derin deformasyonlara sebep olan bir kalıptır. Kalıpta 15 basım ve sonrasında yüksek derecede bozunmalar olduğu ortaya çıkmıştır [42].



**Şekil 1.2:** İki Parçalı EKAP Kalıbı [42]

Yahya BAYRAK ve ekibi, Yıldız Teknik Üniversitesi'nde yaptıkları bu çalışmada tel alüminyum malzemenin sertliği, dayanımı ve mukavemetinin artırılması için malzeme 90°'lik yola iterek malzemenin kanalda ki sürtünmeye bağlı olarak sertliği üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada tel alüminyum ile çalışıldığından kalıp mekanizması biri sabit diğeri oynar halde olan iki kalıptan oluşmaktadır. Benzerliği her ne kadar deneyimizde ki kalıptan çok farklı olsa da, tel üzerinde ki çalışma, tellerin nano boyutta ki tane yapısının küçülmesi ve sünekliliğinde ki değişimler kalıbın başarılı olduğu kadar teller üzerinde kırılmalıklarını arttırdığını göstermektedir. Bu kalıbın diğerlerine oranla daha hızlı işlem görmesine rağmen sadece küçük çaplı alüminyum malzemelerde başarılı olacağını, büyük malzeme ile çalışıldığında kalıpta ki deformasyonun daha fazla olacağını ve sürtünmenin de etkisi ile kalıbın kullanılmaz hale gelmesinin kaçınılmaz olduğunu belirtmişlerdir [43]. Oluşturdukları deney düzeneği Şekil 1.3'te gösterilmektedir.



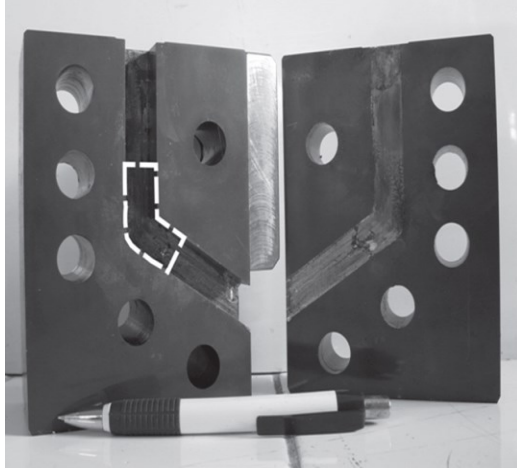
**Şekil 1.3:** Deney Düzenegi [43]

Aydın Koca ve ekibinin Gazi Üniversitesi'nde yaptıkları bu çalışmada alüminyum tozlar üzerinde çalışmış olup alüminyum tozların 27.3 g gibi bir miktarda basılarak sonrasında malzemede oluşan deformasyonu araştırmışlardır. Bu çalışmada çok geçişli EKAP kalıbı kullanılmış olup sonrasında basılan toz alüminyumların paso geçişine bağlı olarak üzerinde ki deformasyon incelenmiştir. Sıcaklık değerleri ve fırının içindeki kalıp basıma uygun olup çalışma 90°'lik bir EKAP kalıbında basılmıştır. Basıldıktan sonra kalıp 90° çevirerek tekrar basıma devam edilmiştir (Şekil 1.4). Böylelikle alüminyum tozlar sığağın ve sürtünmenin de etkisi ile homojen hale getirilmiştir. Kalıp 4 ana parçadan oluşmakta olup oluşan kalıp deformasyonları göz ardı edilmiştir [44].

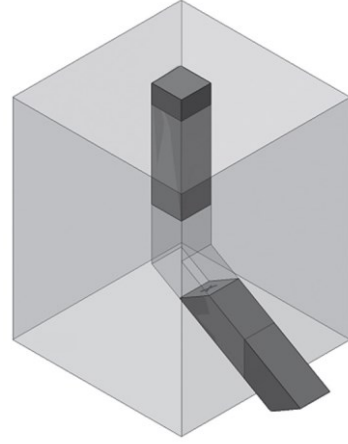


**Şekil 1.4:** EKAP Kalıbı Fırın İçine Yerleştirilirken [44]

Anibal de Andrade Mendes Filho ve arkadaşlarının Federal de São Carlos Üniversitesi'nde dizayn ettikleri bu kalıpta aslında EKAP yönteminin üzerinde ki etkenleri araştırmak için çalışmışlardır. Bu çalışmada yaygın olarak kullanılan bu yöntemin temelde yağ, sıcaklık, kanal açısının eğimi, presin basımda ki hızı, diğer yan etkenlerin neler olduğu ve kalıbın çalışmasında ki etkileri incelenmiştir. Üzerinde çalışılan kalıp iki parçadan oluşmakta olup farklı yağlar ve farklı sıcaklıklar basılmıştır. Kullanılan ıstampanın yuvarlak uçlu olması ve basım işlemi sırasında geriye doğru oluşan çapak sebebiyle ıstampanın kırıldığı görülmüştür. Bu çalışmada aslında EKAP çalışmalarında ki kalıba ve malzemeye dışarıdan etki eden etkenler (sıcaklık, yağ çeşidi, presin ilerleme hızı ve ıstampa ucunun şekli) göz önüne alınarak çalışılmıştır ve çalışmada kanal açısı  $120^\circ$  olarak belirlenmiştir (Şekil 1.5). Buna rağmen kullanılan ıstampa ve yağlardan dolayı kalıbın eğiminden sonra oluşan deformasyon sebebiyle EKAP kalıbında dış etkenlerin (optimum değerler, sıcaklık ve yağlayıcı seçimi) kalıbın ömrünü uzatmakla kalmayıp aynı zamanda çalışmanın doğruluğunu da etkilediğini kanıtlamışlardır [45].



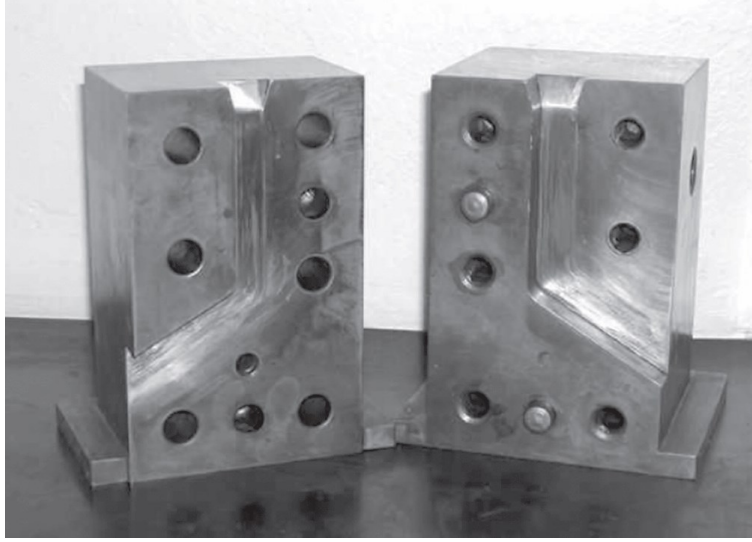
(a)



(b)

**Şekil 1.5:** (a) Kalıbın İki Ayrı Parçası ve (b) 120°'lik Malzeme Yolu [45]

Érika Fernand ve arkadaşları Prados Federal Üniversitesi'nde yaptıkları çalışmada EKAP kalıbının 120° paso yoluyla farklı pim bağlantı yolları (Şekil 1.6) olsa da temelde yine bir önceki çalışmalarına benzer bir araştırma içine girmişlerdir. Bu çalışmalarında kare şeklinde olan ıstampanın kalıbın giriş yerlerinden daha rahat geçmesi için eğim verilmiştir. İç kanal yolunun 120°'lik açıya sahip olmasının yanı sıra 8 mm radusle kanalın iç ve dış taraflarına yapılan eğimlerle malzemenin daha rahat akması sağlanmış olup bir önceki kalıptaki sıkıntılar giderilmeye çalışılmıştır. Sonrasında bu kalıbın verimliliğini ölçmek için SEM ve TEM de çıkan malzemelerin sertliğine ve mukavemetine bakılmış ve hedeflenen sonuçlar elde edilmiştir. Kalıbın içinde ki malzeme yolunda her ne kadar 8 mm radusler yapılarak basım işleminin daha kolay olması beklense de malzeme yolunda özellikle 120°'lik kanalın eğiminde yüksek derecede deformasyon ve aşınma olduğu görülmüştür. Érika Fernand ve arkadaşları bu sonuçtan da anlaşıldığı gibi kalıbın kullanım açısından devamlılığının sağlanması için malzeme yolunun yeterli sertlikte olmadığını açıkça ifade etmişlerdir [46].



**Şekil 1.6:** EKAP Kalıbının Resmi ve Malzeme Yolu [46]

Kaan ÖZEL ve arkadaşları Trakya Üniversitesi'nde ki çalışmalarında tek parçalı kendi içinde 90°'lik bir malzeme yolu oluşturan EKAP üzerinde çalışmışlardır. Bu oluşan yol ıstampanın ve malzemenin ilerlemesine tek yön vermekle birlikte malzeme basım yolu yandan düz bir plaka ile desteklenmiştir. Bu sistem en basit haliyle tek giriş-çıkış olarak tasarlanmış ve dış tarafta ki koruyucu kalıbın da yardımıyla kalıbın deformasyonu engellenmeye çalışılmıştır (Şekil 1.7) [47].



**Şekil 1.7:** Aşırı Plastik Deformasyon Kalıbı Fotoğrafi (Açık durum) [47]

Bu yayım, R. A. Parshikov ve ekibinin Saint-Petersburg State Polytechnic Üniversitesi'nde yaptıkları çalışmada EKAP kalıbının bu zamana kadar olan



teknolojik ilerlemesi ve beraberinde basım işlemi sırasında oluşan sorunların çözümüne odaklı olarak yazdıkları bir makaledir. 120°'lik malzeme yollu olan bu EKAP kalıpta malzemenin akımı üzerine ve eğime bağlı olarak malzeme akışkanlığı ve kırılmaları incelenmiştir. Aynı zamanda geriye doğru oluşan çapaklanmalar ve buna bağlı olarak sertlik seviyeleri de incelenmiştir. Kullanılan kalıpta temelde iki parçalı (Şekil 1.8) kalıpların dezavantajları olduğu ve bu dezavantajların çok parçalı kalıp yapılarak giderilebileceği de belirtilmiştir. Çalışmada ve önerilerinin arasında malzemenin akış yolunun daha kırılğan olmaması için eğimi arttırmanın daha verimli olacağını belirtmektedir [48].



**Şekil 1.8:** EKAP Kalıbının Parçaları [48]



## 2 ULTRA İNCE TANELİ MALZEMELER

Ultra ince taneli (UİT) yapılar kaba taneli yapılar ile karşılaştırıldığında ortalama tane boyutları yaklaşık 1µm veya mikron altı (10-100 nm) olan malzemelerdir. Günümüzde UİT malzemelerin üretilmesi ve karakterizasyonu üzerine çalışmalar yoğun ve kapsamlı bir şekilde devam etmekte olup ilgi giderek yükselmektedir [6].

Bunun nedeni; UİT malzemelerin düşük sıcaklıkta yüksek sertlik ve dayanım sergilerken yüksek sıcaklıkta süperplastik şekil değiştirme davranışı sergileyebilme özelliğinde olmalarıdır. Oda sıcaklığında metal ve alaşımlarında Hall-Petch eşitliğine (Eş. 2.1) göre azalan tane boyutu ile ters orantılı olarak malzemenin akma mukavemeti artar [6, 7].

$$\sigma = \sigma_0 + k/d^{1/2} \quad (2.1)$$

$\sigma$ : malzemenin akma gerilmesi

$\sigma_0$  ve  $k$ : malzeme parametresi

$d$ : tane çapı

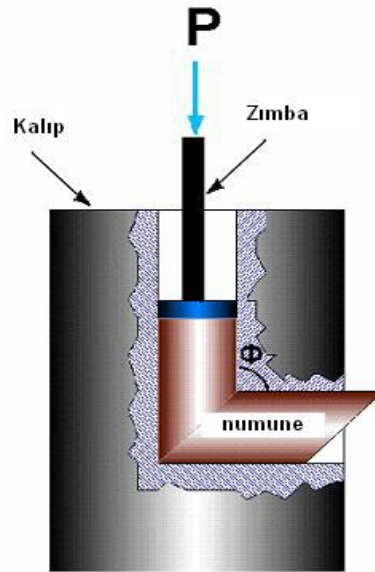
Hall-Petch denkleminden görüldüğü gibi küçük tane çaplı malzeme beraberinde yüksek mukavemeti getirir. Yapılan deneylerde Hall-Petch denkleminin çok küçük boyutlu (1-100 nano mertebede) taneler (Ultra Fine Grain (UFG)) için de geçerli olduğunu göstermiştir.

Hall-Petch eşitliğine göre UİT malzemeler kaba taneli yapılara göre daha yüksek dayanıma sahiptirler. Ancak UİT malzemelerde Hall-Petch eşitliğinin geçerli olmadığı görülmüş ve bunun yerine başka eşitlikler geliştirilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda ise metal veya alaşımlarının ergime derecesine bağlı olarak kayma mekanizması yanı sıra tane sınırları kayma mekanizmasında ki plastik şekil değiştirmeye katkı sağlar. Bu plastik şekil değiştirme mekanizmasının etkili olabilmesi için, yüksek sıcaklıklarda ki UİT malzemelerde tane boyutu 0.01-10 µm arasında olması gerekmektedir. Malzemenin ergime derecesinin yüksek ( $>0.5 T_m$ ) olduğu sıcaklıklarda

difüzyon kontrolü sağlanabildiğinden, tane sınırları kayma mekanizması deformasyon yönünde gerçekleşir [9, 10]. Bu yüzden süperplastik sünekliğin elde edildiği gerilim değerleri tercih edilir. Buna ilaveten malzemenin süperplastik davranışında tane boyutunun karesi ile akma gerilimi arasında bir ters orantı söz konusudur [11, 12]. Buna göre UİT malzemeler yüksek oranda süperplastik potansiyele sahiptir.

## 2.1 Eşit Kanal Açısız Presleme (EKAP)

UİT malzeme üretiminde çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Ticari uygulamalarda bu teknikler kullanılarak yapılan UİT malzeme üretimlerinde, malzeme miktarının ve boyutunun küçük olması en büyük dezavantajdır. Son yıllarda kullanılan EKAP işlemi bu dezavantajları en aza indirmeye çalışmaktadır. Şekil 2.1’ de UİT malzeme üretiminde kullanılan EKAP işlemi şematik olarak verilmiştir [1]. EKAP, malzemede basit kayma mekanizması ile aşırı deformasyon işlemidir [13].



Şekil 2.1: EKAP Yönteminin Şematik Çalışma Şekli [1]

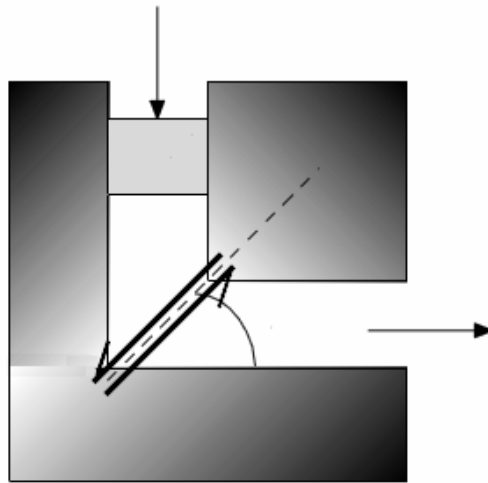
EKAP ile malzemede kırılma olmaksızın aşırı büyük kesme kuvvetlerine ulaşabilmektedir. EKAP’ın diğer özelliklerinden biri de ağır malzemelerde ince tane yapısından dolayı işleme kolaylığı sağlamasıdır [14]. UİT boyutların üretilmesi ile süperplastik özelliği olmayan malzemelerde bile oldukça iyi süperplastik şekillendirme sağlanabilir. EKAP işleminin, daha düşük

sıcaklıklarda dahi, süperplastik süneklik sağladığı literatürde belirtilmektedir [15].

İşlem olarak Şekil 2.1’de görüldüğü gibi bir  $\Phi$  açısında kesişen, kesitleri aynı ve iki kanallı bir kalıp boyunca preslenmesi sonucu, malzemede basit kayma mekanizması ile şiddetli plastik deformasyon elde edilir. Bu işlemin yapılmasında kalıp-ıstamp sistemini kullanılarak numune kalıpta bastırılmaktadır [16].

Malzemenin kesit ve boyutlarında herhangi bir değişme olmayacağı için büyük miktarda birim şekil değişiminin elde edilmesinde birden fazla presleme yapılabilir.

Böylece malzemenin tane boyutu mikron-altı seviyesine indirilebilir [17]. EKAP işleminde malzemede meydana gelen kayma şematik olarak Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



**Şekil 2.2:** EKAP İşleminde Malzemede Meydana Gelen Kaymanın Şematik Gösterimi [18]

EKAP işlemi ile malzeme, Şekil 2.2’de gösterildiği gibi L-şeklinde bir kanalda kalıp boyunca preslenmektedir. Kayma mekanizması ile malzemede, alt taneler oluşur ve çok sayıda presleme ile daha büyük açılar ve sınırlarla ayrılmış yeni taneler elde edilir. EKAP işlemi ile malzemenin mikro yapısında meydana gelen tane incelmelerinden dolayı malzemenin sertliği, akma ve çekme dayanımı etkili bir şekilde artar [18].

EKAP ile üretilen metallerde bu olağandışı mekanik davranışa neden olarak EKAP'ın, malzemenin plastik deformasyon mekanizmasında meydana getirdiği önemli değişiklikler gösterilmektedir. Kaba gerilimsiz taneli metallerde, dislokasyon hareketi ile gerçekleşen kayma ve kaymanın zor olduğu durumda ise ikizleme esas plastik deformasyon mekanizmalarıdır. Ultra-ince ve büyük açılı sınırlara sahip aksel taneler, dislokasyon hareketlerini engelleyerek dayanımı arttırmaları. Bunun yanında daha yüksek sıcaklıklarda, tane sınırı kayması sürünme yayılması gibi diğer deformasyon mekanizmaları da devreye girmektedir. Bu da malzemenin sünekliliğini artırır. İnce taneli malzemelerin olağandışı davranışları, Aşırı Plastik Deformasyon yöntemi (APD) ile üretilmiş çok sayıda büyük açılı tane sınırlarından, dislokasyonlardan ve noktasal kusurlara sahip nano yapılardan kaynaklanmaktadır [19].

### **2.1.1 EKAP işlemini etkileyen parametreler**

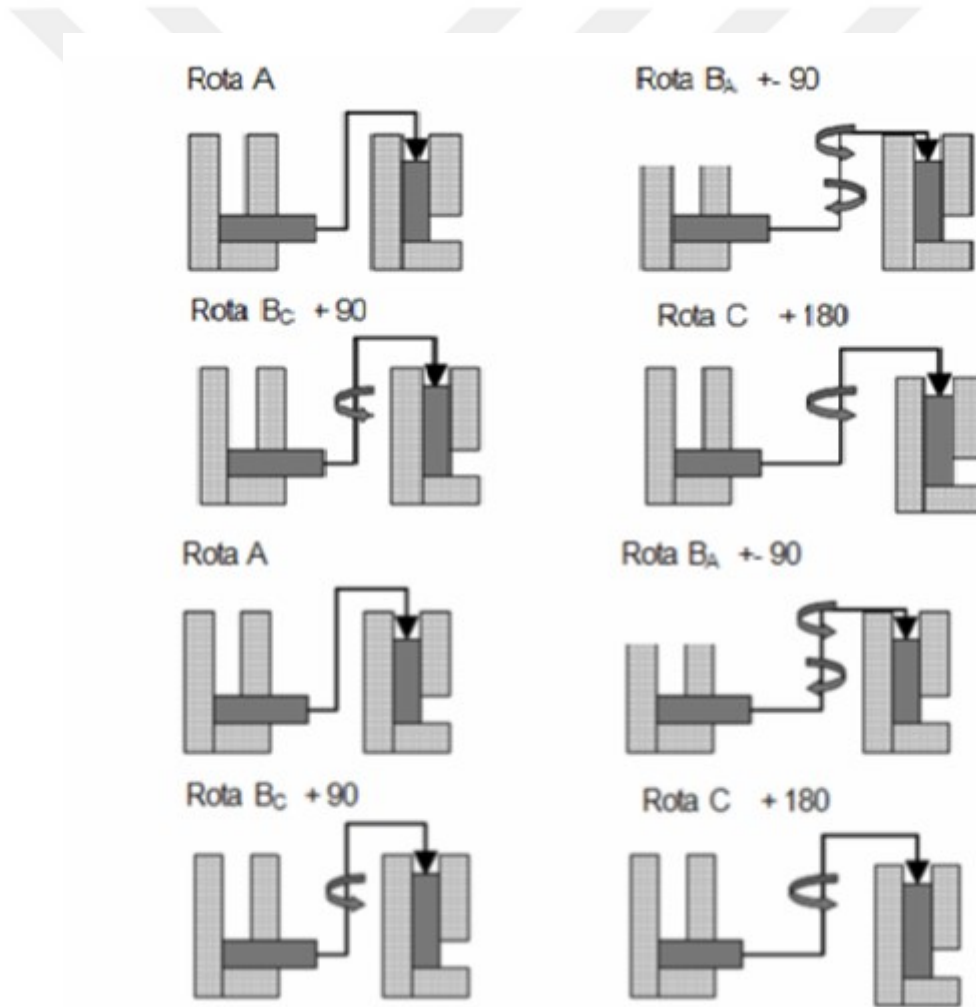
EKAP tekniği ile oluşturulan çok ince taneli mikro yapı; elde edilen toplam birim şekil değiştirmeye etki eden parametreler, mikro yapısal ve mekanik özellikler, numunelerin tekrar kalıba verilmeden önce  $90^\circ$  veya  $180^\circ$  döndürülmesi, numunenin kalıptan geçme sayısı, kalıp açıları, numunenin EKAP sırasındaki sıcaklık v.b. değişkenlerden etkilenir.

### **2.1.2 EKAP deformasyon yön ve açıları**

Bir malzeme EKAP işleminde arka arkaya yapılan pasolarda malzemenin döndürülmesi sebebi ile malzemenin kayma düzlemleri de değişir [2]. Malzeme tekrar EKAP işlemi için kalıba koyulmadan önce, Şekil 2.3'de görüldüğü gibi hiç döndürmeden veya  $90^\circ$  ve  $180^\circ$  döndürülebilir. Bu döndürme açılarına göre döndürme metotları Rota A, Rota B<sub>A</sub>, Rota B<sub>C</sub>, Rota C olarak isimlendirilmiştir (Şekil 2.3). EKAP işleminde malzemenin dönme yönlerine bağlı olarak malzeme karakteristiğinde değişimler kaydedilmektedir. Şekil 2.3'de EKAP işleminde kullanılan rotalar ve döndürme yönleri şematik olarak gösterilmiştir [20, 21]. EKAP işlemlerinde ki rotalama sıralaması Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.1:** EKAP İşlemlerinde ki Rotalama Sıralaması

Rota	Paso 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°



**Şekil 2.3:** EKAP İşlemi Sırasında Kullanılan Rotalar ve Pas Sayılarına Göre Dönme Açılı [20, 21]

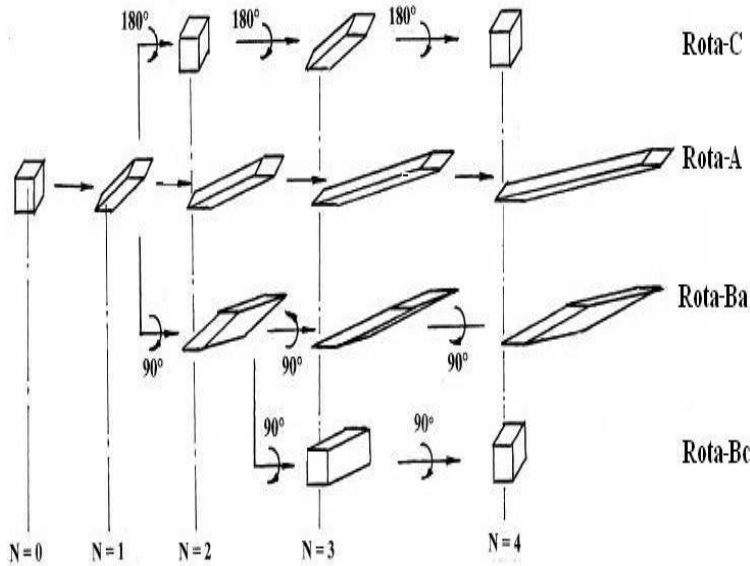
EKAP işleminde malzemeler farklı geçişlerde tekrarlı olarak kanal boyunca preslenir. Bu işlem rota olarak adlandırılır. Malzemede bu yöne bağlı olarak

genellikle 12-15 paso sayısından sonra akma gerilmesinde, dayanımda ve süneklikte önemli artışlar olmaktadır [22].

EKAP uygulamalarında 4 farklı işlem rotası belirlenmiştir.

- Rota A'da, malzemede herhangi bir döndürme olmadan defalarca EKAP işlemi uygulanabilir,
- Rota B<sub>A</sub>'da, numune her geçişte birbirine zıt yönlerde 90° döndürülür,
- Rota B<sub>C</sub>'de, her geçiş arasında aynı şekilde 90° döndürülür,
- Rota C'de numune her geçişte 180° döndürülür.

Şekil 2.4' de görüldüğü gibi, Rota A ve Rota B<sub>A</sub>' da yapılan EKAP işleminde kübik elemanın çarpılması geçiş sayısı arttıkça artmakta ve kayma düzlemi yönünde yönlenme oluşmaktadır. Rota B<sub>C</sub> ve Rota C de ise sırasıyla, 2. ve 4. geçişte deformasyon yönü tersine dönmektedir. Bu nedenle kübik eleman belirtilen geçiş sayılarında deformasyon öncesi sahip olduğu geometriye dönmektedir. Segal yaptığı bir çalışmada, EKAP sonrasında geniş açılı tane sınırlarıyla ayrılmış eş eksenli ince tanelerin en hızlı Rota B<sub>C</sub>' de elde edildiğini ortaya koymuştur [23].



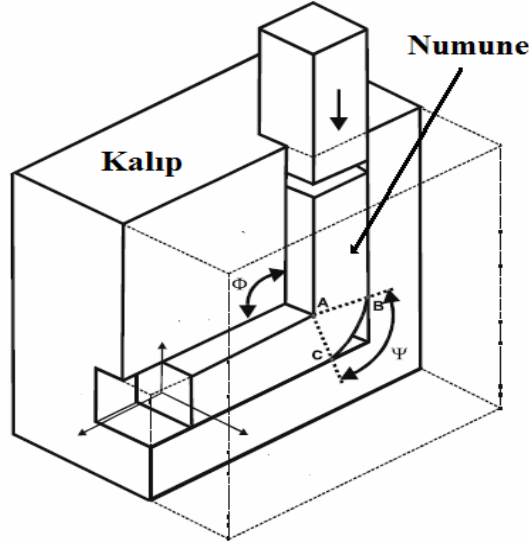
**Şekil 2.4:** EKAP İşleminde Kübik Malzemenin Rotalara Göre Şekil Değişimi [23]

### 2.1.3 Kanal açıları

Kanal açısı EKAP işlemi önemli olan parametrelerden biridir. Şekil 2.5' de L şekilli kanalın şematik görünümü gösterilmektedir. Birim şekil değiştirme kalıptan basit bir geçiş sonrasında malzemede oluşan deformasyon olup  $\Phi$  ve  $\psi$



açılına bağlıdır. Burada  $\Phi$ , iki kanalın kesiştiği noktanın açısı veya kanal açısı,  $\psi$  ise iki kanalın kesiştiği bölgenin dış köşe açısı ve kavis açısıdır [24].



**Şekil 2.5:** EKAP İşleminde Kanal Açılarını Gösteren Bir Kalıbın Şematik Görünümü [24]

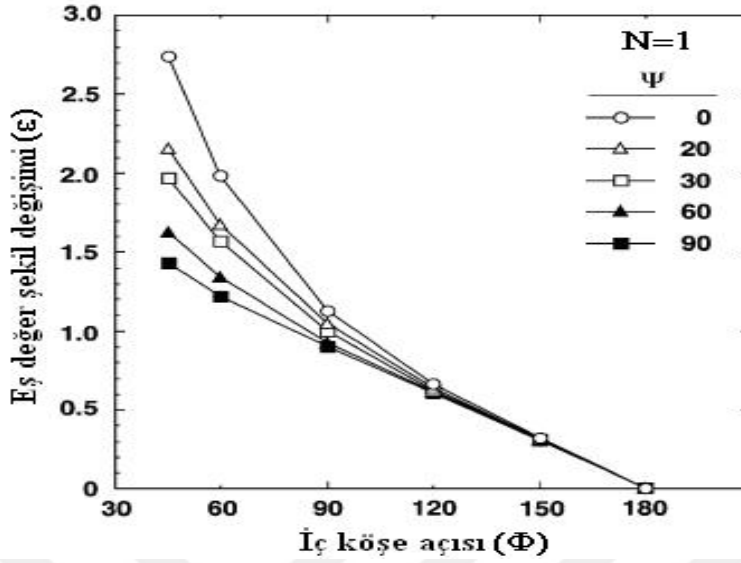
EKAP işleminde malzemede tekrarlı preslemeler ile meydana gelen toplam birim şekil değişimi ( $\epsilon_N$ ) Eş. 2.2’de verilen bağıntı ile açıklanabilir [25].

$$\epsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left( 2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \right) \quad (2.2)$$

Bu bağıntıda N, kalıp boyunca geçişlerin toplam sayısıdır. Bağıntıya göre bir geçişte  $\Phi$  açısı  $90^\circ$  ve herhangi bir  $\psi$  açısında  $\epsilon$  değeri 1’e yakındır. EKAP için kalıp dizayn edilirken bir geçişte birim şekil değiştirme genellikle  $\sim 1$  olarak alınır. EKAP’da malzeme kalıp kanalında çok defa preslenir. Her seferinde birim şekil değişimi katlanarak artar. EKAP kalıplarında, saf alüminyumla yapılan çalışmalarda  $\Phi$  açısı  $90^\circ$ ’ye yaklaştıkça malzeme kalıp boyunca daha kolay bir şekilde preslenir. Yapılan uygulamalar sonucunda alüminyum gibi sünek malzemelerin  $90^\circ$ ’lik  $\Phi$  açısının kullanılmasının uygun olduğu tespit edilmiştir. Gevrek kırılmaya sahip malzemelerin kullanıldığı durumlarda ise, erken meydana gelen hasardan dolayı EKAP işlemi zor hatta imkansızdır. Oluşan bu hasarın önüne geçmek için presleme işleminde kalıbın  $\Phi$  açısı arttırılmalıdır [14].

Şekil 2.6’da görüldüğü gibi EKAP işleminde en fazla şekil değişimi değerlerine ulaşabilmek için  $\Phi$  ve  $\Psi$  değerlerinin olabildiğince küçük seçilmesi

gerekmektedir. Ayrıca, kalıp açısının  $90^\circ$  den daha büyük olduğu durumda  $\psi$  açısının birim değişimine çok az etkisi olduğu da görülmektedir [23].

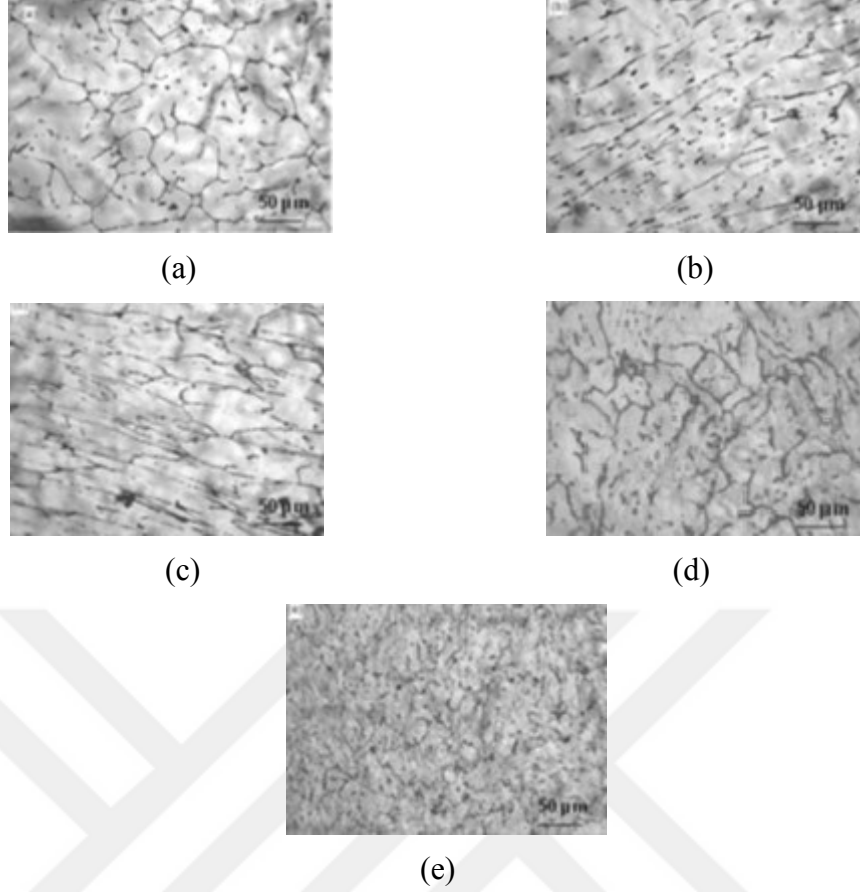


Şekil 2.6:  $\Phi$  ve  $\psi$  Açılarına Bağlı Olarak Eş Değer Şekil Değişimi [23]

#### 2.1.4 Paso (Geçiş) sayısı

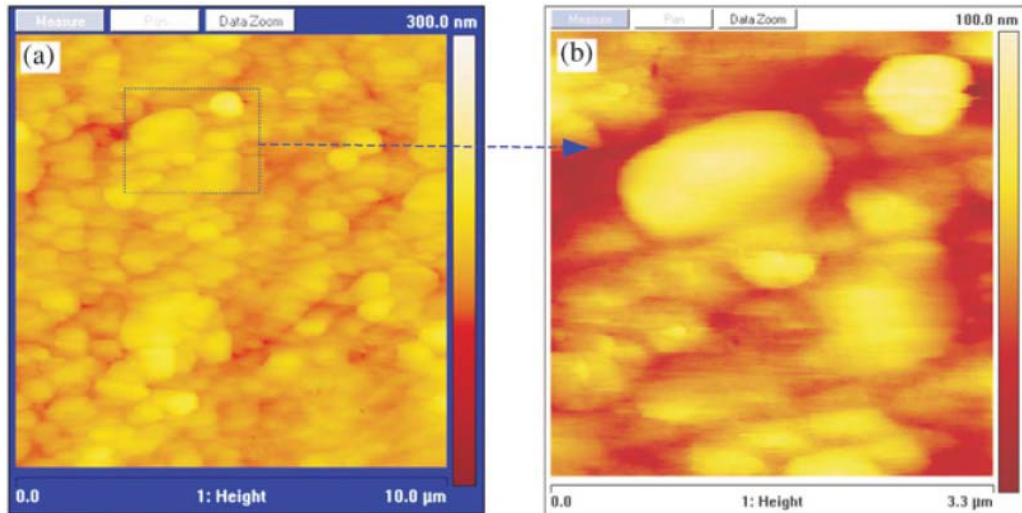
EKAP işleminde önemli olan bir başka parametre de paso sayısıdır. Paso sayısı ile malzemenin atomik yapısında önemli oranda tane incilmesi sağlanmaktadır. Paso sayısı ile ilgili genel bir kural vardır; EKAP işleminde malzemeye, tek bir rotaya bağlı olarak genellikle 15'e kadar paso sayısı uygulanmaktadır [22].

Şekil 2.7'de anlaşılabilceği gibi başlangıçta malzeme kaba tanelere sahipken EKAP işlemi uygulanan malzeme uzamış tanelerde yoğun dislokasyon hücrelerine sahiptir. Bunun nedeni EKAP işlemi sırasında oluşan kayma mekanizması ile gerçekleşen plastik deformasyondur [26].



**Şekil 2.7:** Saf Alüminyumun Optik Mikroskop Görüntüleri ((a) Preslenmemiş, (b) 1 Geçiş Sonrası, (c) 2 Geçiş Sonrası, (d) 3 Geçiş Sonrası, (e) 4 Geçiş Sonrası) [28]

Sekiz geçişten sonra 620 nanometreye inen tane yapısına ilişkin Atomik Güç Mikroskop görüntüleri Şekil 2.8’de gösterilmektedir.



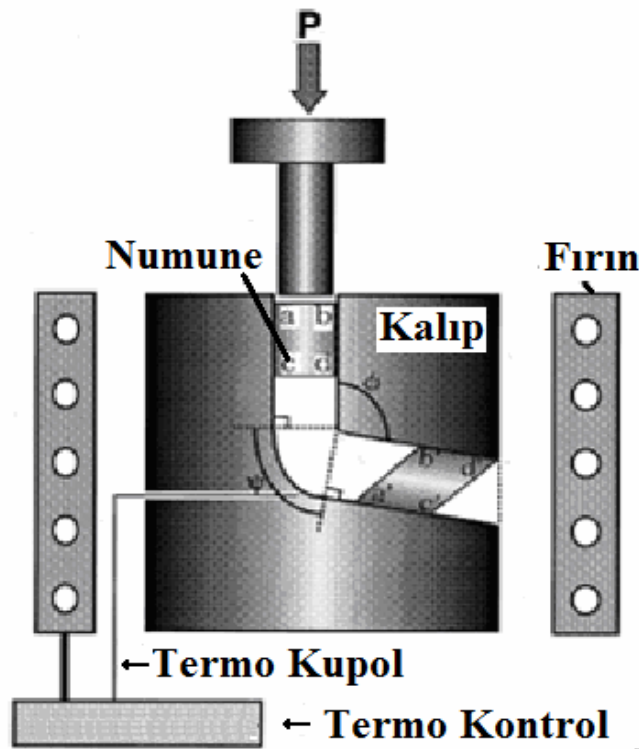
**Şekil 2.8:** Atomik Güç Mikroskop Görüntüleri [28]

EKAP işleminde geçişlerden sonra elde edilen malzeme yapısının homojen olmadığı ve çoğunlukla deformasyona bağlı nedenlerden dolayı atomik

özelliklerinin değiştiği belirtilmektedir. Tekrarlanan paso sayısı işlemlerinden sonra alüminyum malzemeler homojen tane boyutu dağılım gösterir, ancak mikro yapı hala heterojendir. Artan paso sayılarından sonra mikro yapı başlıca büyük-açılı sınırlarla çevrelenmiş ince tanelerden oluşmaktadır. Fakat yapılan çalışmalarda küçük açılı sınırların olduğu da ortaya çıkmıştır. Bu şekildeki mikro yapıya sahip malzemeler deformasyonun ve yeniden kristalleşmenin sebep olduğu özelliklere sahiptir [27].

### 2.1.5 Sıcaklık

EKAP işleminde önemli parametrelerden bir diğeri ise işlem sıcaklığıdır. EKAP işlemi genellikle pres üzerine monte edilen bir fırın içerisinde gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.9’da bir fırın içerisine yerleştirilen EKAP kalıbı ve presleme sıcaklığı termo eleman çifti ile kontrol edilen deney düzeneği şematik olarak gösterilmektedir. Kalıbın fırın içerisinde gereken sıcaklığa ulaşması için gereken süre 1 saati bulmaktadır [30].



**Şekil 2.9:** Yüksek Sıcaklıklarda Yapılan EKAP İşleminin Şematik Gösterimi [2]

Yüksek sıcaklık EKAP işlemleri genellikle sünekliği düşük olan gevrek malzemeler içindir. Çünkü her geçişten sonra malzemede oluşan yoğun birim şekil değişimi sebebi ile bu malzemelerde çatlaklar oluşabilmektedir. Ayrıca

düşük dayanıma sahip malzemelerde yüksek sıcaklık, EKAP işlemini kolaylaştırmaktadır. Yüksek sıcaklık deformasyon işlemine yardım ederken, dislokasyon yoğunluğunu da düşürmektedir [31].

### 2.1.6 Presleme hızı

Presleme hızının EKAP işlemi sonrası elde edilen özellikler üzerinde çok önemli bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Al-%1Mg alaşımı ile yapılan deneylerde, presleme hızının EKAP işlemi sonrasında elde edilen tane büyüklüğüne önemli bir etkisinin olmadığı ancak düşük presleme hızlarında işlem süresi arttığından tanelerin toparlanması için daha fazla zaman kaldığı ve bu nedenle eş eksenli tanelerin oranının arttığı gözlenmiştir [23].

### 2.1.7 Uygulama basıncı

EKAP işleminde dikkat edilmesi gereken parametrelerden bir diğeri basınç-yük ilişkileridir. Bu işlem geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, daha düşük basınç altında gerçekleştirilmektedir [32]. Uygulanan yük ve çalışma basıncı teorik analizden de hesaplanabilmektedir. Segal'e göre EKAP için çalışma basıncı Eş. 2.3'de ki gibidir.

$$P = Y = \Delta \epsilon \cdot i \quad (2.3)$$

Burada P; çalışma basıncı, Y; malzemenin akma gerilimi ve  $\Delta \epsilon \cdot i$ ; EKAP işlemi sırasında bir geçiş boyunca verilen birim şekil değişimidir. Uygulamada Y'nin presleme sırasında doğrudan ölçümü oldukça zordur. Fakat Y için akma dayanımı ve çekme dayanımı arası bir değere sahip olduğu ifade edilmektedir.

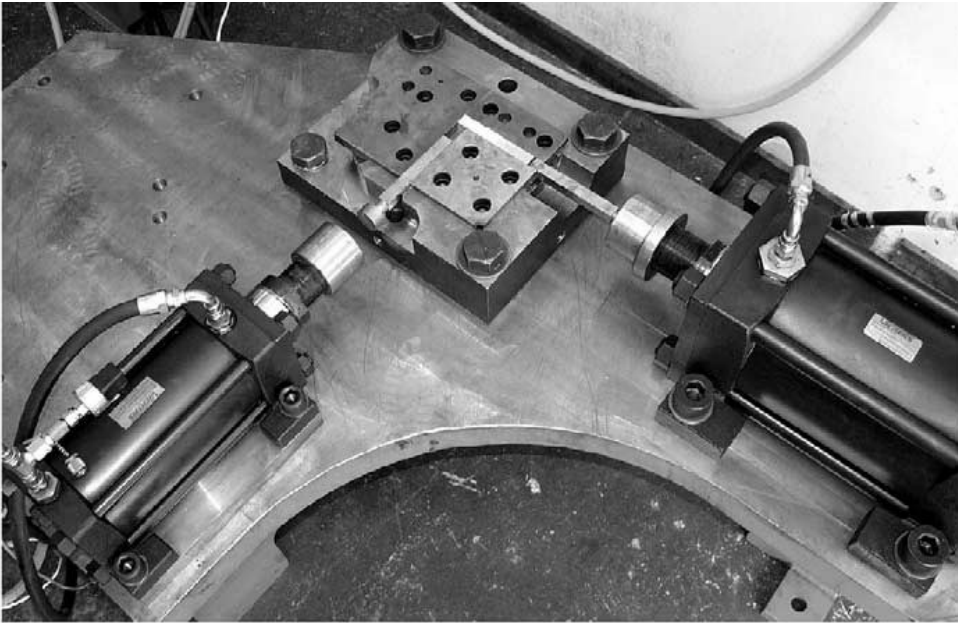
Kanal açıları  $\Phi$  ve  $\psi$ ' ye göre bir geçişteki birim şekil değişimi ( $\Delta \epsilon \cdot i$ ) yaklaşık olarak bilinmektedir (yaklaşık 1). Böylece, malzemenin akma geriliminin belirlenmesi ile birlikte, çalışma basıncı hesaplanabilmektedir. Çalışılan malzemenin kesit alanının ölçülmesi ile birlikte kuvvet hesaplanabilir [33]. Teorik olarak hesaplanmış EKAP basıncı hem malzemenin akma dayanımına hem de numunenin boyuna bağlı olarak değişir. Geçiş sayısının artması ile birlikte malzemenin dayanımı da arttıracığı için, hesaplanan basıncın da artması gerekir.

Ancak, EKAP'ta bir geçiş sonrası oluşan deformasyon akış bantları, ileri sayıdaki geçişlerde deformasyon için yeni yerleşmelere neden olacaktır.

Böylece bir geçişten diğerine malzemelerin dayanımı artsa bile işleminde kullanılan basınç artmayacaktır. Basıncın artması ancak yağlayıcı maddenin bozulması ve sürtünme nedeni ile olabilir [34].

### 2.1.8 Karşı basınç

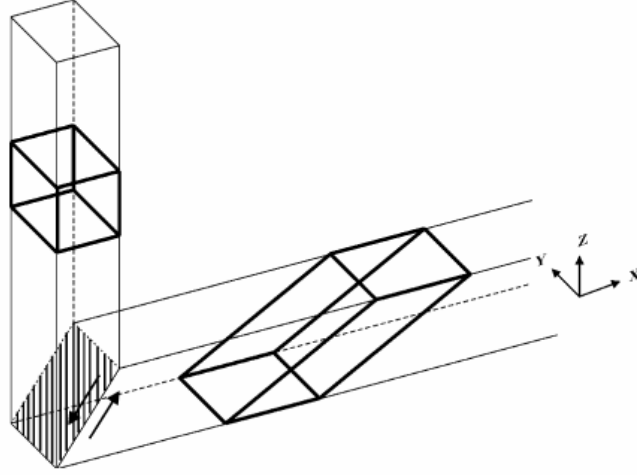
EKAP işleminde göz önünde bulundurulması gereken diğer bir parametrede karşı basınçtır. İşlem sırasında yüksek karşı-basınç uygulandığında, malzemeler de kırılma olmaksızın büyük birim şekil değişimleri oluşur. Yüksek basıncın poroziteyi, çatlakları ve diğer makroskopik kusurları azalttığı düşünülmektedir. [35]. Şekil 2.10'da karşı basınçlı EKAP uygulaması gösterilmektedir.



Şekil 2.10: Karşı Basınçlı EKAP Uygulamaları [58].

### 2.1.9 EKAP ile tane boyutunun inceltilmesi

Daha öncede belirtildiği gibi EKAP işlemi ile tane küçültmesi yapılmaktadır. Şekil 2.11'de EKAP işleminde meydana gelen kayma mekanizması gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi 90°'lik olan bir kalıpta yapılan EKAP işlemi sırasında kayma, iki kanalın 45°'lik kesişme düzlemi boyunca olmaktadır. Kalıp kanalının alt kesim noktası kavisleştirildiğinde deformasyon etkisi azalmaktadır. Eğer kanala kavis verilmemişse, kayma sadece kalıbın 45°'lik düzleminde olur. Bu örnek diğer basit kayma modellerinden farklılık göstermektedir [36].



**Şekil 2.11:** EKAP'ta Kaymanın Oluşumu [36]

EKAP işlemi ile tane yapısı oluşumunda, önce dislokasyon çizgileri oluşturulur. Ardından dislokasyonlar düşük hatalı durumdan yüksek hatalı duruma geçerler. Son olarak da dislokasyonlar tane sınırlarına doğru itilir.

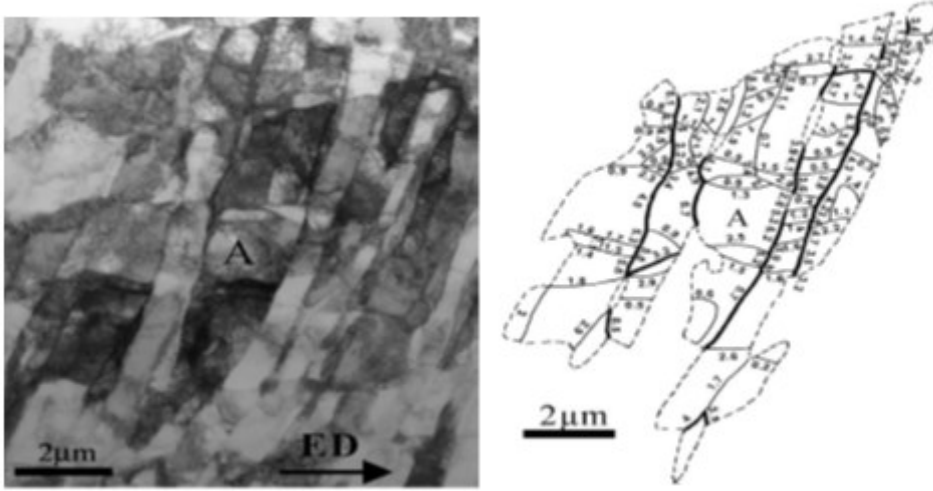
EKAP ile dislokasyon çizgilerinin oluşturulması, haddeleme gibi geleneksel plastik deformasyon işlemlerinden farklı değildir. Çünkü bu durum tamamen plastik şekil değiştirme olayıdır. EKAP kalıptan birinci paso dan sonra malzemenin görünümü Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.12:** EKAP Kalıptan Birinci Pasodan Sonra Malzemenin Görünümü

İlk geçiş aşamasında oluşan dislokasyonlar kararlıdır. Daha sonraki geçişlerde birim şekil değişimi ve kullanılan işlem yönüne bağlı olarak bu çizgiler farklı konumlar oluşturacak şekilde hareket ederler. Şekil 2.13'te Gerilimli Elektron Mikroskobu (TEM) kullanılarak ticari saf 1050 alüminyum alaşımı üzerinde

yapılan çalışmalar sonucunda görüntülenen dislokasyon duvarları gösterilmektedir [36].



Şekil 2.13: 1 Pas Yapılmış Al 1050 Alaşımında Dislokasyon Duvarları [36].

## 2.2 EKAP Yönteminde Kalıp Çeşitleri

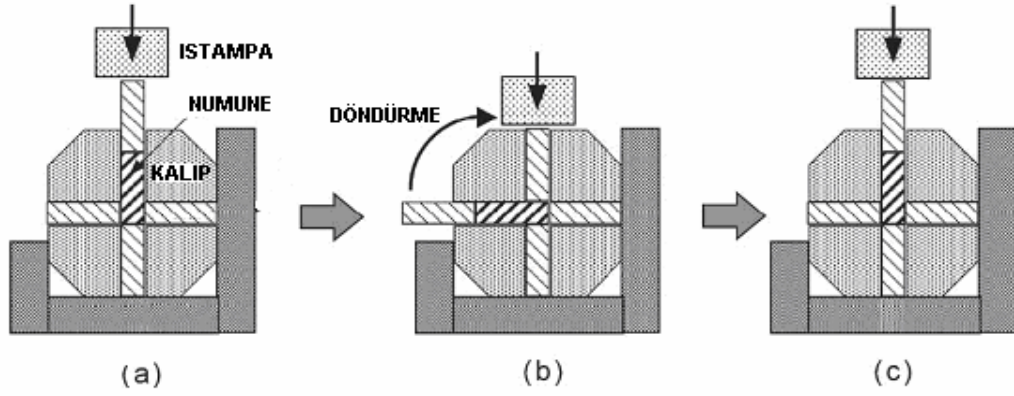
### 2.2.1 Alternatif EKAP yöntemleri

Klasik EKAP yöntemlerinde preslenen parça, kalıptan çıkarıldıktan sonra çok sayıda geçiş işlemine maruz bırakılarak yüksek deformasyon değerli malzeme elde edilmektedir. Bu işlem optimum sertlik seviyesine kadar devam etmekte, aynı zamanda bu süreçteki geçiş işlemleri farklı kombinasyonlarda ve açılarda yapılmaktadır. Uygulanan bu işlem çok zaman almakla birlikte kullanıcının uzmanlığına bağlı olarak işlem süresi uzayabilmekte veya kısalabilmektedir. Bunu önlemek amacıyla yeni yöntemler ve kalıplar dizayn edilmektedir [29].

### 2.2.2 Döner kalıp

Döner kalıp sistemi, işlenen malzemeyi kalıptan çıkarmadan tekrarlı EKAP işlemi uygulamak için kullanılan en basit yöntemdir. Bu sistemde kalıp, birbirini kalıp merkezinde dik kesen iki eş kesitli kanaldan oluşmaktadır. Destek plakaları Şekil 2.14 (a)'da görüldüğü gibi dik kanalın alt kısmına ve yatay kanallara yerleştirilir ve malzeme bir ıstampa ile preslenmektedir. Bu işlemin sonunda kalıp Şekil 2.14 (b)'de görüldüğü gibi döndürülmekte ve tekrar preslenmektedir. Böylelikle parçalar tekrar yerleştirilmeden defalarca preslenmiş olmaktadır. Bu işlem A rotasındaki işlemle eşdeğerdir ama daha basit bir kullanıma sahiptir. Maksimum 32 geçiş sağlanabilmektedir [29].

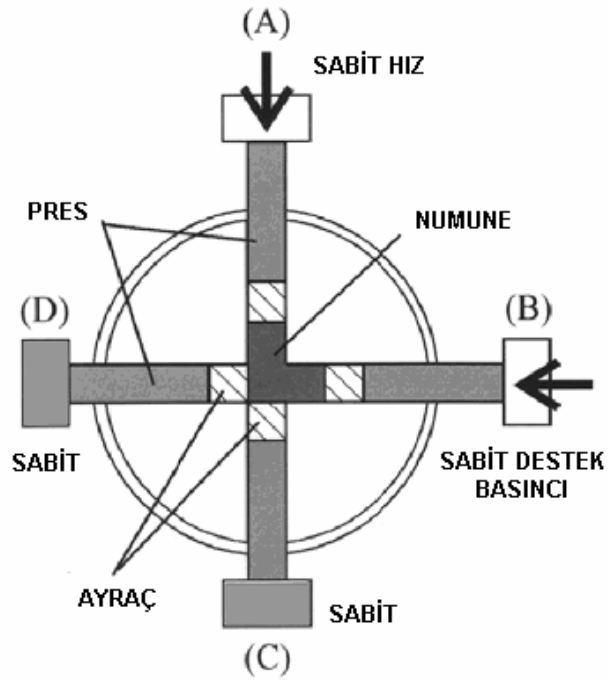




Şekil 2.14: Döner EKAP Kalıbı [29]

### 2.2.3 Kenar ekstrüzyon prosesi

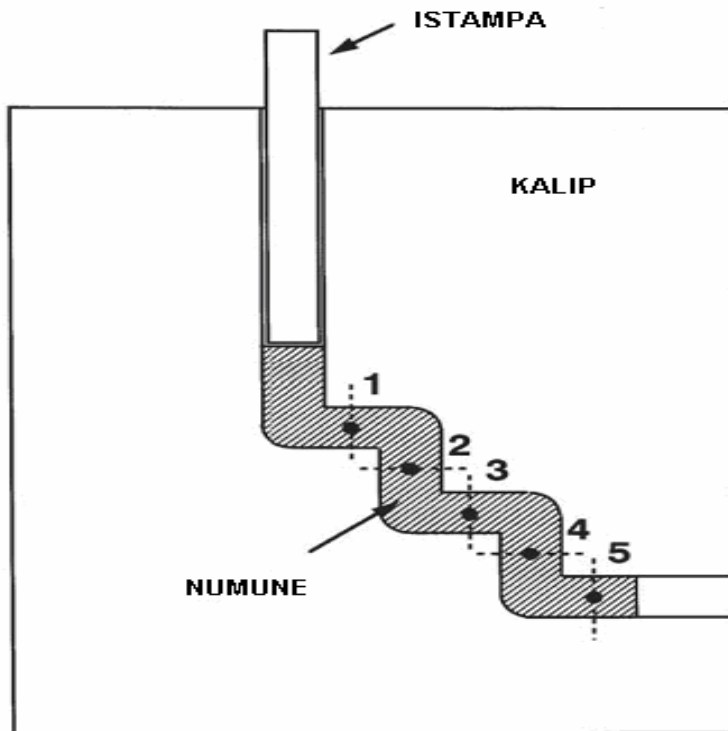
Kenar Ekstrüzyon Prosesi fiziksel olarak döner kalıp yöntemi ile aynı mantıkta çalışmaktadır. Şekil 2.15'te görüldüğü gibi malzeme A noktasındaki pres tarafından sabit hızda preslenirken B noktasındaki pres tarafından desteklenmektedir. İşlem sonunda malzeme B noktasındaki pres tarafından sabit hızla preslenirken A noktasındaki pres tarafından desteklenmektedir. Bu işlem maksimum 10 defa tekrarlanmaktadır. Bu işlem döner kalıp yönteminde olduğu gibi A rotasına eşdeğer bir sistemdir [29].



Şekil 2.15: Kenar Ekstrüzyon Kalıbı [29]

#### 2.2.4 Çoklu geçiş kalıpları

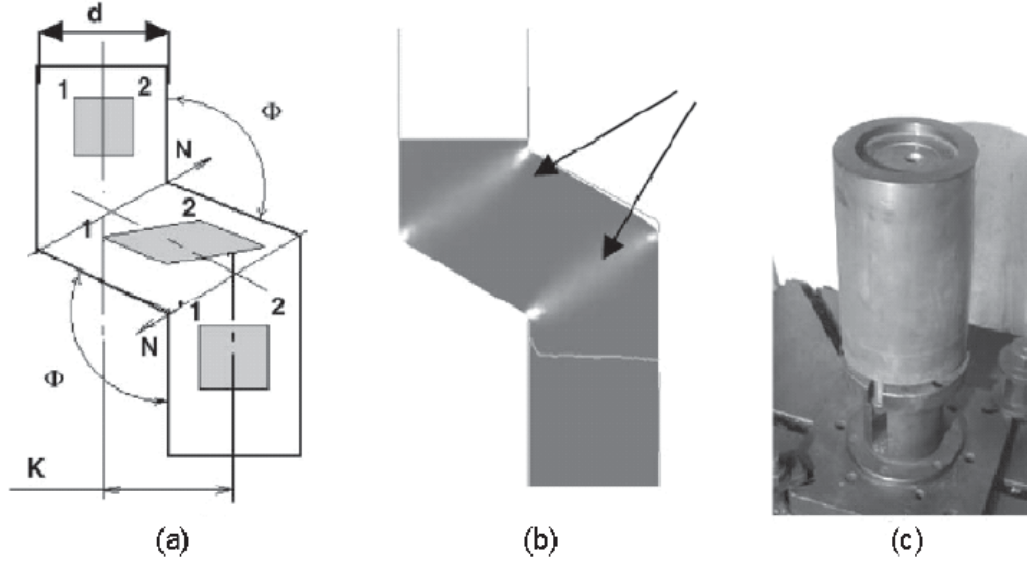
Çoklu Geçiş Kalıpları yönteminde kullanılan kalıp, kompleks presleme kombinasyonlarına gerek duyulmadan çoklu paso sayısına olanak vermektedir ve bu işlem C rotasına eşdeğer bir işlemdir. 1, 2, 3, 4 ve 5 olarak gösterilen noktalar sıralı olarak 1, 2, 3, 4 ve 5. geçişle aynı özellikleri göstermektedirler. Bu yöntem farklı paso sayısına bağlı olarak malzemenin mikro yapı ve sertlik değerlerinin karşılaştırılmasına olanak sağlar. Kalıp kolaylıkla ayrılabilen iki parçadan oluşmaktadır. Ayrıca farklı bölgelerdeki sertlik ve mikro yapı değerlerini ölçebilmektedir [29].



şekil 2.16: Çoklu Geçiş Kalıbı [29]

#### 2.2.5 Paralel kanallı kalıplar

Paralel kanallı kalıpların kullanıldığı EKAP yöntemi diğer klasik EKAP yöntemlerine göre daha avantajlı bir sistemdir. şekil 2.17’de şematik olarak gösterilen sistemde K kanallar arasındaki mesafe iken  $\Phi$  paralel kanallar arasındaki kayma açısıdır. İki farklı kayma sisteminin olduğu bu işlem sayesinde klasik EKAP işlemine oranla daha az paso uygulanarak ultra ince yapı elde edilebilmektedir.  $\Phi$  açısı ve K mesafesi kalıp geometrisini oluşturan en önemli parametreler olup akış karakteristiğini direkt olarak etkilemektedir [29].



Şekil 2.17: Paralel Kanallı EKAP Kalıbı [29]

### 2.3 Alüminyum Malzemelerin Kullanım Alanları

Çizelge 2.2’de özellikleri verilmiş olan Alüminyum, uygulama alanı oldukça geniş bir mühendislik malzemesidir. Saf alüminyumun yoğunluğu, yaklaşık olarak çeliğin üçte biri kadardır. Magnezyumdan sonra, en hafif metaldir. Ayrıca, mukavemeti 70 MPa’a kadar ulaşabilen alüminyum alaşımları, düşük karbonlu çeliklerle rekabet edebilecek düzeydedir. Alüminyum, yüksek dayanım özelliğinin yanında, iyi elektrik ve ısı iletkenliğine sahiptir. Alüminyumun dayanım/yoğunluk oranının yüksek olması, ayrıca, alüminyum alaşımlarının yapı çeliklerinden daha iyi ısıl işlem kabiliyetine sahip olması, alüminyumu önemli bir endüstriyel malzeme haline getirmiştir. Günümüzde, alüminyum alaşımları deniz, uzay ve havacılık, otomotiv ve savunma sanayi alanlarında yoğun olarak kullanılmaktadır [37].

**Çizelge 2.2:** Saf Alüminyumun Özellikleri [38]

Atom Numarası	13
Atom Ağırlığı	26.97 gr/mol
Kristal Yapısı	Yüzey Merkezli Kübik (YMK)
Yoğunluğu	2.7 gr/cm <sup>3</sup>
Erime Noktası	660°C
Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı	150-300°C
Buharlaştırma Noktası	2450°C
Özgül Isısı	0.224 cal/gr (100°C)
Elastisite Modülü	72x10 <sup>3</sup> MPa
Poisson Oranı	0.33
Kayma Modülü	27x10 <sup>3</sup> MPa
Çekme Mukavemeti	40-90 MPa
Akma Mukavemeti	10-30 MPa
Kopma Uzaması	%30-40

Alüminyum alaşımları, üretim metotları esas alınarak dövme (plastik şekil verme işlemi) ve döküm olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Plastik deformasyonla şekillendirilen dövme alüminyum alaşımları, döküm alaşımlardan oldukça farklı mikro yapı ve kompozisyona sahiptir. Her ana grup içindeki alaşımlar, ısıl işlem yapılabilen ve yapılamayan alaşımlar olmak üzere iki alt gruba daha ayrılabilir. Isıl işlem yapılabilen alaşımlarda yaşlandırma ile dayanım artışı sağlanabilirken, ısıl işlem yapılamayan alaşımlarda deformasyon sertleşmesi ve alaşım mukavemetlenmesi ile dayanım artışı sağlanır. Başlıca alaşım elementleri olarak; magnezyum, silisyum, bakır, çinko kurşun, nikel ve titanyum kullanılmaktadır [39].

### 2.3.1 Dövmeye Alüminyum ve alaşımları

Dövmeye alüminyum ve alaşımları dört basamaklı bir sayı ile tanımlanırlar. Binler hanesindeki rakam ana grubu gösterir (Çizelge 2.3). 2xxx serisinden 7xxx ana grubuna kadar her grup en büyük alaşım elementine göre adlandırılır. Mesela 3xxx gurubunda en önemli alaşım elementi mangandır. Bu adlandırmaya uymayan grup serisi 6xxx serisidir. Bu guruba giren alaşımlarda hem magnezyum hem de silisyum bulunur. Bu iki element birleşerek magnezyum silis ( $Mg_2Si$ ) oluşturur [40].

Çizelge 2.3'te bazı dövme alaşımlarının tipik kimyasal bileşimleri verilmiştir. Bu alaşımlardan bazılarının ISO karşılıkları Çizelge 2.4'te görülmektedir.

**Çizelge 2.3:** Dövmeye Alüminyum ve Alaşımların ANSI 35.1 Standardına Göre Ana Grupları [40]

Alüminyum > %99.00	1XXX
Bakır	2XXX
Mangan	3XXX
Silis	4XXX
Magnezyum	5XXX
Magnezyum-Silis	6XXX
Çinko	7XXX
Diğer Elementler	8XXX
Kullanılmayan Dizi	9XXX

**Çizelge 2.4:** ANSI Standartlarında Belirtilen Bazı Alüminyum Alaşımlarının ISO Karşıtları [40].

ANSI	ISO	ANSI	ISO
1060	Al 99.6	5056	Al Mg 4.5 Cr
1350	E-Al 99.5	5083	Al Mg 4.5 Mn 0.7
1100	Al 99.0 Cu	5086	Al Mg 4
		5154	Al Mg 3.5
2014	Al Cu 4 Si Mg	5454	Al Mg 3 Mn
2017	Al Cu 4 Si Mg		
2117	Al Cu 2.5 Si Mg	6061	Al Mg 1 Si Cu
2219	Al Cu 6 Mg	6063	Al Mg 0.7 Si
2024	Al Cu 4 Mg 1	6101	E-Al Mg Si
		6262	Al Mg 1 Si Pb
3003	Al Mg 1 Cu	6351	Al Si 1 Mg 0.5 Mn
M	Al Mn 0.5 Mg 0.5		
		7005	Al Zn 4.5 Mg 1.5 Mn
4043	Al Si 5	7049	Al Zn 8 Mg Cu
4047	Al Si 12	7050	Al Zn 6 Cu Mg Zr
		7075	Al Zn 5.5 Mg Cu
5005	Al Mg 1	7475	Al Zn 5.5 MgCu
5050	Al Mg 1.5	7178	Al Zn 7 Mg Cu

### 3 MATERYAL VE METOT

#### 3.1 Çalışmada Kullanılan Materyal

Bu çalışmada, Alüminyum 6063 kullanılmıştır. Bu malzemenin tercih edilme sebebi şiddetli plastik deformasyona uyumlu olması, akma mukavemetinin yüksek olması ve piyasada kolay bulunabilir olmasıdır. Kullanılan materyalin kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de verilmektedir.

**Çizelge 3.1:** 6063 Alüminyum Malzemenin Kimyasal Özellikleri

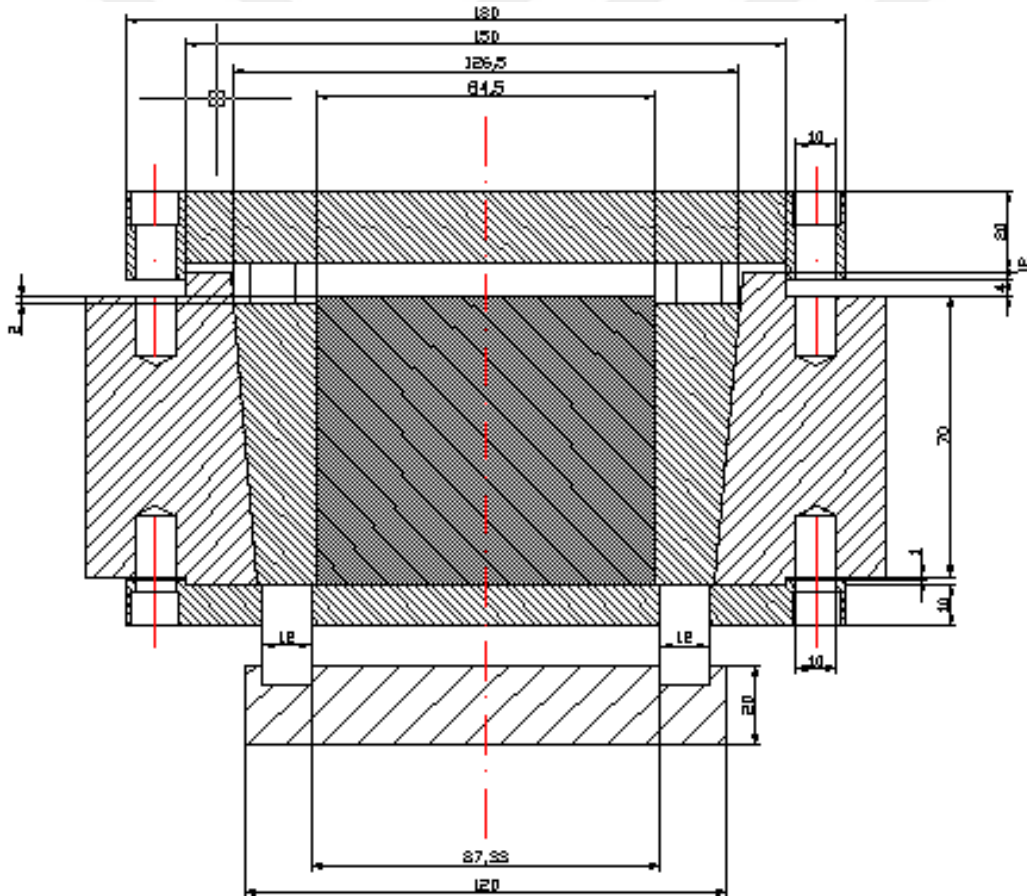
Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Zi	Diğer
0.35	0.2-0.6	0.1	0.1	0.45-0.9	0.1	0.1	0.15	0.15

**Çizelge 3.2:** 6063 Alüminyum Malzemenin Fiziksel Özellikleri

Temper	Akma Mukavemeti (MPa) min-max	Çekme Mukavemeti (MPa) min-max	Uzama (%50) min-max	Sertlik (brinel) min-max
0	50	245100	26	25
T1	90	150	24	45
T4	90	160	21	50
T5	110-175	150-215	12	60
T6	170-210	205-245	12	75
T8	240	260	9	80

### 3.2 Yeni Dizayn EKAP Kalıbı Tasarımı

EKAP kalıplarının eksik ve yetersiz görülen yanlarını gidermek için farklı dizaynlar üzerinde çalışmaya başlandı. İncelenen çalışmalarda mevcut kalıp çeşitlerinin eksikliklerinin tespiti ve literatüre yeni bir bakış açısı sunmak adına bir dizayn üzerinde çalışıldı. Tasarımın eksik yönleri, malzeme bilgileri, malzemeye uygulanacak olan işlemler adım adım yazıldı ve buna bağlı bir iş planı çıkarıldı. Öncelikle malzemelerin seçimi ve temini sağlandı. Malzemenin sertlik, ısıl işlem, mukavemet, plastik deformasyon, şekil değiştirme ve malzeme akımı değerlerinin çalışma için uygunluğunu belirten sertifikaya sahip olup olmadığı incelendi. Bu çalışma için uygun olan malzeme 1.2344 sıcak iş çeliği olarak tespit edildi. Kalıbın teknik çizimi Şekil 3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.1: Kalıbın Teknik Çizimi

#### 3.2.1 Çekirdek kalıbın kaba işleme

İmalata öncelikle kaba işleme aşaması ile başlandı. Çekirdek kalıbın imalatında 1.2344 sıcak iş çeliği (70 mm x 90 mm x 40 mm 2 adet, 70 mm x 30



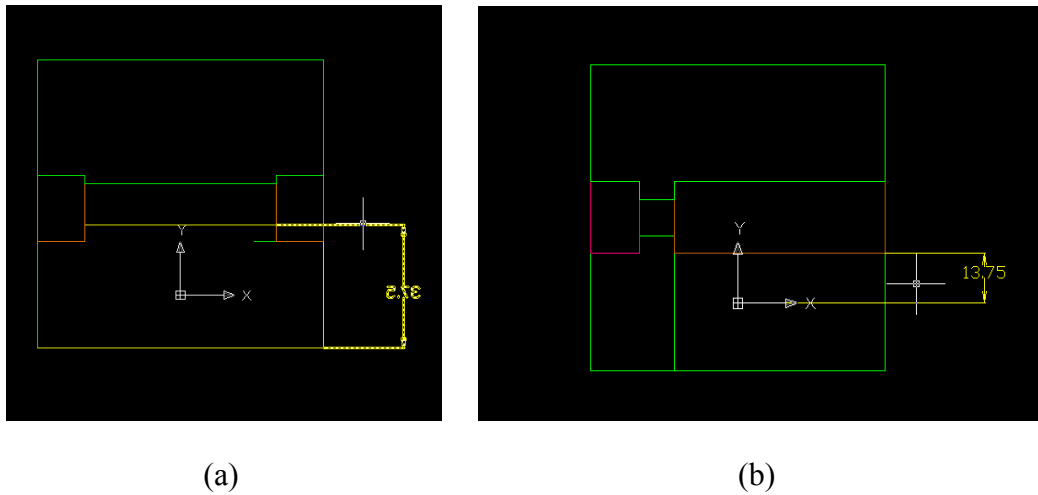
mm x 20 mm 1 adet, 70 mm x70 mm x30 mm 1 adet, 90 mm x15 mm x40 mm 2 adet, 30 mm x 20 mm x 15 mm 2 adet) kullanılarak Şekil 3.2’de gösterilen imalat aşaması ve yapımına geçildi. İlk olarak kalıbın çekirdek kalıp diye adlandırıldığı kısmı frezeleme ve gönyeye getirildi. Malzemeler sert olduğundan işlemek için özel olarak sertleştirilmiş takımlar ve elmaslar kullanıldı.



Şekil 3.2: Çekirdek Kalıbın Malzemeleri Ve Frezeleme İşlemi

### 3.2.2 Çekirdek kalıbın CNC ile işlenmesi ve taşlanması

Çekirdek kalıplara uygulanan frezeleme işlemleri bittikten sonra birbirine bağlanmaları için kalıplarda cıvata yerleri açıldı. Birbirine 4 mm ve 5 mm cıvatalar ile bağlanan parçalar Computer Numerical Control (CNC) makine ile hassas işleme alındılar. Hassas işlemler biten parçalar Şekil 3.3’te teknik resimleri ile gösterilmektedir.



Şekil 3.3: (a) Sığ Kalıbın Teknik Resmi, (b) Derin Kalıbın Teknik Resmi

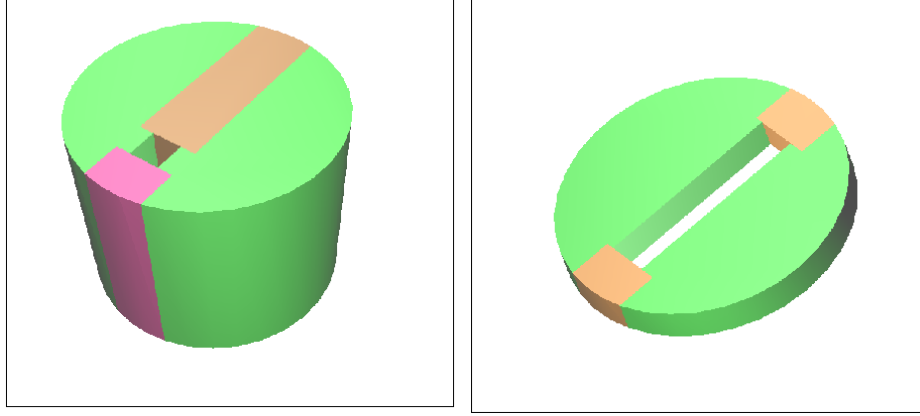
Her parçanın tüm yönlerinin birbirine hatasız şekilde bağlanmasının uygunluğunu sağlamak için taşlama işlemi yapıldı, böylece taşlama işlemi ile sıfır hata elde edilmesi amaçlandı. Taşlama işlemi yapılan çekirdek kalıbın parçaları Şekil 3.4'te verilmektedir.



**Şekil 3.4:** Çekirdek Kalıbın Taşlama İşlemi

### **3.2.3 Çekirdek kalıbın tornalama ve ısıl işlemi**

Birbirine bağlanan parçalar ile 87 mm x 87 mm x 67 mm ebatlarında dikdörtgen bir parça elde edildi. Kalıbın çekirdek yapısını oluşturan ve ölçüleri önemli olan bu parçalar CNC tornada 4 ayaklı ayna ile bağlanarak kademeli olarak işlendi. Kademeli işlemler sonunda 85 mm çapında silindirik bir yapı elde edildi. Boyu hedeflenen ölçüden fazla olan kalıp 2 mm kısaltıldıktan sonra çekirdek kalıbın kaba işlemi tamamlandı. Bu işlem sonrasında kalıbın son hali Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Kalıbın kaba işlemi bittikten sonra kaba ve ince tesviyesi yapıldı. Çekirdek kalıbı oluşturan parçaların birbirine tam olarak oturup oturmadığı ince master ile kontrol edildikten sonra ısıl işlem için kalıp fırına gönderildi. Isıl işlem sonrasında kalıp Şekil 3.6'da gösterildiği gibi 54 HRC sertlik derecesine kadar sertleştirildi.



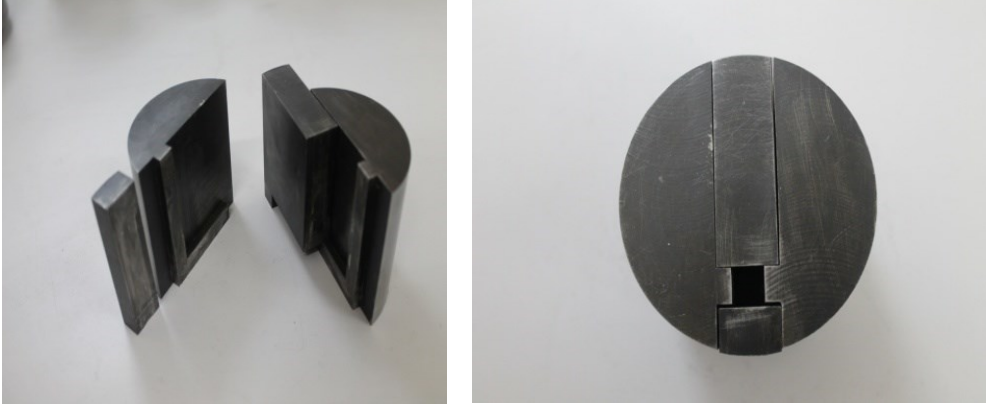
Şekil 3.5: Çekirdek Kalıbın CNC Torna İşleminden Sonraki Hali



Şekil 3.6: Isıl İşlem Fırınından Çıkan Malzemeler

#### 3.2.4 Çekirdek kalıbın silindirik taşlama ve tesviyesi

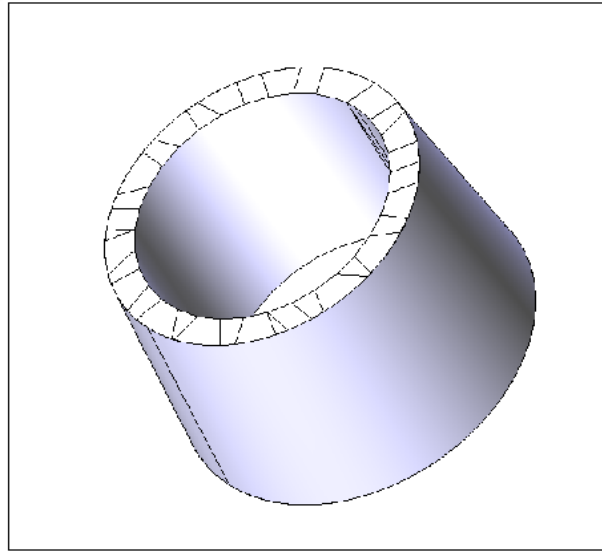
24 saatlik ısıl işlem bittikten sonra çekirdek kalıp parçaları cıvatalarla tekrar birbirine bağlandı. Kalıbın yüzeyi ısıl işlemde ortaya çıkan aşırı ısı sebebiyle oluşan çarpılmaları engellemek için taşlama ile tekrardan 85 mm çapta taşlandı. Çekirdek kalıp tekrar cıvata ile bağlandıktan sonra ince tesviye ile temizlendi ve Şekil 3.7’de gösterilen son halini aldı.



**Şekil 3.7:** Silindirik Taşlamadan Sonra ki Son Hali

### 3.2.5 Sıkma aparatı imalatı

Çekirdek kalıp yapımı bittikten sonra sıkma aparatı ile kalıbın 360°'lik sıkılması işlemine başlandı. Sıkma aparatı, öncelikle tek parça halinde üretilmiş olup etli boru olarak adlandırılan malzemeden elde edilmiştir. Sıkma aparatı, boyu 75 mm ve çapı 130 mm ölçülerinde olan imalat çeliğinden yapıldı. Şekil 3.8'de sıkma aparatının torna işleminden sonra ki tek parça hali gösterilmektedir.

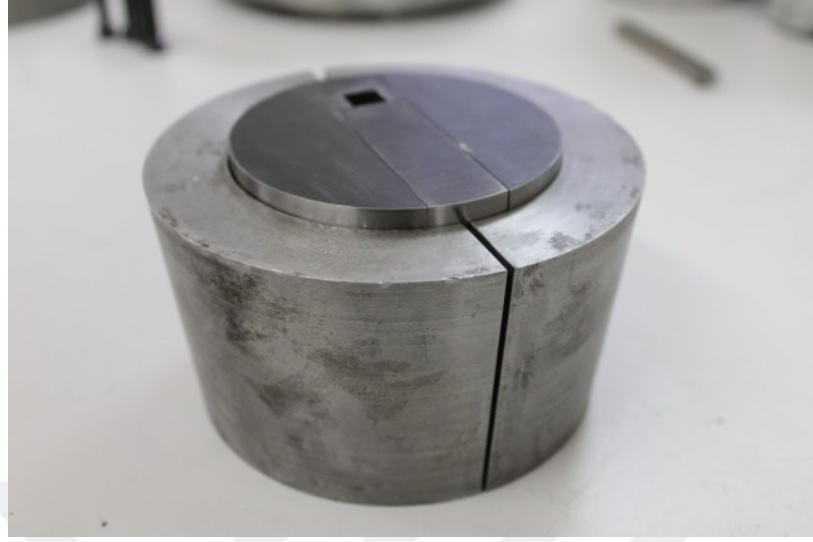


**Şekil 3.8:** Sıkma Aparatının Torna Sonrası Görünümü

### 3.2.6 Sıkma aparatının bölünmesi ve tesviyesi

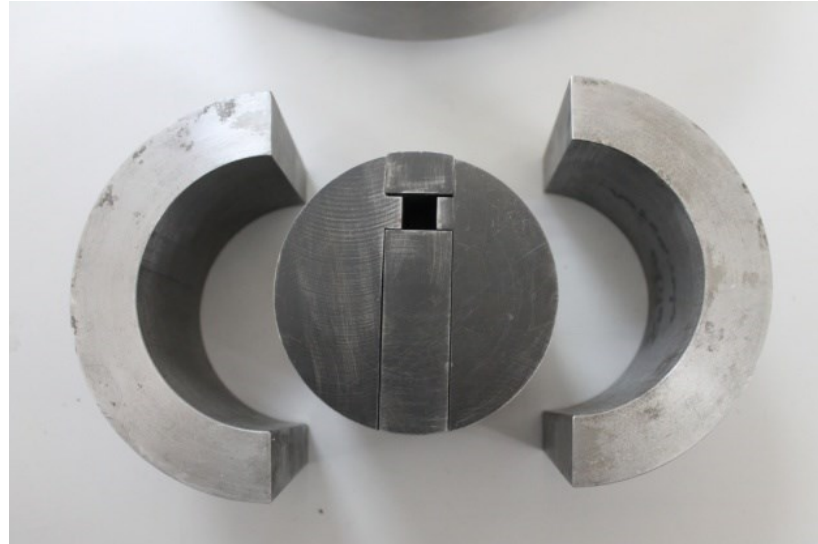
Sıkma aparatı tornada işlendikten sonra Şekil 3.9'da gösterildiği gibi boyu 71 mm, iç çapı 85 mm ve dış çapı 5° eğimle üretildi. Bu eğimi vermek için sıkma aparatı başlangıç ve bitiş çapları 126,92 mm ve 114,5 mm olacak şekilde 5°'lik eğimle aşağıya doğru tek parça olarak işlendi. Bu işlemin ardından sıkma

aparatu tel testere yardımı ile iki parçaya bölündü böylece çekirdek kalıbı daha rahat sıkması sağlandı.



**Şekil 3.9:** Sıkma Aparatının Tornada İşlendikten Sonraki Hali

Kesilen parçaların çekirdek kalıbın yüzeyine uygun şekilde oturup oturmadığı kontrol edildikten sonra freze ile kesilen yüzeyler temizlendi. Sıkma aparatının daha iyi sıkması için iki parça arasında ki mesafeden 2 mm alındı. Sıkma aparatı arasında oluşturulan bu mesafe ile çekirdek kalıbı daha iyi sarmalaması düşünüldü ve Şekil 3.10'da gösterildiği hale geldi.

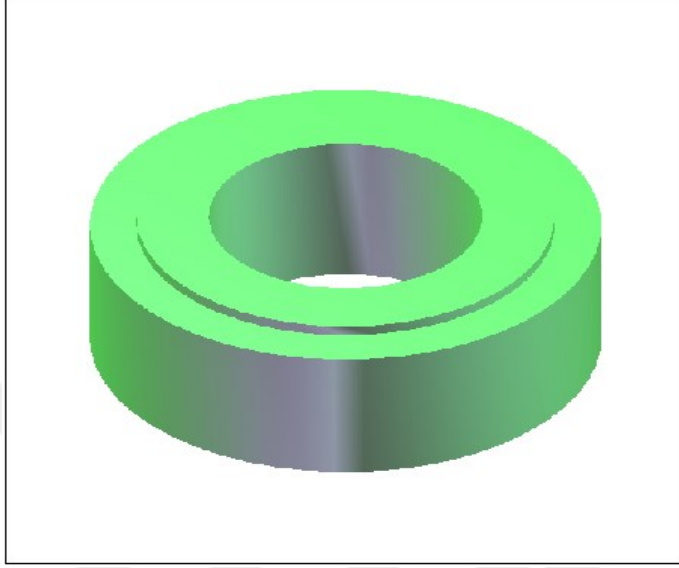


**Şekil 3.10:** Sıkma Aparatının Son Hali

### 3.2.7 Dış kalıbın imalatı

Dış kalıbın imalatı için gereken malzemenin, boyu 85 mm, çapı 205 mm ve içindeki deliğin çapı ise max 110 mm ölçülerdedir. Malzeme, kalıbın kas

yapısını oluşturmakta olup m¼mk¼n oldukça kalın ve taşınırken zorluk çıkarmaması d¼ř¼n¼lerek kalıp ¼ncelikle kabaca tornalama işleminden geçirildi. Daha sonra CNC Torna makinesinde hassas işlendi ve Şekil 3.11’de g¼sterildiđi hale getirildi. İşlemin sonunda sıkma aparatında ki 5° eğim ters aı kalemi ile işlendi.



**Şekil 3.11:** Dış Kalıbın CNC Tornalama İşleminden Sonraki Hali

Dış kalıp Şekil 3.12’de g¼sterildiđi gibi çekirdeği, sıkma aparatını ve kalıbın tamamını bir arada tutan kalıbın t¼m parçalarının bağlandığı ana parçadır.



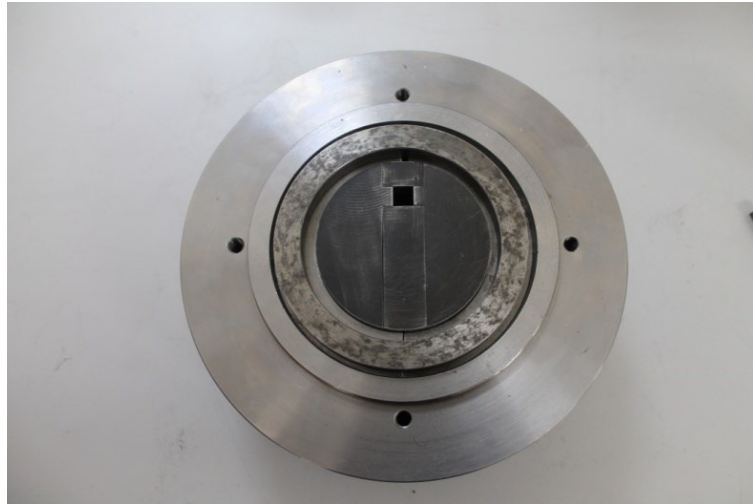
**Şekil 3.12:** ekirdek Kalıp Sıkma Aparatı ve Dış Kalıbın Birleşmiş Hali

### 3.2.8 Dış kalıbın eğimi ve cıvata yerleri açılması

Dış kalıbın işlendikten sonra ki boyu 80 mm'dir. Üst ve alt kapakların kalıba daha rahat oturması için kalıbın tavanına ve tabanına 5 mm kalınlığında birer sekme yapıldı. Her iki sekme 150 mm çapında olup kapaklarda ki sekmelere oturması ve kalıbın daha hızlı toparlanması için yapıldı. Dış kalıbın 5°'lik eğimi 128,15 mm çap ile başlayıp 114,5 mm çap ile bitecek şekilde yapıldı. Tornalama işlemi bittikten sonra dış kalıbın tesviyesi, sıkma aparatın ve çekirdek kalıbın oturması kontrol edildi. Son olarak üst ve alt kapakların dış kalıba bağlanması için kalıbın üstünde ve altında olmak üzere 15 mm derinliğinde 4'er adet metrik 10 cıvata yerleri yapıldı.

### 3.2.9 Sıkıştırma halkası imalatı

Sıkıştırma halkasının boyu 15 mm, dış çapı 1115 mm ve iç çapı 100 mm'dir. Sıkıştırma halkası, üst kapağın kapanırken sıkma aparatına üstten baskı yaparak çekirdek kalıbı sıkır. Sıkıştırma halkası tornaya bağlanarak önce alın yüzeyi temizlendi sonrasında ise iç yüzeye temizlik pasosu verildi. Parça tornadan sökölüp temiz alın yüzeyinin tersinde kalan alın yüzeyi tornaya bağlandı, düzlüğü kompresör ile ölçüldü ve sonrasında iç çap 90 mm haline getirildi. Bu işlemin ardından sıkıştırma halkası tornadan tekrar sökölüdü ve bu sefer ters ayaklar ile iç taraftan sıkılarak tekrar kompresörle kontrol edildi. Dış çapın Şekil 3.13'te gösterildiği gibi 110 mm ölçüde olması sağlandı.



Şekil 3.13: İmal Edilmiş Sıkıştırma Halkası

### 3.2.10 Üst kapak imalatı

Üst kapak ebatları 180 mm çapında ve 22 mm kalınlığında olan imalat çeliğinden üretildi. Üst kapak kalıbın en önemli parçalarından olup kalıbın gövde içinde sıkıştırılmasını ve sabit kalmasını sağlar. Kapağın ve civataların sekmelere daha rahat oturması için üst kapağın iç kısmında 4 mm genişlikte ve 150 mm çapında kanal açıldı. Kapakta bulunan civatalar metrik 10 kalınlığında olup aynı zamanda civata başlarının gizlemek için Şekil 3.14’te gösterildiği gibi derin başlık bölmesi işlendi.



Şekil 3.14: Üst Kapağın Dış Kalıba Bağlanması

### 3.2.11 Malzeme deliğinin ve ıstampa yolunun yapımı

Kalıbın malzeme akışı ve ıstampanın girişi içinde 20 mm çapında bir bölme yapıldı. Bu bölme ile ıstampa yolu kalıbın sıkıştırıldıktan sonra ıstampanın kalıbın içine geçmesi amacı ile aynı hizada işlendi. Şekil 3.15’te görüldüğü gibi kalıbın bu halinde ıstampa rahatça geçebilmesi için merkezden yaklaşık 15 mm uzaklıkta bir ıstampa girişi açıldı.





**Şekil 3.15:** Istampanın Kalıba Girme Durumu

### 3.2.12 Alt kapak imalatı

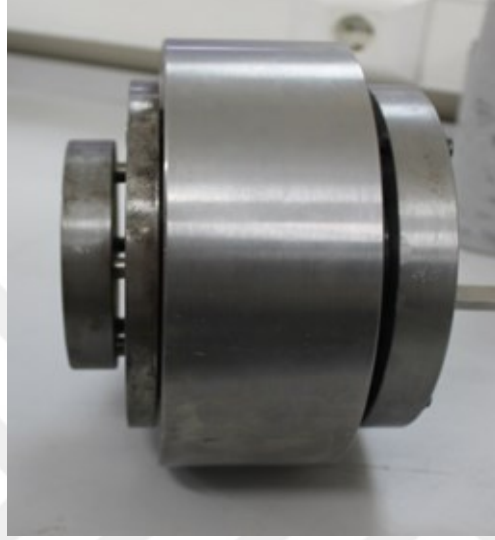
Alt kapak ta üst kapak gibi aynı malzemeden üretilmiş olup alt kapağın ebatları 15 mm kalıkta ve 180 mm çapındadır. Kalıbın alt tarafından dış kalıba oturması için 150 mm çapta 1 mm genişlikte bir kanal açıldı. Alt kapak ile dış kalıbın birbirine geçmesi ve cıvataların birbirini daha rahat karşılaması için üst kapakta uygulanan işlem alt kapakta da yapıldı. Aynı zamanda alt kapak ta 4 adet metrik 10 cıvata ile kalıba bağlandı Alt kapakta çıkartma pimlerinin, kalıbın sıkma aparatına baskı yaparak bu aparatı gevşetmesi için 6 delik açıldı. Alt kapağın cıvatalar ile gösterimi Şekil 3.16'da yer almaktadır.



**Şekil 3.16:** Alt kapak ve Cıvataları

### 3.2.13 Çıkartma aparatı imalatı

Çıkartma aparatı 120 mm çapta ve 15 mm kalınlıkta olup 6 tane pimin imalat çeliği kullanılarak üretilen malzeme üzerine montesinden oluşturuldu. Çıkartma aparatı presleme işlemi bittikten sonra sıkma aparatına alttan baskı yaparak kalıbın çıkmasına yardımcı olan alettir. Şekil 3.17’de çıkartma aparatının alt kapaktan sıkma aparatına baskı yaptığı hali gösterilmektedir.



Şekil 3.17: Çıkartma Piminin Kalıba Girişi

### 3.2.14 Kalıbın tümüyle entegresi ve tesviyesi

Oluşturulan iş planının bu aşamasında kalıbın tüm parçaları birbirine entegre edildi. Tüm parçalar imal edildikten sonra tesviye, parlatma ve diş çekme (klavuz) işlemleri de yapıldı sonuç olarak Şekil 3.18’de gösterildiği gibi son halini aldı.



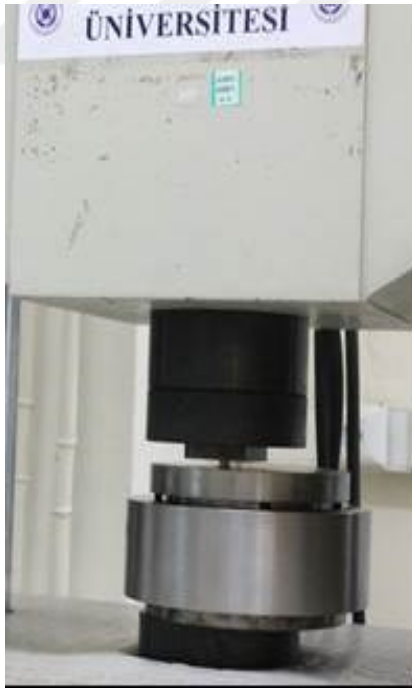
Şekil 3.18: Kalıbın Tüm İşlemlerden Sonra Bitmiş Hali

#### 4 SONUÇ

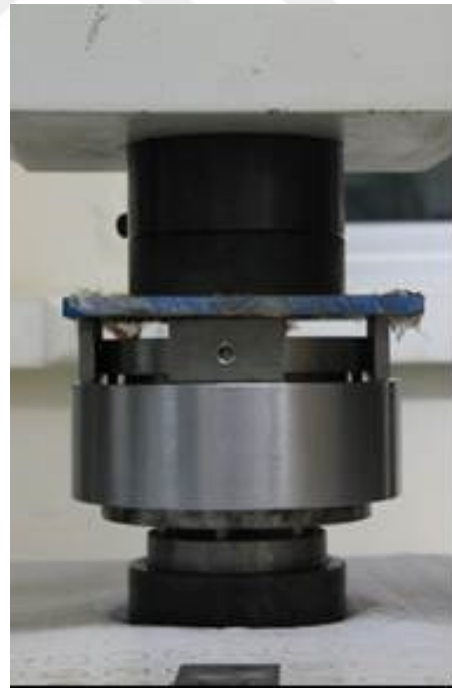
Çalışmamızın sonunda Alüminyum 6063 alaşımı kullanılarak yeni bir EKAP kalıbı tasarlandı. Tasarlanmış olan kalıpların plaster malzeme ile kontrolü Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1: Plaster Malzeme İle Kalıpların Kontrolü



(a)



(b)

Şekil 4.2: (a)Kalıbın Basımı, (b)Kalıbın Çıkartma Aparatı ile Çıkarılması

Çalışılan EKAP işlemlerinde kullanılan kalıplar konusunda, daha önce elde edilen sonuçlardan hareketle, tasarım değişikliği ve geliştirme yapmak üzere yürütülen bir araştırmanın sonuçları Şekil 4.3' te verilmektedir. Bu sonuçlar kalıbın çalışmasının başarılı olduğunu göstermektedir. Kalıplardaki konik sıkma elemanları gerek kalıp boşluğunun şeklini kontrol etmesi ve gerekse de işlem sonrası kalıpların birbirinden ayrılarak numunenin kalıptan alınmasını hızlandırmaktadır. Kalıbın basımı Şekil 4.2 (a)'da gösterildiği gibi olup Şekil 4.2 (b)'de çıkartma aparatları ile çıkartma işlemi gösterilmiştir.



(a)

(b)

**Şekil 4.3:** (a)Basılan İlk Parçalar (b) Çıkan İlk Paso Parçası

Kalıp gerek dizaynı, gerek ilk kez denemesi, gerekse çalışma prensibi olsun her açıdan farklı ve hiç denenmemiş olması bizi şüphelendirse de başarılı şekilde çalışmıştır.

## 5 TARTIŞMA

1970'den beri uçak, otomotiv, medikal ve pek çok sektörde alüminyum kullanımı artmış ve hayatımızda daha fazla yer almıştır. Alüminyumun kullanım sıklığının artması uzmanları bu konuda daha fazla çalışma yapmaya yöneltmiştir. Son yıllarda ultra ince ve/veya nano boyutlu malzemeler üzerinde artan ilgi ile birlikte EKAP üzerinde araştırmalar da giderek artmaktadır. Bilindiği gibi tane boyutundaki azalma malzemelerin mekanik özellikleri ve en önemlisi süperplastik şekil değiştirilebilirliği üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Bunun yanında EKAP kalıplarındaki çatlama ve kırılma riski, kalıpların kullanımını sınırladığı için farklı kalıp tasarımları geliştirilmektedir. Bu çalışmalarda teknolojik yenilikler uygulanmış, ısı işlemlerle kalıbın iç parçaları sertleştirilmiş, kalıbın ve yüzeylerin sertliği arttırılmış ve kalıpların etkinliği yükseltilmiştir. Wert ve arkadaşları ingot-Al-Zn-Mg-Cu alaşımını klasik termomekanik ve yeniden kristalleşme işlemleri ile 10-20 nanometreye kadar küçültebilmişlerdir.

Bu çalışmada ise ilk olarak bu zamana kadar yapılan Eşit Kanal Açısız Presleme (EKAP) yöntemi ve kalıpları incelenmiş, günümüze kadar gelen EKAP prosesinde ki sorunlar analiz edilmiştir. EKAP kalıplarında kayma gerilmeleri nedeniyle tek pasoda bile çok yüksek plastik şekil değiştirme oranlarının elde edilebildiği metal biçimlendirme yöntemleri, "Aşırı Plastik Deformasyon (APD) Yöntemleri" olarak adlandırılır. Paso sayısı arttırılarak toplam şekil değiştirme oranı daha da arttırılabilir. Aşırı plastik deformasyon yöntemleri, eşit kanallı açısız basma, çevrimsel ekstrüzyon-basma şeklinde sınıflanabilir. Eşit Kanallı Açısız Presleme (EKAP), söz konusu yöntemler arasında en çok bilinen ve uygulanan türünü oluşturmaktadır.

Yüksek çentik etkisiyle EKAP kalıplarında bulunan köşe bölgelerinde ortaya çıkan çatlamlar sebebiyle bu tür kalıpların kullanımında sorunlarla karşılaşmaktadır. Bu konuda parçalı kalıp yaklaşımının kullanımı önemli bir olanak sağlamaktadır.

Sunulan çalışmada, daha önce geliştirilen ve parçalı kalıp tasarımının takip edildiği kalıplar incelenmiş, kalıpların kullanımını ve deformasyon koşullarını geliştirmek üzere yeniden tasarlanan ve üretilen EKAP kalıpları ile çalışılmıştır. Çalışmanın sonunda yürütülen deneysel sürecin aşamaları ve ilk sonuçları sunulmuştur. Alüminyum 6063 kare kesit halinde işlenen prizmatik numunelere 2 kademe aşırı plastik deformasyon uygulanarak kalıpların kullanılabilirliği ve karşılaşılan problemler irdelenmiştir.

Bu amaçla çalışmamızda “parçalı kalıp tasarımı” yaklaşımına uygun olarak iç içe geçmiş kalıp bölgelerinden kalıpta deformasyon bölgesini oluşturan kalıp parçaları imal edilmiştir. Asıl deformasyonun sağlandığı iç kalıp bölgesi “çekirdek kalıplar” olarak adlandırılmış, 1.2344 sıcak iş çeliği seçilerek 8 parçadan oluşturulmuş ve ısıtılma yoluyla 54 HRC sertlik derecesine kadar sertleştirilmiştir.

Çekirdek kalıplar, 85 mm çapında olup 8 parçadan oluşmaktadır. Kaba işlemler bittikten sonra cıvata delikleri ve karşılıklı dişleri çekilmiş kalıbın, ince işçilik ve geri kalan ayrıntıları için yapımına CNC makinelerde devam edilmiştir. Talaşlı işlemleri tamamlanan parçalar, tesviyeden sonra ısıtılma için özel fırına gönderilmiş ve sertleştirilmiştir. Çarpılmalar ve kaymalar sebebiyle kalıbın yüzeyinde meydana gelen bozunmalar taşlanma işlemi ile düzeltilmiştir.

Kalıpların metal malzemelerin şekillendirilmesinde de kullanılabilirliğini göstermek üzere 6063 kalite alüminyum levhalardan 10 mm x 10 mm x 55 mm boyutlarında prizmatik deney numuneleri hazırlanmış ve kalıpta basılmıştır. Parçaların basımı sırasında üzerlerine gres yağı sürülerek sürtünme katsayısının düşürülmesi yoluna gidilmiştir. İşlem tamamlandıktan sonra çıkarıcı pimler ve yardımcı plakalar kullanılarak konik parçaların birbirinden uzaklaşması sağlanmış ve kalıplar “çözülmüş” tür.

Geleneksel EKAP işlemi sırasında süreç ile ilgili çeşitli problemler ortaya çıkabilmektedir. Bu problemlerden biri kalıp yüzeyleri ve numune ile kalıp arasındaki etkileşim yüzeylerindeki sürtünme kuvvetidir. Bu sorun numunenin dayanımı ıstampa dayanımına yaklaştığında ve yüksek sıcaklıklarda kendini daha fazla hissettirmektedir. Bu yeni kalıp tasarımı ile birlikte sürtünme etkilerinin minimum düzeye çekilmesi hedeflenmiştir. Böylelikle daha dayanıklı

ve uzun malzemelere aynı presleme gücü ile EKAP işlemi uygulamak mümkün olacaktır.

Burada dikkat edilmesi gereken unsur, sürtünmeyi minimum seviyeye indirecek ve EKAP işlemi sırasında ortaya çıkacak olan yüksek sıcaklıkta diğer kalıp elemanları ile uyumlu bir şekilde çalışacak malzemeyi seçmektir. Kalıpta ki sürtünme problemi aşıldıktan sonra sürtünmeyi daha da minimize etmek amacıyla kalıp için en uygun yağın seçilmesi gerekmektedir. Geleneksel yöntemlerde karşılaşılan bir diğer önemli problem ise kalıp elemanlarının presleme esnasında deformasyona uğramasıdır. Bu sorunun önüne geçmek için minimum sayıda bağlantı elamanı kullanılarak yüksek preslemelerde bile malzemenin kalıp parçalarının arasına sızmasını engelleyecek bir dizayn yapılmalıdır.

Çalışmamızda kullanılan kalıbı günümüze kadar kullanılan kalıp çeşitlerinden ayıran en önemli özelliği modüler olması ve ilk kez denenmiş olmasıdır. Böylece mevcut kalıpların tersi bir işlem düşünülmüştür. İşlemi hızlandırmak adına sökme ve toplama konusuna ayrıca önem verilmiştir.

Bu zamana kadar incelenen tüm kalıplarda paso sayısına bağlı olarak çekirdek kalıpta oluşan sürtünme ile birlikte kalıbın kendisinde de aşınmalar oluşuyordu. Bu yüzden bizim çalışmamızda kullanılan kalıpta iç kalıba ayrıca önem verilmesi ve kalıbın uzun ömürlü olması ve her basımda aynı kalitede paso etkisi verilmesi amaçlandı. Bu yüzden çekirdek kalıp 1.2344 sıcak iş çeliği ve ısıtılmalardan geçirildi. Kalıbın tamamını sıcak iş çeliği ile yapmak masraflı olacağından dolayı kalıp iki farklı kalıptan yapıldı. Kalıplar iç içe geçirilerek maliyeti ve ısıtılma işlemi sadece çekirdek kalıpla sınırlandı. Bu durum EKAP kalıbının basım tekrarlanabilirliğinin daha da fazla olmasına ve kalıp yapımı için farklı malzemeler ile çalışma olasılığına rağmen dayanıklı ve uzun ömürlü olmasına olanak sağlamıştır. Aynı zamanda alüminyum malzemelerden daha sert malzemelerde çalışma imkanı vermiştir. Böylelikle kalıbın kırılması veya çatlaması gibi olumsuzluklar ile karşılaşılma ihtimali minimuma indirilmiştir.

Kaan ÖZEL ve arkadaşları Trakya Üniversitesi'nde ki çalışmalarında tek parçalı EKAP üzerinde çalışmış olup kalıp kendi içinde 90°'lik bir malzeme yolu oluşturmuştur. Bu oluşan yol ıstampanın ve malzemenin ilerlemesine tek yön

vermekle birlikte malzeme basım yolu yandan düz bir plaka ile desteklenmiştir. Bu sistem en basit haliyle tek giriş-çıkış olarak tasarlanmış ve dış tarafta ki koruyucu kalıbın da yardımıyla kalıbın deformasyonu engellenmeye çalışılmıştır [47].

Bir önceki paragrafta anlatılan çalışmada kalıbın iki parçadan oluşması, parçanın kalıptan çıkarılması ve tekrar basıma hazır olması uzun bir ön hazırlık gerektirmektedir. Bunun tersine bizim çalışmamızda kalıbın tekrar doluma hazır olması presin ve çıkartma pimlerinin yardımıyla daha rahat olmuştur. Sonrasında parçayı alıp tekrar basıma başlanması sorunsuz olmuştur ve kolay. Bunun yanı sıra kalıbın kendisinde oluşacak deformasyonlar kalıp kullandıkça artacaktır. Çünkü kalıpta kullanılan malzeme her ne kadar sert olsa da ısı işleminden geçememesi kalıbı daha fazla kullanmadan malzeme yolunun yıpranmasına sebep olacaktır. Bunu engellemek adına bizim kalıbımızda bulunan malzeme yolu ısı işleminden geçirilmiştir. Aynı zamanda kalıbın tekrar basıma girerken kullanımını kolaylaştırmak için kalıbın 90°'lik dirseğinden sonra malzeme yolu 10 mm den 9.9 mm çekilmiş böylece malzeme rahatlıkla tekrar basıma girmiştir.

Çalışma esnasında, kalıbın çekirdek kısmı sert malzemedan ve ısı işleminden geçtiğinden dolayı kalıpta fazla yük ile çalışıldığında ıstampaya yüke dayanamamış ve kırılmıştır. Bu da bize ıstampanın optimum basımın üstünde çıktığında kırılmaya müsait olduğunu göstermiştir. Bu sorunu engellemek için ıstampada ki yükü azaltıp araya daha kısa ıstampaya koyulmuş böylelikle yük uzun ıstampadan alıp iki ara parça üzerinde eşit dağıtılmıştır.

İstampanın kırılmasına sebep olan bir başka etken ise kalıbın yağlanması için kullanılan yağ çeşidi ve yağlama işlemidir. Bu işlem sırasında karşılaşılabilecek olan olumsuz ihtimaller daha önceden araştırılmış ve yağlama daha dikkatli yapılmıştır. Ancak her ne kadar hassas davranılmış olursa da ıstampanın kırılmasını engellenememiştir. Bu sebeple kullanılan yağ değiştirilmiş ve yağlama işlemi kanalın içine de uygulanmıştır. Böylelikle sürtünme kademeli olarak gerçekleştirmiştir.

Karşılaştığımız bir diğer problem ise çekirdek kalıpta olmuştur. Çekirdek kalıpta malzemenin sert olması ve kalıbın ısı işlem sonrasında çarpılması



malzeme yolunda ki parçalar arasında boşluklara sebep olmuştur. Çekirdek kalıp parça yüzeylerinin birbirine temas bölgelerinin işleme kalitesinin arttırılmasına yönelik daha gelişmiş yöntemleri kullanılmış olsaydı kalıp basımı daha hızlı yapılabilirdi.





## KAYNAKÇA

- [1] **Roven, H.J., Werenskiold, J.C.**, (2004). “Conventional light alloys towards the bottom-a physical metallurgical approach”, Nanomat Conference, Oslo, 32-40.
- [2] **Valiev, R.Z., Langdon, T.G.**, (2006). “Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement”, Progress in Materials Science 51 (7):881– 981.
- [3] **Firstov, S. Brodnikowski, M., Danylenko, M., Podrezov, Y.**, (2002). “Nanocrystalline Structure formation under severe plastic deformation and its influences on mechanical properties”, Reviews On Advanced Materials Science, 4:55-162.
- [4] **Srinivasan, R.**, (2006). “Continuous severe plastic deformation processing of aluminium alloys”, NTIS Final Report Ohio, 3-36.
- [5] **Lowe, T., Zhu, Y.**, (2003). “Commercialization of nanostructured metals produced by severe plastic deformation processing”, Advanced Engineering Materials, (5): 373-378.
- [6] **Hall, E.O.**, (1951). “The Deformation and Ageing of Mild Steel”, Proceedings of the Physical Society, B64: 747-753.
- [7] **Petch, N.J.**, (1953). “The cleavage strength of polycrystals”, Journal of the Iron and Steel Institute, 174 (8): 25-28.
- [8] **Yutaka, S., Mitsunori U., Hiroyuki K., Keisuke I.**, (2003). “Hall-Petch relationship in friction stir welds of equal channel angular-pressed aluminium alloys”, Materials Science and Engineering, A354: 298-30 .
- [9] **Ashby, M.F., Verrall, R.A.**, (1973). “Diffusion-accommodated flow and superplasticity”, Acta Metallurgica, 21 (2): 149-163.
- [10] **Langdon, T.G., Watanabe, T., Wadsworth, J., Mayo, M.J., Nutt, S.R., Kassner, M.E.**, (1993). “Future research directions for interface engineering in high temperature plasticity”, Materials Science and Engineering, 166 (1-2): 237-241.
- [11] **Ball, A., Hutchison, M.M.**, (1969). “Superplasticity in the Aluminium-Zinc Eutectoid”, Metal Science, 3 (1): 1-7.
- [12] **Langdon, T.G.**, (1994). “A unified approach to grain boundary sliding in creep and superplasticity”, Acta Metallurgica Et Materialia, 42 (7): 2437-2443.
- [13] **Shan, A., Moon, I, Ko, H., Park, J.**, (1999). “Direct observations of shear deformation during ECAP in pure aluminium”, Scripta Materials, 41 (4): 353-357.
- [14] **Furukawa, M., Horito, Z., Langdon, T.**, (2001). “Developing ultrafine grain sizes using severe plastic deformation”, Advanced Engineering Materials, 3 (3): 121-125.
- [15] **Xu, C., Furukawa, M., Horito, Z., Langdon, T.**, (2005). “Influence of ECAP on precipitate distribution in a spray-cast aluminium alloy”, Acta Materialia, 53 (3): 749-758.

- [16] **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*, 281 (1-2): 82-87.
- [17] **Wu, P., Chang, C., Kao, P.**, (2004) “The distribution of dislocation walls in the early stage of ECAE”, *Material Science and Engineering*, 374 (1-2): 196-203.
- [18] **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.
- [19] **Valiev, R.**, (2003). “Paradoxes of severe plastic deformation”, *Advanced Engineering Materials*, 5 (5): 296-300.
- [20] **Furukawa, M., Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M., Langdon, T.G.**, (1998). “The shearing characteristics associated with equal-channel angular pressing”, *Materials Science and Engineering*, 257 (2): 328-332.
- [21] **Malek, P., Cieslar, M., Islamgaliev, R.**, (2004). “The influence of ECAP temperature on stability of Al-Zn-Mg-Cu alloy”, *Journal of alloys and compounds*, 378 (1): 237- 241.
- [22] **Cabibbo, M., Evangelista, E., Latini, V.**, (2004). “Thermal stability study on two aluminum alloys processed by ECAP”, *Journal of Material Science*, 39 (18): 5659-5667.
- [23] **Saray, O.**, (2007). “Eş Kanallı Açısız Ekstrüzyon İşleminin Zn-60Al-2Cu Alaşımlarının Yapısal, Mekanik ve Aşınma Özelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 20-27.
- [24] **Kim, H.S.**, (2002). “Finite element analysis of deformation behaviour of metals during equal channel multi-angular pressing”, *Materials Science and Engineering*, 328 (1-2): 317-323.
- [25] **Aida, T., Matsuki, Z., Horito, Z., Langdon, T.G.**, (2001). “Estimating the equivalent strain in ECAP”, *Scripta Materialia*, 44 (4): 575-57
- [26] **Zhenga, L.J., Chen, C.Q., Zhou, T.T., Liu, P.Y., Zeng, M.G.**, (2002). “Structure and properties of ultrafine-grained Al-Zn-Mg-Cu and Al-Cu-Mg Mn alloys fabricated by ECA pressing combined with thermal treatment”, *Materials Characterization*, 49 (5): 455-461.
- [27] **Liu, T., Zhang, W., Wu, S., Jiang, C, Li, X., Xu, Y.**, (2003). “Mechanical properties of a two-phase alloy Mg-8%Li-1%Al processed by ECAP”, *Material Science and Engineering*, 360 (1-2): 345-349.
- [28] **Saravanan, M., Pillai, R. M., Pai, B. C., Brahmakumar, M., Ravi, K. R.**, (2006). “Equal Channel Angular Pressing of Pure Aluminium-An Analysis”, *Materials and Minerals Division, Regional Research Laboratory*, 679-684.
- [29] **R. Z. Valiev, T. G. Langdon**, (2006). “Developments in the use of ECAP processing for grain refinement”, *Rev. Adv. Mater. Sci* 13, 15-26.
- [30] **Yamashita, A., Yamaguchi, D., Horito, D., Langdon, T.G.**, (2000). “Influence of pressing temperature on microstructural development in ECAP”, *Materials Science and Engineering*, 287 (1): 100-106.
- [31] **Chen, Y., Huang, Y., Chang, C., Kao, P.W.**, (2003). “The effect of extrusion temperature on the development of deformation mikrostructures in Al 5052 aluminium alloy processed by ECAP”, *Acta Materialia*, 51 (7): 2005-2015.

- [32] **Sako, Y.S., Urata, M., Kokawa, H., Ikeda, K.**, (2003). “Hall-Petch relationship in friction stir welds of ECAP aluminium alloys”, *Material Science and Engineering*, 354 (1-2): 298-305.
- [33] **Shan, A., Moon, I., Park, J.W.**, (2002). “Estimating of friction during ECAP of aluminium alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, 122 (2-3): 255-259.
- [34] **Vinogradov, A., Hashimoto S.**, (2003). “Fatigue of severely deformed metals”, *Advanced Engineering Materials*”, 5 (5): 351-358.
- [35] **Stolyarov, V.V., Lapovok, R., Brodova, I.G., Thomson, P.F.**, (2003). “Ultrafine-grained Al-5 wt.% Fe alloy processed by ECAP with backpressure” *Materials Science and Engineering*, 357 (1-2): 159-167.
- [36] **Wu, P.C., Chang, C.P., Kao, P.W.**, (2004). “The distribution of dislocation walls in the early processing stage of equal channel angular extrusion”, *Materials Science and Engineering*, 374 (1-2): 196–203.
- [37] **Wessel, J. K.**, (2004). “Handbook of advanced materials Enabling New Designs”, Wiley- Interscience Publication, Wessel, J. K., USA, 321-328.
- [38] **Sun, Y.**, (1998). “Yaşlanabilir Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 85- 88.
- [39] **Turhan, S.**, (2002). “Alüminyumun Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışlarına Magnezyumun ve Silisyumun Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 63-66.
- [40] **Baker, H.**, (1990). “ASM Handbook, Alloy Phase Diagrams, Vol. 3”, ASM International, Park, USA, 279-337.
- [41] **Aytaç, A.** (2000). “Eşit Kanal-Açısal Presleme Yöntemi ile 7075 Alüminyum Alaşımlarında Nano Boyutlu Tane Üretimi ve Mikroyapısal Karakterizasyonun Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [42] **Mateja Šnajdar Musa, Zdravko Schauerl**, (2013). “ECAP – New consolidation method for production of aluminium matrix composites with ceramic reinforcement”, *Processing and Application of Ceramics 7 [2]* (2013) 63–68, DOI: 10.2298/PAC1302063S.
- [43] **Yahya BAYRAK, Rasit SEZER ve Ahmet EKERİM**, (2009). “Süper Plastik Şekil Değiştirmenin Alüminyum Malzeme Özelliklerine Etkisi” *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye.
- [44] **Koca A.**, (2014). “Eşit Kanal Açısal Yoğunlaşma/Presleme (EKAY /EKAP) Yöntemi İle Alüminyum Tozlarda İnce Taneli Yapının Üretilmesi Ve Bu Malzemenin Aşınma Direncinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [45] **Anibal de Andrade Mendes Filho\*, Erika Fernanda Prados, Gustavo Trindade Valio, José Benaque Rubert, Vitor Luiz Sordi, Maurizio Ferrante**, (2011). “Severe Plastic Deformation by Equal Channel Angular Pressing: Product Quality and Operational”, *Materials Research*. 2011, 14(3): 335-339, DOI: 10.1590/S1516-14392011005000045.
- [46] **Érika Ferananda Prados, Vitor Luiz Sordi, Maurizio Ferrante**, (2008). “Microstructural Development and Tensile Strength of anECAP - Deformed Al-4 wt. (%) Cu Alloy”, *Materials Research*, Vol. 11, No. 2, 199-205.

- [47] **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.
- [48] **R.A. Parshikov, A.I. Rudskoy, A.M. Zolotov and O.V. Tolochko,** (2013). “Technological Problems Of Equal Channel Angular Pressing”, Rev. Adv. Mater. Sci. 34 (2013) 26-36.



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Ömer Faruk KAHRİMAN

**Doğum Tarihi ve yeri** : 20/03/1989

**E-posta** : omerfkahriman@gmail.com

## ÖĞRENİM DURUMU:

**Lisans** : 2014, Fatih Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Genetik ve Biyomühendislik

**Yükseklisans** : 2017, İstanbul Aydın Üniversitesi, Makine  
Mühendisliği

