

**Alüminyum Alaşımlarının  
Aşırı Plastik Deformasyon İşlemleriyle Üretilmesi**

**Proje No: 105M174**

Prof. Dr. C. Hakan GÜR  
Prof. Dr. Bilgehan ÖGEL  
Prof. Dr. Haluk ATALA  
Prof. Dr. Şakir BOR  
Araş. Gör. Evren TAN

KASIM 2008 ANKARA

# ÖNSÖZ

Yüksek dayançlı alüminyum alaşımlarında hedeflenen dayanç seviyesi esas olarak çökeltme sertleşmesi ile sağlanmaktadır. Ancak, malzeme özelliklerinin optimize edilmesi, tane büyüklüğü kontrolü gibi diğer mekanizmaların da devreye alınmasını gerektirmektedir. Al alaşımlarının üretimi kapsamlı yatırım gerektiren büyük tesislerde mümkün olduğundan, alternatif üretim tekniklerinin geliştirilmesi üzerinde son yıllarda ciddi araştırmalar söz konusudur.

Bu projenin konusu alüminyum alaşımları için aşırı deformasyon sistemi tasarlamak, imal etmek ve bu sistemde deforme edilen malzemeleri karakterize etmektir. Bu kapsamda önce, imal edilecek deformasyon düzeneklerinin tasarıma yardımcı olmak ve deformasyona etki eden faktörleri irdelemek için sonlu eleman yöntemiyle modelleme çalışmaları yapılmıştır. Takiben, laboratuvar ölçekli olarak hem çubuk şeklinde hacimli parçaları deforme eden Eş Kanallı Açısal Presleme (ECAP) sistemi hem de yassı mamulleri kesintisiz deforme edebilen Değişken Kanallı Açısal Presleme (DCAP) sistemi imal edilmiştir. Bu iki sistemde aşırı plastik deformasyon uygulanan 2024 (çubuk) ve 6061 (şerit) Al-alaşımı numuneler, metalografi (SEM, TEM), X-ışınları kırınımı ve çeşitli mekanik deneyler yardımıyla incelenmiştir.

105M174 numaralı bu proje Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı (1001) kapsamında desteklenmiştir. 01/05/2006 tarihinde başlayan proje dört aylık uzatma ile 01/09/2008 tarihinde tamamlanmıştır. "6xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarının Boyut Değiştirmeksizin Yoğrunma Yöntemi ile Üretimi" olan proje ismi, 28/03/2008 tarihli kurumunuz onayı ile "Alüminyum Alaşımlarının Aşırı Plastik Deformasyon İşlemleriyle Üretilmesi" olarak değiştirilmiştir. Proje Orta Doğu Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde Prof. Dr. C. Hakan Gür tarafından yürütülmüştür. Prof. Bilgehan Ögel, Prof. Şakir Bor, Prof. Haluk Atala ve Araş. Gör. Evren Tan'ın araştırmacı olarak görev aldığı proje süresince; farklı dönemlerde Caner Şimşir, Göktürk Emre Uzunçakmak, Ebru Saraloğlu ve Sadık Bayramoğlu yardımcı personel olarak görev yapmıştır. Proje kapsamında elde edilen bulgular uluslararası dergilerde yayınlanmış ve yurtiçi/yurtdışı uluslararası kongrelerde sözlü/poster olarak sunulmuş; diğer ülkelerde bu alanda çalışan bilim insanlarıyla ortak çalışmalar yapılabilmesi için bağlantılar kurulmuştur.

Projeye katkılarından dolayı TÜBİTAK ve ODTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne; cihaz üretimi ve tasarımı konusunda Ünal Pehlivan başta olmak üzere LAMASAN A.Ş.'ye ve kesintisiz sistem üretimi için Yeter Makine'ye teşekkürlerimizi sunarız.

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	vi
ÖZET .....	x
ABSTRACT .....	xi

<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>2</b>
2.1. Genel Bakış .....	2
2.2. Eş Kanallı Açısal Presleme (ECAP) .....	2
2.3. ECAP Yönteminde İç Yapı ve Malzeme Özellikleri .....	4
2.4. ECAP Sonrası Yaşlandırma .....	6
2.5. Yassı Mamüllerde Kesintisiz Üretim için Aşırı Deformasyon Yöntemi .....	9
2.6. DCAP Düzeneği .....	10
2.7. Literatürün Genel Değerlendirmesi.....	14
<b>3. GEREÇ ve YÖNTEM.....</b>	<b>16</b>
3.1. Modelleme Çalışmaları (Sonlu Eleman Analizi) .....	16
3.1.1. Eş Kanallı Açısal Presleme (ECAP) İşleminin Simülasyonu.....	16
3.1.2. 3-Boyutlu Analiz Yöntemi .....	18
3.1.3. Malzeme Özelliklerinin Etkisinin İncelenmesi .....	19
3.1.4. Malzeme Sertleşme Mekanizmaları ve Hasar Oluşumu Etkilerinin İncelenmesi .....	20
3.2. Laboratuvar Ölçekli Kalıp (ECAP).....	23
3.2.1. Sistem Tasarımı ve Modernizasyonu .....	23
3.2.1.1. Dikey Eksenli Pres.....	23
3.2.1.2. Yatay Eksenli Pres.....	26
3.2.1.2.1. 120°lik 14x14mm kare kesitli kalıp.....	26
3.2.1.2.2. Çift 120°lik 18mm çaplı dairesel kesitli kalıp .....	27
3.2.1.2.3. Son Tasarım (120°lik 18mm çaplı dairesel kesitli kalıp) .....	28
3.2.2. Malzeme ve Isıl İşlem .....	30
3.2.3. Numunelerin Karakterizasyonu.....	31
3.2.3.1. X-Işınları Kırınımı (XRD).....	31
3.2.3.2. Mikroyapı İncelemeleri .....	31
3.2.3.3. Sertlik Ölçümleri .....	31
3.3. Kesintisiz Tezgah (DCAP).....	32
3.3.1. Sistem Tasarımı .....	32
3.3.1.1. Plakalar için Kesintisiz Üretim Sürecinin Simülasyonu.....	33
3.3.1.2. Kesintisiz Deformasyon Tezgahı (DCAP) İmalatı .....	35
3.3.1.3. Sistem revizyonları .....	37
3.3.1.4. Kesintisiz Tezgahta (DCAP) Sıcak İşlem Tasarımı .....	40

3.3.2. DCAP Numunelerinin Karakterizasyonu .....	42
3.3.2.1. Çekme Testi .....	42
3.3.2.2. Sertlik Taraması .....	42
<b>4. BULGULAR ve TARTIŞMA .....</b>	<b>43</b>
4.1. Modelleme Bulguları .....	43
4.1.1. Kalıp Geometrisinin Etkisi .....	43
4.1.2. Sürtünme Etkisi .....	46
4.1.3. 3-Boyutlu Analiz Karşılaştırması .....	48
4.1.4. Malzeme Özelliklerinin ve Köşe Boşluğu Oluşma Mekanizması Etkisi .....	49
4.1.5. Malzeme Sertleşme Mekanizmaları ve Hasar Oluşumu Etkileri .....	53
4.2. Laboratuvar Ölçekli Kalıp Bulguları (ECAP) .....	57
4.2.1. Tasarım Sürecinde Elde Edilen Bulgular .....	57
4.2.2. Sistemik Deneyler .....	62
4.2.2.1. X-Işını Kırınımı Ölçüm Sonuçları .....	63
4.2.2.2. Mikroyapı İncelemeleri .....	64
4.2.2.2.1. Optik Mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemeleri .....	64
4.2.2.2.2. Geçirim Elektron Mikroskobu İncelemeleri .....	66
4.2.2.3. Malzeme Sertliğindeki Değişim .....	71
4.3. Kesintisiz Tezgah (DCAP) Bulguları .....	73
4.3.1. Modelleme .....	73
4.3.2. DCAP İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisi .....	74
4.3.2.1. Kanallı Merdane .....	74
4.3.2.2. Dokulu Merdane .....	76
4.3.2.3. Kısmi Dokulu Merdane .....	77
<b>5. SONUÇLAR .....</b>	<b>79</b>
5.1. Modelleme .....	79
5.2. Laboratuvar Ölçekli Tezgah (ECAP) .....	80
5.3. Kesintisiz Tezgah (DCAP) .....	81
<b>6. PROJE ÖZDEĞERLENDİRMESİ .....</b>	<b>82</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>83</b>

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1	Analizlerde kullanılan K ve n değerleri.....	20
Çizelge 3.2	Çift açılı ECAP kalıbıyla elde edilen tecrübe.....	27
Çizelge 3.3	Deformasyon sırasında sistemde ölçülen yağ basıncı .....	29
Çizelge 3.4	Al-2024 alaşımı spektral analizi ve standart alaşım kimyasal kompozisyonu .....	30
Çizelge 3.5	Yaşlandırma sıcaklıkları ve süreleri. ....	30
Çizelge 3.6	Heckert analog sertlik cihazında kullanılan yükler. ....	31
Çizelge 4.1	Çözeltiye alınmış Al-2024 alaşımında matris ve inklüzyonların EDS analizleri.....	64
Çizelge 4.2	Çubuksu fazların kimyasal analizi (EDS) .....	66
Çizelge 4.3	Yaşlandırılmış Al-2024 alaşımı çökeltisinin kimyasal analizi (EDS).....	71
Çizelge 4.4	Al-2024 alaşımının farklı koşullardaki sertlik değerleri.....	71
Çizelge 4.5	DCAP tezgahından geçirilmiş numunelerde sertlik değişimi.....	74
Çizelge 4.6	DCAP deformasyonu sonucu Al-6061 levhanın sertliğindeki gelişim .....	75
Çizelge 4.7	Her paso için uygulanan gerinim değerleri.....	76
Çizelge 4.8	Kısmi dokulu merdaneli DCAP deformasyonu sonucu Al-6061 levhanın sertliğindeki gelişim .....	77

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Şematik ECAP düzeneği [Matsuki vd. 2000].....	3
Şekil 2.2	Tekrarlı geçişte seçenekler [Nakashima vd. 2000; Furukawa vd. 1998].....	3
Şekil 2.3	6005 Alaşımında tek paso sonrası oluşan tane yapısı. [Chang ve Shan 2003].....	4
Şekil 2.4	Al 6061 alaşımında ECAP sonrası TEM görüntüleri (a)1 paso (b)4 paso (c) ECAP sonrası gerilim-gerinme diyagramları [Chung vd. 2002].....	5
Şekil 2.5	Vickers sertlik değerlerinin paso sayısına göre değişimi [Kim vd. 2001].....	5
Şekil 2.6	AlMgSi alaşımında ECAP yönteminde akma, çekme ve süneklik değerlerinin paso sayısına göre değişimi [Chang ve Shan 2003].....	6
Şekil 2.7	Farklı sayıda ECAP pasosu uygulanmış 6061 malzemede yaşlanma ile sertliğin değişimi (a)175°C (b)100°C [Kim vd. 2001].....	7
Şekil 2.8	6061 alaşımında gerilim-gerinme diyagramları [Kim vd. 2001].....	7
Şekil 2.9	6061 alaşımı için yaşlandırma ve ECAP sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi [Cai vd. 2004].....	8
Şekil 2.10	ECAP uygulanmış ve yaşlandırılmış Al-2024 alaşımı TEM mikroyapısı (a) Dislokasyon çevresindeki küçük çökelti, (b) Dengedeki S çökelti [Kim vd. 2003].....	9
Şekil 2.11	Al 6061 alaşımında S-N diyagramı [Chung vd. 2002].....	9
Şekil 2.12	Kesintisiz üretime uyarlanmış aşırı plastik deformasyon yöntemleri (a) Raab vd. 2004; (b) Saito vd. 2000; (c) Lee vd. 2002a.....	10
Şekil 2.13	Tekrarlanabilir tarzda deformasyonunu sağlayan kalıbın şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.14	Farklı açılardaki kayma deformasyon deseni optik mikroskop görüntüleri (a) $\phi=100^\circ$ (b) $\phi=110^\circ$ (c) $\phi=120^\circ$ (d) $\phi=130^\circ$ [Han vd., 2004c].....	11
Şekil 2.15	Al-1050 alaşımlarının DCAP sonrası mikroyapı durumu [Lee vd., 2001] (a) Kayma deformasyonu desenlerinin optik mikroskop görünümü, (b) A bölgesindeki tane yapısının optik mikroskop görünümü (DCAP öncesi), (c) B bölgesindeki tane yapısının optik mikroskop görünümü (DCAP sonrası), (d) TEM aydınlık alan görüntüsü ve seçilmiş alan kırınım örgesi ile DCAP sonrası hücre yapıları, (e) SEM ile DCAP sonrası kenar yüzeylerdeki kayma bantları yönünün görünümü.....	12
Şekil 2.16	DCAP paso sayısına (N) bağlı tane yapısındaki değişim [Lee vd., 2003b] (a) N=1 ( $\epsilon=0.6$ ), (b) N=2 ( $\epsilon=1.2$ ), (c) N=3 ( $\epsilon=1.7$ ), (d) N=5 ( $\epsilon=2.9$ ), (e) N=9 ( $\epsilon=5.2$ ), (f) N=70 ( $\epsilon=40.6$ ).....	13
Şekil 2.17	7050 alaşımı TEM görüntüleri ve çökeltilerin etkisi (Nam vd. 2003) (a) 2 DCAP pasosu sonrası (b-e) 2 DCAP pasosundan sonra 250°C'de 30 dakika ısıtılmış. ....	13
Şekil 2.18	Çökeltilerin DCAP sonrası mikroyapı değişimine etkisi (Nam vd. 2003) (a) 6 DCAP pasosundan geçmiş 7050, (b) Geniş plaka şeklinde MgZn <sub>2</sub> çökeltilerinden kırılarak oluşmuş ince küresel çökelti.....	14
Şekil 2.19	Aşırı plastik deformasyonun mekanik özellikleri etkisi [Horita vd. 2001].....	15
Şekil 2.20	Al alaşımlarında aşırı plastik deformasyon sonrasında tane büyüklüğünün tavlama sıcaklığı ile değişimi [Horita vd. 2001].....	15

Şekil 3.1	ECAP düzeneğinin şematik gösterimi.....	16
Şekil 3.2	Tipik bir ECAP sistemi ve malzemenin işlem sırasındaki davranışı.....	19
Şekil 3.3	Orowan mekanizması ve kinematik sertleşme mekanizması ile olan ilişkisi.....	21
Şekil 3.4	ECAP düzeneği (a) 30 ton kapasiteli dikey eksenli hidrolik pres, (b) 90° ECAP kalıbı .....	23
Şekil 3.5	6066 numunelerde tek pasoluk deformasyon denemeleri .....	24
Şekil 3.6	5083 Al-alışımı numunelerin ECAP öncesi ve sonrası fotoğrafları .....	24
Şekil 3.7	Numune yüzeylerinin kodlanması .....	25
Şekil 3.8	5083 Al-alışımında ECAP sonrası kare desenlerdeki değişim .....	25
Şekil 3.9	Yatay eksenli ECAP sistemi ve kalıbı.....	26
Şekil 3.10	Üretim sırasında çatlayan 14mmx14mm kare kesitli kalıp .....	26
Şekil 3.11	18mm çaplı Çift 120°lik ECAP kalıbı. ....	27
Şekil 3.12	Son sistemde başarıyla kullanılan Ø=18mm dairesel kesitli kalıp ve itki punç .....	28
Şekil 3.13	Aşırı basınç yükselmesi sonucu ters ekstrüzyon ve numune sıkışması.....	29
Şekil 3.14	Kalıp içindeki şematik numune sıralaması.....	29
Şekil 3.15	Kalıptan başarıyla geçirilmiş örnekler.....	30
Şekil 3.16	Kesintisiz düzenek için ilk ECAP düzeneği tasarımı .....	32
Şekil 3.17	Kesintisiz düzenek için ikinci ECAP düzeneği tasarımı .....	33
Şekil 3.18	Kesintisiz üretim için DCAP düzeneği tasarımı.....	33
Şekil 3.19	Kesintisiz üretim için tasarılan çeşitli düzeneklerin şematik gösterimleri .....	35
Şekil 3.20	DCAP tezgahı.....	36
Şekil 3.21	DCAP düzeneği ve birimleri .....	36
Şekil 3.22	Numuneyi DCAP kalıbına süren merdane yüzeyinden görünüm .....	37
Şekil 3.23	DCAP tezgahından geçirilmiş saf alüminyum numuneler .....	37
Şekil 3.24	Dokulu merdane yüzeyi.....	38
Şekil 3.25	Alt-üst kalıbı sabitleyen çerçeve tasarımı.....	38
Şekil 3.26	6061 çekme testi numunesi (çekme deneyi öncesi ve sonrası) .....	38
Şekil 3.27	Son merdane yüzeyi ve hassas ayar için komparatörler .....	39
Şekil 3.28	DCAP düzeneğinin son hali .....	39
Şekil 3.29	DCAP sistemiyle üretilen numuneler (a) kanallı merdane, (b) dokulu merdane, (c) Kısmi dokulu merdane .....	40
Şekil 3.30	(a) Merdane öncesi polyamid numune yolu, (b) Tasarlanan fırınlı numune yolu....	41
Şekil 3.31	Fırın düzeneği ve kontrol ünitesi.....	41
Şekil 3.32	Fırınlı numune yolu iç şematik görünümü .....	41
Şekil 4.1	Sürtünmesiz durum için tipik plastik gerinme dağılımı ve köşe boşluğu oluşumu ..	44
Şekil 4.2	Sürtünmesiz durum için kalıp geometrisinin dikey kesitte plastik deformasyon homojenliğine etkisi (a) $\Phi=90^0$ , (b) $\Phi=120^0$ , (c) $\Phi=150^0$ .....	45
Şekil 4.3	Değişik sürtünme koşulları altında eşdeğer gerinme dağılımları : (a) $\mu=0$ , (b) 0.025, (c) 0.050, (d) 0.075, (e) 0.100, (f) 0.125, (g) 0.150.....	47
Şekil 4.4	Dik açılı kalıp için değişik sürtünme durumları için dikey kesit için eşdeğer gerinme dağılımları .....	47
Şekil 4.5	ECAP işlemi sırasında iş parçasında eşdeğer plastik gerinme dağılımı.....	48
Şekil 4.6	2 ve 3 boyutlu ECAP simulasyonları sonucunda merkez düzlemdeki eşdeğer plastik gerinmelerin karşılaştırılması.....	49
Şekil 4.7	ECAP işlemi sırasında eşdeğer plastik gerinme hızı dağılımı.....	50

Şekil 4.8	ECAP işlemi sırasında hız dağılımı.....	50
Şekil 4.9	Köşe boşluğu açısının ( $\alpha$ ) gerinme pekleşmesi üssü (n) ile değişimi .....	51
Şekil 4.10	Köşe boşluğu açısının ( $\alpha$ ) gerinme sertleşmesi çarpanı (K) ile değişimi.....	52
Şekil 4.11	Köşe boşluğu açısının ( $\alpha$ ) gerinme sertleşmesi çarpanı (K) ve üssü (n) ile değişimi .....	52
Şekil 4.12	Sertleşme mekanizmasının uygulanması gereken kuvvete olan etkisi.....	53
Şekil 4.13	ECAP sonrasında çeşitli sertleşme mekanizmaları için eşdeğer plastik gerinme dağılımı (a) izotropik, (b) kinematik, (c) kombine.....	54
Şekil 4.14	Malzemenin kesiti boyunca eşdeğer plastik gerinme dağılımı (a) birinci pasodan sonra, (b) ikinci pasodan sonra.....	54
Şekil 4.15	ECAP sırasında çeşitli sertleşme mekanizmaları için ilk pasodan sonra Cockcroft-Latham hasar indeksine göre malzemedeki hasar birikimi. (a) izotropik, (b) kinematik, (c) kombine.....	55
Şekil 4.16	ECAP sırasında, çeşitli sertleşme mekanizmaları için ikinci pasodan sonra Cockcroft-Latham hasar indeksine göre malzemedeki hasar birikimi. (a) izotropik, (b) kinematik, (c) kombine.....	55
Şekil 4.17	ECAP sırasında hidrostatik gerinme dağılımı .....	56
Şekil 4.18	Numunelerin farklı yönlerden fotoğrafları ve ortalama sertlik değerleri .....	57
Şekil 4.19	6066 Al-alaşımı numunelerde 450°C'de ısıtma süresine bağlı sertlik değişimi.....	58
Şekil 4.20	ECAP sonrası kesit alanda makro-sertlik dağılımı.....	58
Şekil 4.21	ECAP sonrası kesit alanda mikro-sertlik dağılımı: ölçme ve simulasyon sonuçları .....	59
Şekil 4.22	5083 Al-alaşımı numunelerde 415°C 'de ısıtma süresine bağlı sertlik değişimi.....	60
Şekil 4.23	5083 Al-alaşımı numunelerin ECAP öncesi ve sonrası fotoğrafları ve ortalama sertlik değerleri .....	60
Şekil 4.24	5083 Al-alaşımı numunede tek paso ECAP sonrasında yan kesitte desen değişimi	61
Şekil 4.25	6066 Al-alaşımı numunede tek paso ECAP sonrasında yan kesitte desen değişimi	62
Şekil 4.26	Sonlu eleman simülasyonunda elde edilen desen değişimi .....	62
Şekil 4.27	Uygulanan işlemlerin 2024 Al-alaşımı numunelerde (111) düzlemine ait x-ışını kırınım tepesine etkisi.....	63
Şekil 4.28	Tavllanmış ve ECAP uygulanmış örneklerin (111) düzlemi için x-ışını kırınım analizi .....	64
Şekil 4.29	Çözeltiyeye alınmış Al-2024 alaşımının mikroyapısı (a) Optik mikroskop (100X), (b) Tane boyutu dağılımı .....	65
Şekil 4.30	Çözeltiyeye alınmış Al-2024 alaşımının SEM altındaki görünümü .....	65
Şekil 4.31	Başlangıç konumundaki Al-2024 alaşımının TEM görüntüsü.....	66
Şekil 4.32	Çözeltiyeye alınmış Al-2024 alaşımının TEM mikroyapısı.....	67
Şekil 4.33	ECAP uygulanmış Al-2024 alaşımının TEM görüntüleri (a) Parlak alan (BF), (b) Karanlık alan (DF), (c) Seçilmiş alan elektron kırınımı (SAED).....	67
Şekil 4.34	ECAP uygulanmış Al-2024 alaşımında dislokasyon yapısı .....	68
Şekil 4.35	ECAP sonrası tavllanmış Al-2024 alaşımı (a-d) TEM mikroyapıları, (e) Hücre boyutu dağılımı.....	69
Şekil 4.36	Çözeltiyeye alma sonrası deforme edilmeden yaşlandırılan Al-2024 (a), (c) Karanlık alan (DF) görüntüsü, (b), (d) Aydınlanma alan (BF) görüntüsü.....	70
Şekil 4.37	Çözeltiyeye alma sonrası ECAP uygulanmış ve yaşlandırılan Al-2024 TEM mikroyapısı .....	71



Şekil 4.38	2024 Al-alaşımı numunelerde ECAP sonrası yaşlandırma süresine bağlı sertlik değişimi .....	72
Şekil 4.39	DCAP prosesinde malzeme yüzeyindeki gerinim değişiminin FEM analizi .....	73
Şekil 4.40	DCAP paso sayısına göre Al-6061 levha sertliğindeki değişim .....	76
Şekil 4.41	Al-6061-T6 numune için DCAP öncesi ve sonrası çekme deneyi sonuçları .....	77
Şekil 4.42	Tavlanmış konumdaki Al-6061 numune için DCAP öncesi ve sonrası çekme deneyi sonuçları .....	78

## ÖZET

Yüksek dayançlı alüminyum alaşımından mühendislik parçalarının üretimi, kapsamlı yatırım gerektiren büyük tesislerde termo-mekanik işlemlerle mümkün olmaktadır. Bu işlemlerin tane boyutunu ancak 10 mikrona kadar düşürebilmesi ve işlem parametrelerinin her alaşım için yeniden ayarlanma gerekliliği dezavantaj olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, Al alaşımları için alternatif imalat tekniklerinin geliştirilmesi için son zamanlarda çok sayıda araştırma yapılmıştır. Çalışmalar, aşırı plastik deformasyon ile çok ince taneli iç yapı elde edilerek, Al-alaşımlarının mukavemetinde önemli artış sağlanabildiğini göstermiştir.

Bu projenin konusu, alüminyum alaşımları için laboratuvar ölçekli aşırı plastik deformasyon sistemleri tasarlayıp imal etmek ve elde edilen numuneleri karakterize etmektir. Projede gerçekleştirilenler aşağıda aşamalı olarak özetlenmiştir:

- Önce, imal edilecek deformasyon düzeneklerinin tasarıma yardımcı olmak ve deformasyona etki eden faktörleri irdelemek için sonlu eleman analizi yöntemiyle modelleme çalışmaları yapılmıştır. İşlem parametrelerinin (kalıp geometrisi, sürtünme katsayısı) ve deforme edilen malzeme özelliklerinin (deformasyon pekleşmesi parametreleri/mekanizmaları ve deformasyon hızı hassasiyeti) işlem performansına etkileri incelenmiştir. Ayrıca malzeme sertleşme mekanizmaları ve hasar oluşumunun deformasyona uğrayan malzeme üzerine etkileri tartışılmıştır.
- İkinci aşamada, çubuk şeklinde hacimli parçaları deforme eden Eş Kanallı Açısız Presleme (ECAP) sistemi tasarlanıp imal edilmiştir. ECAP sistemi kullanılarak deforme edilen çeşitli alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerindeki ve mikroyapısındaki değişimler incelenmiştir.
- Son aşamada, elde edilen tecrübeler ışığında, yassı mamulleri kesintisiz deforme edebilen Değişken Kanallı Açısız Presleme (DCAP) sistemi tasarlanıp imal edilmiştir. Farklı sayıda pasodan geçirilen 6061 Al-alaşımı numunelere sertlik ve çekme deneyleri uygulanarak, DCAP paso sayısına bağlı olarak yüksek mukavemetli, ince taneli alüminyum levha üretilebilirliği incelenmiştir.

### **Anahtar Kelimeler:**

Aşırı Plastik Deformasyon, Eş Kanallı Açısız Presleme (ECAP), Değişken Kanallı Açısız Presleme (DCAP), Al-2024 ve Al-6061 alaşımları, Yaşlandırma, Sonlu Eleman Analizi, Geçirim Elektron Mikroskopisi

## ABSTRACT

Industrial products of high-strength Al-alloys are currently manufactured by thermo-mechanical processes, which are only applicable in the integrated plants requiring high investment cost. Moreover, reduction of the average grain size not less than 10  $\mu\text{m}$  and re-adjustment of process parameters for each alloy type is evaluated as disadvantage. Therefore, recently there have been many research studies for development of alternative manufacturing techniques for aluminum alloys. Research activities have shown that it is possible to improve the strength of Al-alloys remarkably by severe plastic deformation which results in ultra-fine grain size.

This project aims to design and manufacture the laboratory scale set-ups for severe plastic deformation of aluminum alloys, and to characterize the severely deformed samples. The stages of the project are summarized below:

- First, for optimization of die design and investigation of parameters effecting the deformation finite element modeling simulations were performed. The effects of process parameters (die geometry, friction coefficient) and material properties (strain hardening, strain-rate sensitivity) were investigated. Beside, the effects of strain hardening and failure mechanisms on the severely deformed samples were discussed.
- Next, Equal Channel Angular Pressing (ECAP) system that can severely deform the rod shaped samples were designed and manufactured. The variations in the microstructure and mechanical properties of 2024 Al-alloy rods deformed by ECAP were investigated.
- Finally, based on the experience gained, a Dissimilar Channel Angular Pressing (DCAP) system for severe plastic deformation of flat products was designed and manufactured; then, 6061 Al-alloy strips were deformed. By performing hardness and tension tests on the strips that were deformed by various passes, the capability of the DCAP set-up for production of ultra-fine grain sized high-strength aluminum flat samples were investigated.

### **Keywords:**

Severe Plastic Deformation, Equal Channel Angular Pressing (ECAP), Dissimilar Channel Angular Pressing (DCAP), Al-2024 and Al-6061 Alloys, Aging, Finite Element Analysis, Transmission Electron Microscopy

# 1. GİRİŞ

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarında üretim, gerek entegre (Seydişehir) gerekse ince döküm (ASSAN ve benzeri) tesislerinde dökümle başlamaktadır. Bu süreç, entegre tesislerde sıcak deformasyon ve takiben soğuk deformasyon işlemini, ince döküm tesislerinde ise doğrudan soğuk deformasyon işlemini içermektedir. Gerekirse, son aşamada ısıl işlem uygulanmaktadır.

6xxx, 2xxx, 7xxx gibi yüksek dayançlı alüminyum alaşımları yüksek miktarda sıcak deformasyon işlemi gerektirdiğinden üretim ancak entegre tesislerde mümkün olmaktadır. Sıcak işlemin kontrollü bir program içerisinde yapılması yüksek dayançlı alüminyum alaşımlarının üretiminde bir zorunluluktur. Ön termo-mekanik işlem olarak isimlendirilen bu kontrollü program çoğu kez sıcak işlemle kısıtlı kalmamakta, benzer işlemlerin çözündürme sonrası evrede uygulanması (son termo-mekanik işlemler) elde edilecek özelliklerde etkili olmaktadır.

Bu çerçevede, ülkemizde yüksek dayançlı alüminyum alaşımlarının levha olarak üretimi yapılamamaktadır. Entegre yapısı ile Seydişehir, yüksek dayançlı Al alaşımı üretimine en yakın kuruluş olmakla birlikte tezgah kapasiteleri nedeni ile yüksek dayançlı alüminyum alaşımlarını üretememektedir.

Aşırı plastik deformasyon yöntemi yukarıda bahsedilen konvansiyonel teknolojiye alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Yöntem, kısaca istenilen kalınlığa indirilmiş yassı mamulün boyut değiştirmeksizin plastik deformasyonunu esas almaktadır. Bu yeni teknoloji, ince döküm tesislerinde veya küçük ölçekli işletmelerde yüksek dayançlı alüminyum alaşımlarının üretimini mümkün kılma potansiyeline sahiptir.

Bu projenin nihai amacı, yüksek dayançlı alüminyum alaşımı ara mamullerin, termo-mekanik işlemlerden daha basit ve daha düşük maliyetle ve daha iyi özelliklerde küçük ölçekli firmalarda da üretimini mümkün kılacak alternatif bir teknolojinin geliştirilmesi için temel oluşturmaktır. Alüminyum alaşımlarına aşırı plastik deformasyon tekniklerinin uygulanarak, termo-mekanik tekniklerle elde edilen dayanç değerlerinden daha yüksek değerlere ulaşılmasını hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen çalışma, çubuk ve plaka/şerit halindeki 2024 ve 6061 alüminyum alaşımları için aşırı plastik deformasyon düzenekleri tasarlamayı, imal etmeyi ve bu düzeneklerde deforme edilen numunelerin iç yapı değişimini ve mekanik özelliklerdeki iyileşmenin deneylerle incelenmesini kapsamaktadır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1. Genel Bakış

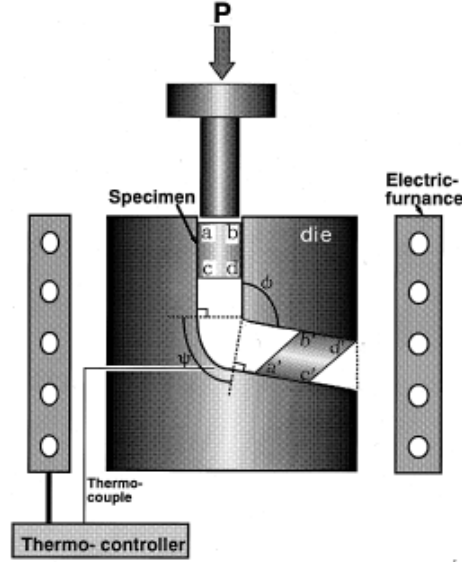
Alüminyum alaşımlarında hedeflenen yüksek dayanç seviyeleri esas olarak çökelme sertleşmesi ile sağlanmakla beraber özelliklerin optimize edilmesi için diğer mekanizmaların da devreye alınmasını gerekmektedir. Nitekim bu alaşımlarda tane büyüklüğünün kontrolü, termo-mekanik işlemlerin temelini oluşturmaktadır. Bu uygulamada, alaşımlara çökelme sertleşmesinde etkili olmayan elementlerden az miktarda eklenerek sıcak işlem sonrası küçük taneli yapı elde edilmektedir. Böylece, çözeltiye alma işleminde de tanelerin küçük kalmasını sağlamaktadır.

Bu konvansiyonel uygulamada, Al alaşımlarının üretimi ancak kapsamlı yatırım gerektiren büyük tesislerde mümkün olmaktadır. İç yapının kontrolü, kalın kesitli slabların kademeli haddelenmesi ile gerçekleştirilmekte ve deformasyonla malzeme kalınlığı çoğu kez 10:1 - 100:1 oranında azaltılmaktadır. Kapsamlı yatırım ihtiyacına ek olarak, Furukawa vd.nin (2002) belirtmiş olduğu gibi termo-mekanik işlemlerin iki dezavantajı vardır: Birincisi, tane boyutunun ancak 10 mikrona kadar düşürebilmesi; ikincisi termo-mekanik işlem parametrelerinin her alaşım için farklı ayarlanma gerektirmesidir. Özellikle birinci husus mevcuttan daha iyi özellikli alüminyum alaşımlarının elde edilmesinde ciddi bir engeldir. Nanometre boyutunda getirilecek tanelerle mevcuttan daha iyi kombinasyonda özelliklerin elde edilebileceğine inanılmaktadır.

Yukarıda bahsedilen hususlar nedeniyle, Al alaşımları için alternatif üretim tekniklerinin geliştirilmesi çabaları son yıllarda ciddi oranda artmıştır. Bu çabalar, hem ince döküm tesislerinin yüksek dayançlı alüminyum alaşımlarının üretimini mümkün kılınmasına hem de ince döküm veya entegre üretim çizgisinden bağımsız olarak ürün özelliklerinin iyileştirmesine odaklanmıştır. Araştırmalar, ağırlıklı olarak “aşırı plastik deformasyon” yöntemlerini esas almaktadır. Bu yöntemlerden alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulamalarının değerlendirilmesi Yamashita vd. (2000) tarafından yapılmıştır. Çeşitli yöntemler arasında, pratik uygulama potansiyeli ile Eş Kanallı Açısız Presleme (ECAP) dikkati çekmektedir. Böyle bir yöntemin varlığı uzun süredir bilinmesine rağmen, konuya ilgi son yıllarda yoğunluk kazanmıştır. Yöntemin özellikle alüminyum alaşımlarında geleneksel olarak uygulanan karmaşık termo-mekanik işlemlerin yerine geçmesi mümkün gözükmektedir.

### 2.2. Eş Kanallı Açısız Presleme (ECAP)

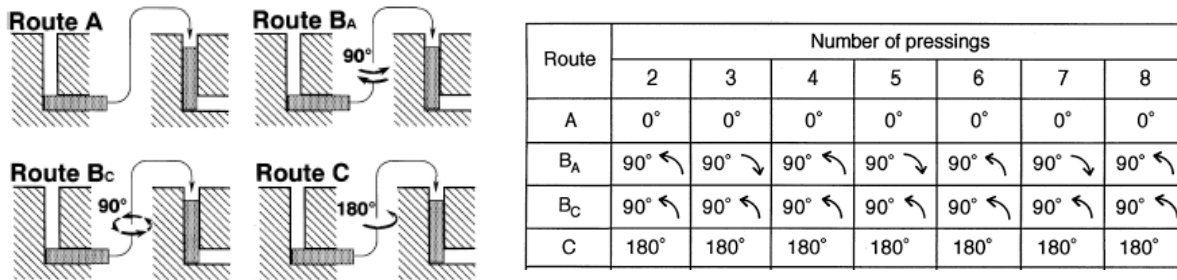
Eş Kanallı Açısız Presleme, Şekil 2.1’de görüleceği gibi, aynı kesite sahip -belirli bir açı ile birleştirilmiş ardışık- iki kanaldan malzemenin geçirilmesinden ibarettir. Yöntem kesit alanını değiştirmeden silindirik veya dörtgen kesitli kütük malzemeleri aşırı plastik deformasyona uğratmak amacıyla geliştirilmiştir. İlk kez, 1981 yılında Segal vd. (1995) tarafından önerilmiştir.



Şekil 2.1 Şematik ECAP düzeneği [Matsuki vd. 2000]

ECAP yöntemi, itme kuvvetini sağlayabilecek bir pres; kanallı bir kalıp ve gerektiğinde ısıtıcı bir fırından oluşmaktadır. Kalıp, belirli bir açıda kesişen eş kesitli iki ekstrüzyon kanalından oluşmaktadır. Numune kalıp kanalındaki açılı bölgeden geçtiğinde, yüksek miktarda kayma gerinmesine maruz kalmaktadır. Deformasyon türü olarak kayma, diğer klasik yöntemlerden çekme, basma, haddeleme vb farklı olarak niteliği gereği küçük taneli bir yapı oluşumuna neden olmaktadır. Aynı numunenin kalıptan tekrarlı olarak geçirilmesi ile gerinme artmakta ve ortalama tane büyüklüğü mikronaltı hatta nano boyutlarda tanelerin eldesi mümkün olmaktadır (Pithan vd. 2000). Laboratuvar ölçekli olan bu uygulama, deformasyonda kanal birleşim açısı  $\Phi$  ve köşe yarıçap açısı  $\psi$  nın (Şekil 1) etkin olduğunu göstermektedir. Nakashima ve grubu (1998) etkin tane inceltmede en iyi sonucun  $\Phi=90^\circ$  koşulunda elde edildiğini, her geçişte malzemeye verilen gerinmenin gerçek gerinme olarak  $\sim 1$  düzeyinde olduğunu belirtmiştir.

**Tekrarlı geçişte malzeme davranışı kanala besleme yönüne bağlıdır. En sık kullanılan dört yöntem** Şekil 2.2’de verilmektedir. Birincisinde malzeme olduğu gibi aynı yönde kalıp boşluğuna tekrar beslenmektedir; diğerlerinde ise kalıptan çıkan malzeme uzun eksenli boyunca belirli açılarla döndürülmektedir. Lee vd. (2003a), nispeten daha yüksek açılı tane sınırları oluşturduğundan,  $B_C$  yönteminin tane inceltme açısından en iyi sonucu verdiğini öne sürmektedir.



Şekil 2.2 Tekrarlı geçişte seçenekler [Nakashima vd. 2000; Furukawa vd. 1998]

Gerek kalıp, gerekse besleme parametreleri yoğun çalışma konusudur. Bu çalışmaların önemli bir kısmı sonlu eleman yöntemini kullanmakta ve optimum kalıp parametrelerinin belirlenmesini hedeflemektedir (Moon vd. 2002; Baik vd. 2003; Oh ve Kang 2003).

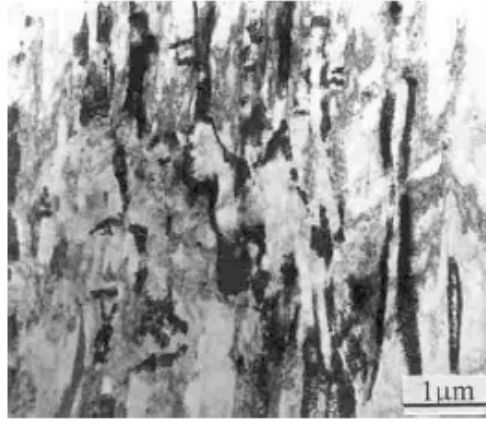
### 2.3. ECAP Yönteminde İç Yapı ve Malzeme Özellikleri

Son yıllarda yapılan çalışmalarla ECAP yöntemi birinci planda alüminyum ve alüminyum alaşımlarına takiben ise bakır, magnezyum, nikel, titanyum ve çeliklere uygulanmıştır. Özellikle çökelti sertleşmesi uygulanan 2xxx, 6xxx ve 7xxx serisi Al-alaşımlarında bu yöntemin, geleneksel termomekanik işlemlerin ne ölçüde yerini alabileceği irdelenmiştir.

ECAP yönteminin 2xxx serisi Al-alaşımlarına uygulanması hakkında çeşitli yayınlar mevcuttur (Mao vd. 2005; Kim vd. 2003; Lee vd. 2003a, Zheng vd. 2003; Horita vd. 2001). Lee vd., 2024 alaşımını T0 (su verilmiş) durumunda 8 kez kalıptan geçirerek toplam ~8 'lik gerçek gerinme uygulamışlardır. Oda sıcaklığında ve 100°C 'ta yapılan bu işlem sonucunda malzeme tane büyüklüğünün sırası ile 0.3 ve 0.5  $\mu\text{m}$  olduğunu tespit etmişlerdir. Diğer önemli husus ise malzemenin ısıl kararlılığıdır: 400–450°C 'de tavlama tane büyüklüğü 1  $\mu\text{m}$  'nin üstüne çıkmamıştır.

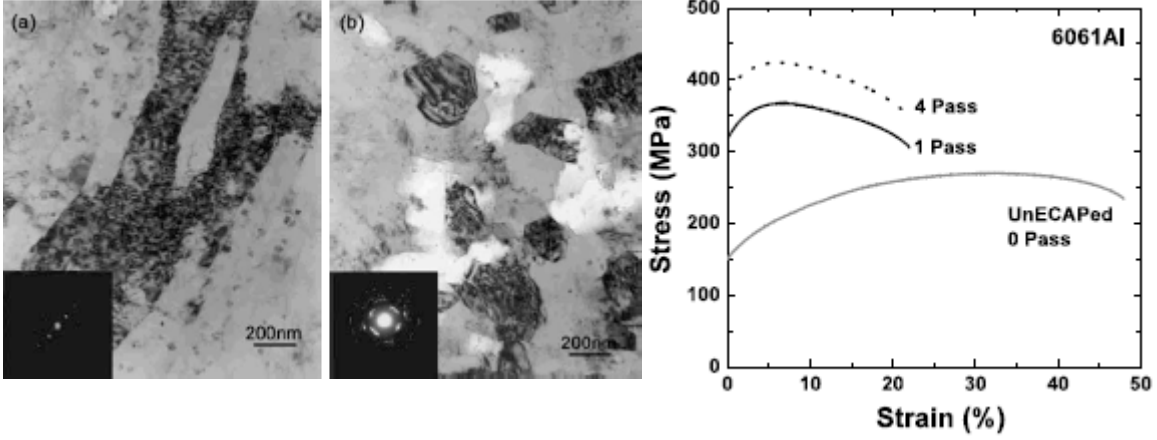
Benzer çalışmalar, 7xxx serisi için de gerçekleştirilmiştir (Zao vd. 2004, Xu vd. 2003, Zheng vd. 2003; Horita vd. 2001). Zheng vd. (2003), 20 mikron tane büyüklüğüne sahip 7050 alaşımı dört kez kalıptan geçirerek deforme etmişler ve bunun sonucunda yaklaşık 0.7  $\mu\text{m}$  büyüklüğünde taneler elde etmişlerdir. Aynı araştırmacılar yaşlandırma işlemi ile yoğrunma işlemi farklı kombinasyonlarda birleştirmişlerdir. Yapılan çalışma yoğrunma ile birleştirilmiş T6 konumunun klasik işlemden daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir. Bazı durumlarda dayanıktaki artış normal değerlerin üç katına ulaşabilmekte ve tek pasoluk yoğrunma çoğu kez yeterli olmaktadır.

6xxx serisi alüminyum alaşımlarında boyut değiştirmeksizin yoğrunma yöntemi Chang vd. 2003, Chang ve Shan 2003, Chung vd. 2002, Horita vd. 2001 ve Kim vd. 2001 tarafından incelenmiştir. Chang ve Shan (2003), 100  $\mu\text{m}$  tane büyüklüklü 6005 alaşımını tek pasoda deforme etmiş ve bunun sonucunda 0.3-0.4  $\mu\text{m}$  büyüklüğünde bir tane yapısı elde etmiştir. (Şekil 2.3).

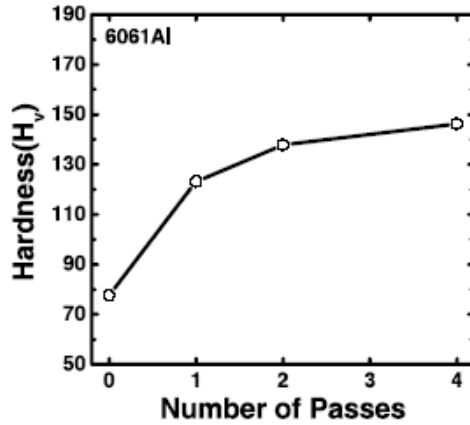


Şekil 2.3 6005 Alaşımında tek paso sonrası oluşan tane yapısı. [Chang ve Shan 2003]

Chung vd. (2002) benzer bir çalışmada paso sayısı ve bağlı olarak oluşan tane büyüklüğünün mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Bu çalışma özelliklerde (akma dayancında) birinci paso ile ciddi bir iyileşmenin gerçekleştiği, takip eden pasolarda etkinin daha az olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2.4). Kim vd. (2001) benzer bir gözlem yapmışlar, malzeme sertliğinin ilk pasoda 80 VSD den 120 VSD ye çıktığını takip eden pasolarda ise değerin (4. pasoda 150 VSD) daha az artış gösterdiğini tespit etmişlerdir (Şekil 2.5).



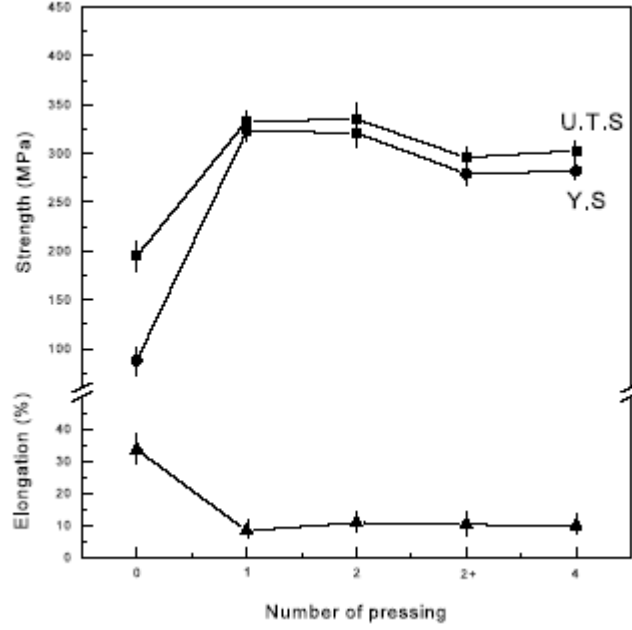
**Şekil 2.4** Al 6061 alaşımında ECAP sonrası TEM görüntüleri  
(a)1 paso (b)4 paso (c) ECAP sonrası gerilim-gerinme diyagramları [Chung vd. 2002]



**Şekil 2.5** Vickers sertlik değerlerinin paso sayısına göre değişimi [Kim vd. 2001]

Chang ve Shan (2003) her bir paso sonrası 180° döndürme içeren işleme uygulanan ECAP yöntemi ile malzeme akma çekme ve süneklik değerlerinin değişimini incelemiştir. Bu çalışma sonuçları Şekil 2.6'da verilmektedir. Gerek akma ve gerekse çekme değerleri yukarıda belirtilenlere uygun olarak birinci paso sonrası hızlı bir artış göstermekte takip eden pasoların etkisi daha az olmaktadır. Benzer durum süneklik için de geçerli olmakta ilk paso ile % 10'un altına düşen süneklik takip eden pasolarda belirgin bir değişim göstermemektedir.



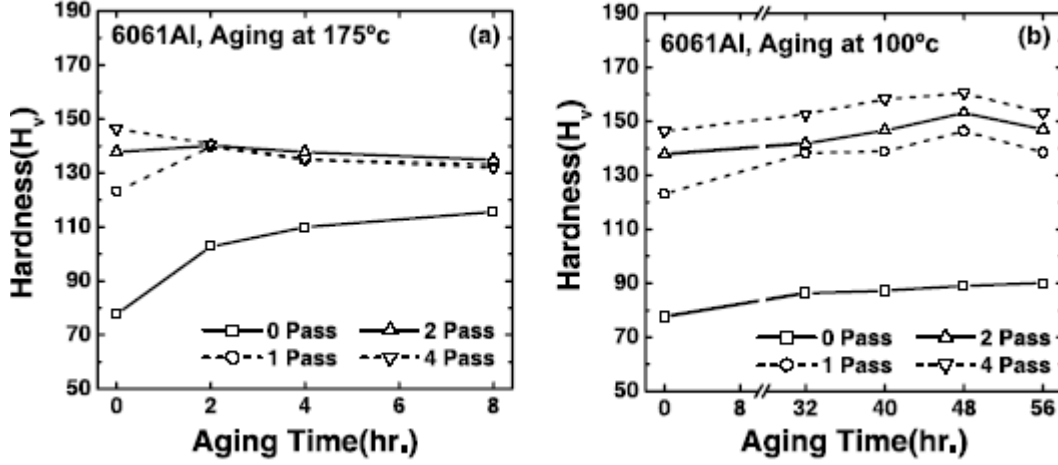


**Şekil 2.6** AlMgSi alaşımında ECAP yönteminde akma, çekme ve süneklik değerlerinin paso sayısına göre değişimi [Chang ve Shan 2003]

Yapılan çalışmalar çok pasolu ECAP yönteminin malzemede çatlak oluşturabileceğini gösterdiğinden, oluşan iyileşmenin büyük oranda tek pasoda gerçekleşmesi bir avantaj oluşturmaktadır. ECAP işleminin ılık sıcaklıklarda (100–125°C) yapılması ile çatlak oluşumunun engellenebileceği öne sürülmüştür (Chung vd. 2002). Yüksek sıcaklıklarda yapılan ECAP işleminin etkisi Chang vd. (2003) tarafından 6xxx alaşımlarında yapılan çalışmada, 100°C ve 300°C aralığında artan sıcaklıkla, ECAP ile malzeme dayancının düştüğünü saptanmıştır.

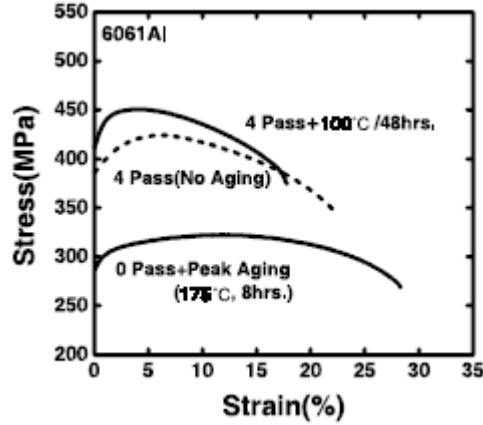
## 2.4. ECAP Sonrası Yaşlandırma

Yaşlandırılabilir alüminyum alaşımlarında ideal güçlendirme yapılabilmesi için ECAP ve yaşlandırma davranışının çeşitli kombinasyonlarla birleştirilmesine çalışılmıştır. Kim vd. (2001, 2002) ECAP sonrası malzeme yaşlanma davranışını 6061 alaşımında incelemiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.7’de verilmektedir. 175°C’de 2, 4 ve 8 saat yaşlandırma işlemi uygulanan alaşımların ölçülen sertlik değerlerinin verileri Şekil 2.7(a)’da verilmiştir. Bu sıcaklıktaki 8 saatlik yaşlandırma işlemi 6061 alüminyum alaşımı için azami yaşlandırma durumunu göstermektedir. ECAP uygulanmayan alaşımın sertliğindeki belirgin artış grafikte açıkça görülmektedir (%50, 8 saat). ECAP uygulanan alaşımlarda ise tam tersi davranış görülmekte ve sertlik değerleri zamanla düşmektedir. Bunun nedeni tavlama sonucunda aşırı deforme olmuş alt yapıdaki toparlanma ve/veya tane kabalaşmasının, yaşlandırma sonucunda çökme ile sertleştirmenin etkisini yok etmesidir. Tavlama sonucu oluşan yumuşamanın etkisini azaltmak için daha düşük sıcaklıkta yaşlandırma (100°C) uygulanmıştır. Şekil 2.7(b), 100°C’deki sıcaklıktaki yaşlandırma işleminin alaşımların mukavemeti üzerindeki etkisini göstermektedir. ECAP işlemi uygulanan bütün alaşımların sertlik değerlerinde artış olmuştur (%11-12%, 48 saat). ECAP uygulaması yaşlanma sıcaklığının uygun seçilmesini gerekli kılmaktadır.



Şekil 2.7 Farklı sayıda ECAP pasosu uygulanmış 6061 malzemede yaşlanma ile sertliğin değişimi  
(a)175°C (b)100°C [Kim vd. 2001]

Kim vd. (2001), 6061 alaşımına uygulanan ECAP+yaşlandırma işleminin T6 yaşlandırma pratiğinden daha üstün olduğunu göstermiştir. Şekil 2.8, 4 paso ECAP uygulanmış numunelerin çekme dayanımının standart T6 işlemine göre %40 daha iyi olduğunu göstermektedir.

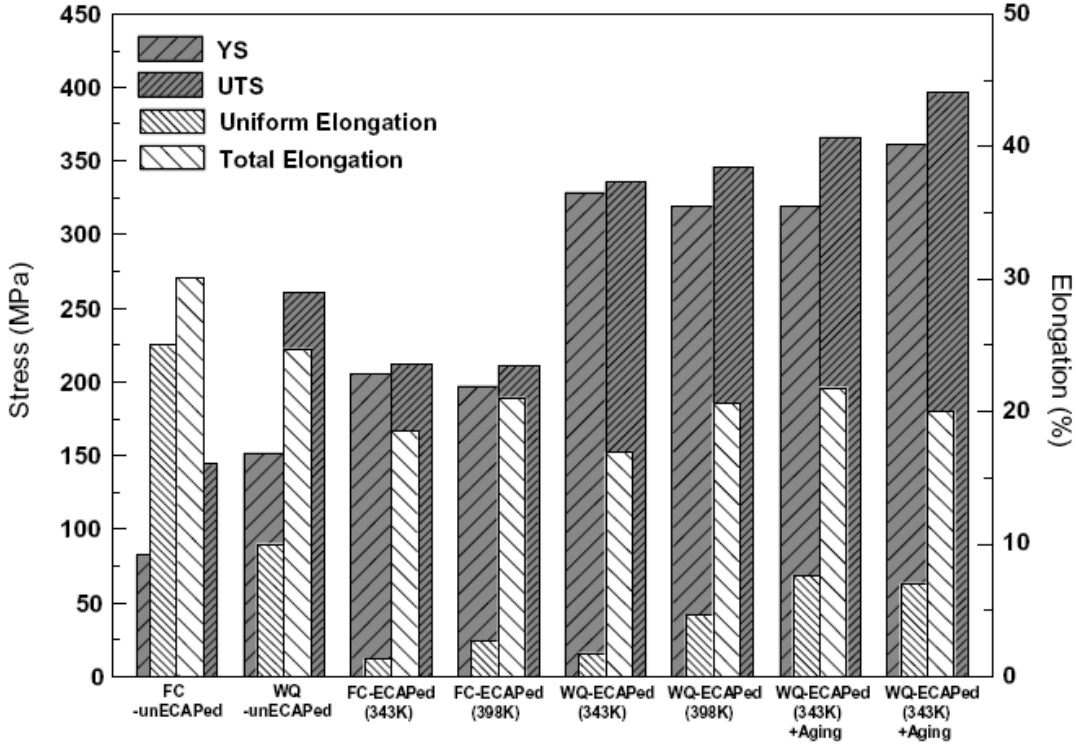


Şekil 2.8 6061 alaşımında gerilim-gerinme diyagramları [Kim vd. 2001]

Horita vd. (2001) yaptığı çalışmada ECAP paso sayısını arttırmak yerine yaşlandırılan örneklerin akma dayanımının daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Akma dayanımı, tek paso ECAP uygulanan 6061 alaşımının yaşlandırılmasıyla 210 MPa dan 325 MPa'a çıkarken sadece 6 paso ECAP uygulanan numunede 290 MPa düzeyinde kalmıştır.

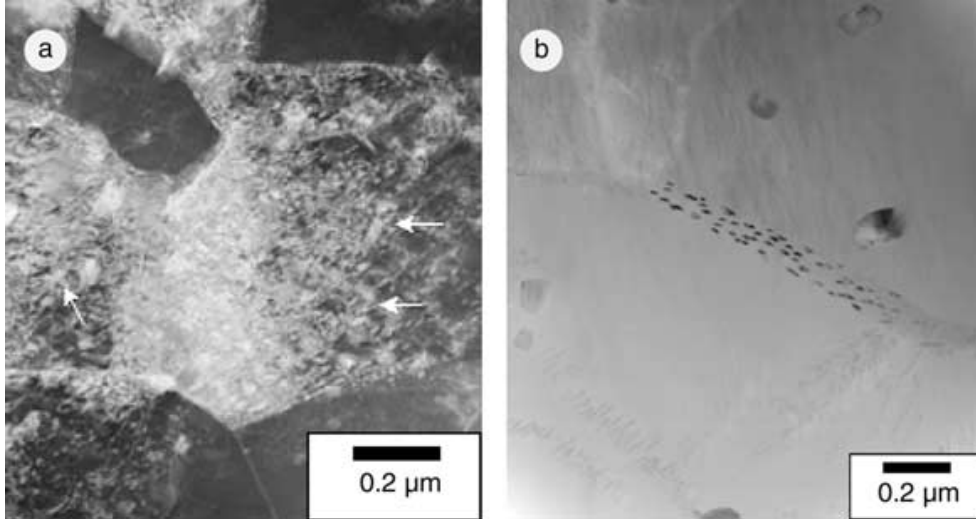
ECAP sonrası malzeme daha fazla kuvvetlenmekte; akma ve çekme dayanımları artmakta; alaşımın sünekliği ise azalmaktadır. Kim vd. (2005) tarafından yapılan ECAP sonrası yaşlandırma işlemiyle, alaşımın çökeltme sertleştirme yöntemiyle kuvvetlendirilebileceği ve aynı zamanda çekme esnekliği toparlanma etkisiyle iyileştirilebileceği görülmüştür. Bu iki (toparlanma ve çökeltme ile sertleştirme) olayın etkisi ECAP uygulanan alaşıma çok yüksek mukavemet ve makul miktarda süneklik sağlamaktadır.

Cai vd. (2004) sıcak ECAP sonucu oluşan yaşlanma durumu incelemiştir. 6061 numuneleri çözeltiye alındıktan sonra suda hızla (WQ) veya fırında (FC) yavaş soğutulmuştur. ECAP 343 K ve 398 K olmak üzere iki farklı sıcaklıkta ve tek paso olarak uygulanmıştır. WQ numuneleri ECAP sonrasında 373 K'de 48 saat yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 2.9'da verilen çekme deneyi sonuçlarına göre, 343K ECAP sonrası yaşlandırılan alaşımın akma direncindeki artış ihmal edilebilir düzeyde iken çekme dayanımındaki artış %10 civarındadır. 398K ECAP sonrası yaşlandırılan alaşımın akma ve çekme dayanımındaki artış %15 civarındadır. Bu sonuçlardan ECAP sonrası durgun yaşlandırmanın WQ-ECAP işlemi uygulanmış alaşımlarda mukavemetin artmasında etkili olduğu kanısına varılabilmektedir. FC-ECAP işlemi uygulanan alaşımında düzenli uzama miktarında belirgin bir düşme (%25'ten %1,2-2,7'ye); WQ-ECAP işlemi uygulanan numunede ise azalmanın daha az (%10'dan %1,7-4,6'ya) olduğu gözükmektedir. Yaşlandırma işlemi süneklığe etkisi incelendiğinde; WQ-ECAP uygulanan alaşımlarda uzamada daha fazla iyileşme sağlandığı (%1,7-4,6'dan %7-7,6'ya) görülmektedir.



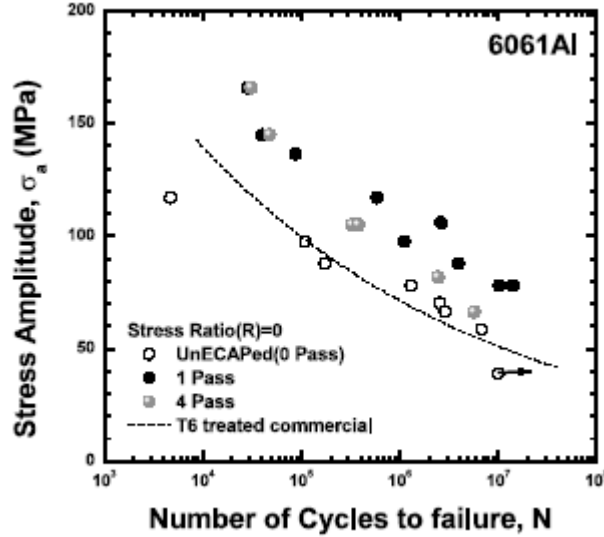
Şekil 2.9 6061 alaşımı için yaşlandırma ve ECAP sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi [Cai vd. 2004]

Kim vd. (2003) TEM analizleriyle ECAP sonrası yaşlandırmanın mikroyapıya etkisini incelemişlerdir. Al-2024 alaşımının ECAP sonrası 100°C 'de 20saat yaşlandırılması sonrası TEM görüntüleri Şekil 2.10'da sunulmuştur. Şekil 2.10(a)'da yüksek dislokasyon yoğunluğu ve dislokasyonlar çevresinde birikmiş iğnemi küçük çökelti gözükmektedir. Karanlık alan fotoğrafında beyaz taneler olarak gözüken çökelti okla işaretlenmiştir. Uygulanan sıcaklığın genel yaşlandırma sıcaklığından (170-180) düşük olması nedeniyle; çökelti S' (Al<sub>2</sub>CuMg) olamayacağı düşünülmektedir. Şekildeki çökelti küçük oluşu düşük yaşlanma sıcaklığına ve çekirdeklenme mevkisi oluşturan yüksek dislokasyon yoğunluğuna bağlanabilir. Şekil 2.10(b)'de Al-2024 alaşımı denge S çökeltisinin dağılım ve morfolojisi gözükmektedir.



**Şekil 2.10** ECAP uygulanmış ve yaşlandırılmış Al-2024 alaşımı TEM mikroyapısı  
**(a)** Dislokasyon çevresindeki küçük çökeltiler, **(b)** Dengedeki S çökeltileri [Kim vd. 2003]

ECAP yönteminin yorulma davranışına etkisi, Chung vd. (2002) tarafından 6061 alaşımı için araştırılmıştır. Aynı tekrarlı gerilim değerindeki kırılma öncesi tekrar sayısı; ECAP uygulanmış numunelerde bariz bir artış göstermektedir (Şekil 2.11). Tek paso ECAP uygulandığında, yorulma ömrü standart T6 işlemine göre 10 kat daha uzun olmaktadır.

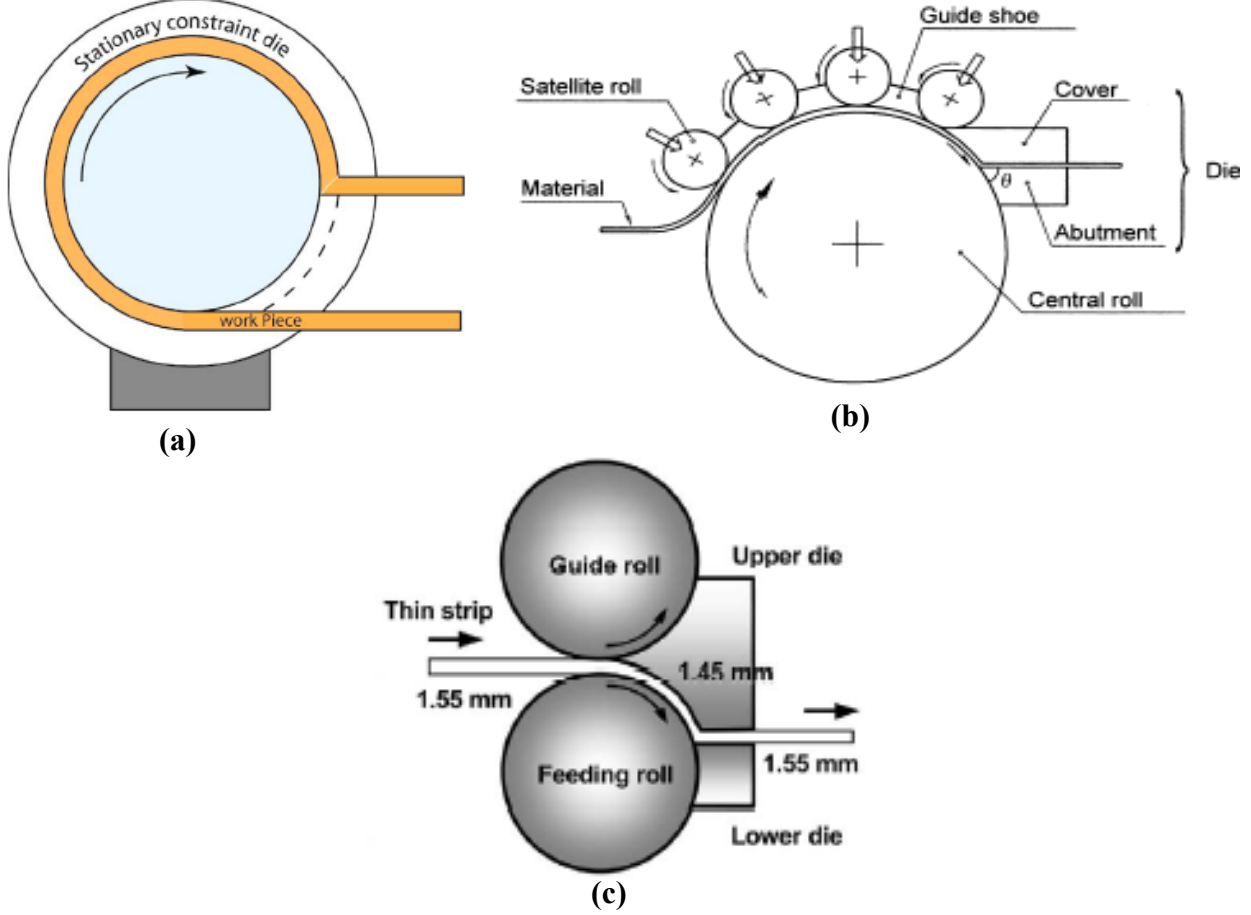


**Şekil 2.11** Al 6061 alaşımında S-N diyagramı [Chung vd. 2002]

## 2.5. Yassı Mamullerde Kesintisiz Üretim için Aşırı Deformasyon Yöntemi

Raab vd. (2004) tarafından önerilen sistemde, dışta sabit bir kalıp yer almakta ve bu kalıp içerisinde silindirik bir merdane dönmektedir. Malzemenin beslendiği kanal sabit kalıpta yer almakta ve malzeme bu şekilde dönen iç merdaneye beslenmektedir. Sürtünme kuvveti ile taşınan

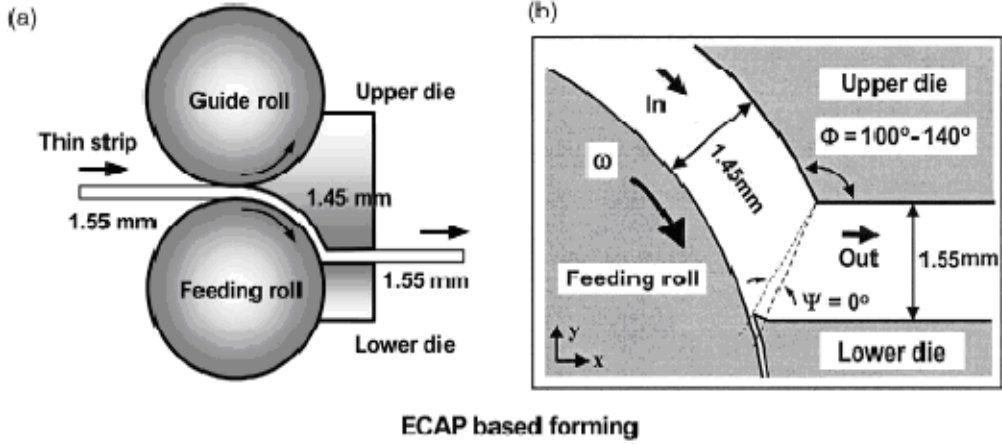
malzeme 270° lik bir dönme sonrası sabit kalıbı birinciye paralel hazırlanmış çıkış kanalından terketmektedir. Kare ve yuvarlak kesitli parçaların yanı sıra, kanalın uygun tarzda açılması ile levhaların da aşırı plastik deformasyonu mümkün olmaktadır (Şekil 2.12a). Bu yöntem her bir malzeme kalınlığı ve kesidi için ayrı tezgah gerektirmektedir. Nispeten kolay ayarlamalarla farklı kalınlıklara cevap verebilecek alternatif yöntemler Şekil 2.12b ve Şekil 2.12c’de gösterilmiştir.



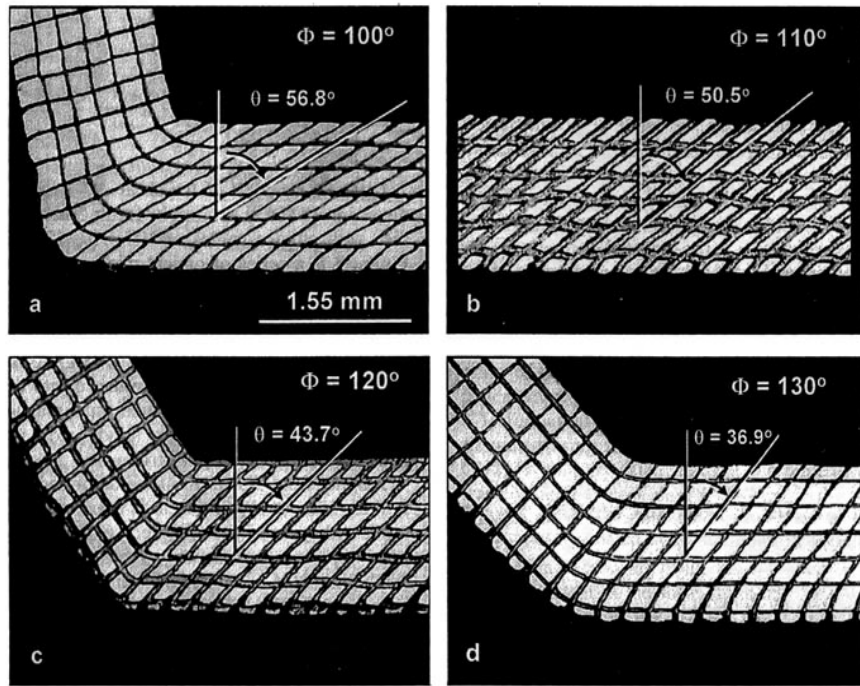
Şekil 2.12 Kesintisiz üretime uyarlanmış aşırı plastik deformasyon yöntemleri  
(a) Raab vd. 2004; (b) Saito vd. 2000; (c) Lee vd. 2002a

## 2.6. DCAP Düzenegi

Lee vd. (2002a), yassı mamullerin aşırı plastik deformasyonu için DCAP yöntemini geliştirmiş ve kalıp geometrisinin alüminyumun mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Tekrarlanabilir tarzda sürekli deformasyona imkan tanıyan özel bir kalıp (Şekil 2.13), 10 cm çapında bir besleme merdanesi ve bir kılavuz merdanesine sahiptir. Giriş ve çıkış kanallarının kesiştiği açı  $\phi$ , 100°-140° arasında değişmektedir,  $\psi$  açısı 0° olarak sabitlenmektedir. Lee vd. (2003b, 2002b) tarafından yapılan benzer çalışmalarda, metal besleme hızı 10-50 m/dak aralığında değiştirilmiş;  $\phi$  açısının değişimi mikroyapıyla ilişkilendirilmiştir. Şekil 2.14’de deformasyon açısının kayma deformasyon desenine ve doku durumuna etkisi gösterilmektedir.



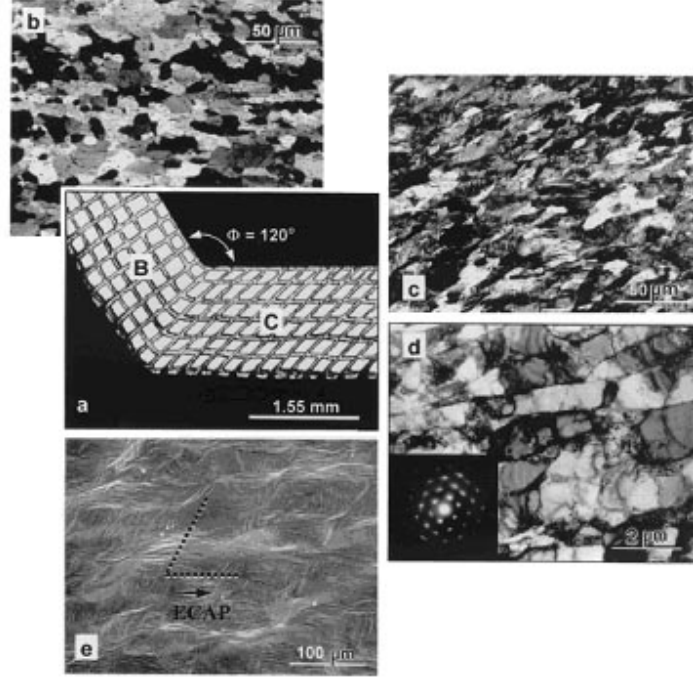
**Şekil 2.13** Tekrarlanabilir tarzda deformasyonunu sağlayan kalıbın şematik gösterimi



**Şekil 2.14** Farklı açılardaki kayma deformasyon deseni optik mikroskop görüntüleri  
(a)  $\phi=100^\circ$  (b)  $\phi=110^\circ$  (c)  $\phi=120^\circ$  (d)  $\phi=130^\circ$  [Han vd., 2004c]

ECAP ve DCAP sonrası alüminyum alaşımlarının doku değişimlerini karşılaştıran Han vd. (2004a, 2005a); belli bir noktaya kadar iki yöntemin çok farklı olmadığını, belli bir noktadan sonra ise DCAP yönteminde doku değişiminin zorlaştığı sonucuna varmışlardır. Jining vd. (2004) yaptıkları doku değişim analiziyle, düşük gerinme değerlerinde döndürülmüş küp  $\{001\} \langle 110 \rangle$  oluştuğunu ve yüksek gerinme değerlerinde yok olduğunu, fakat son kararlı bileşen  $\{112\} \langle 110 \rangle$  oluştuğunu saptamışlardır. Suh vd. (2003) ile Han vd. (2005b, 2004b) DCAP sonrası doku durumunun, parçanın deformasyon geçmişine ve başlangıçtaki doku durumuna önemli derecede bağlı olduğu tespit edilmiş ve bu amaçla oran hassasiyet formülasyonu tabanında sonlu eleman ve Taylor analizi yapmışlardır.

Lee vd. (2001) tek paso DCAP deformasyonunun 1050 alüminyum alaşımı mikroyapı değişimini incelemiştir. Şekil 2.15'de, alaşımlarının deformasyon bölgesini geçmeden önce ve sonraki mikroyapı durumu görülmektedir.



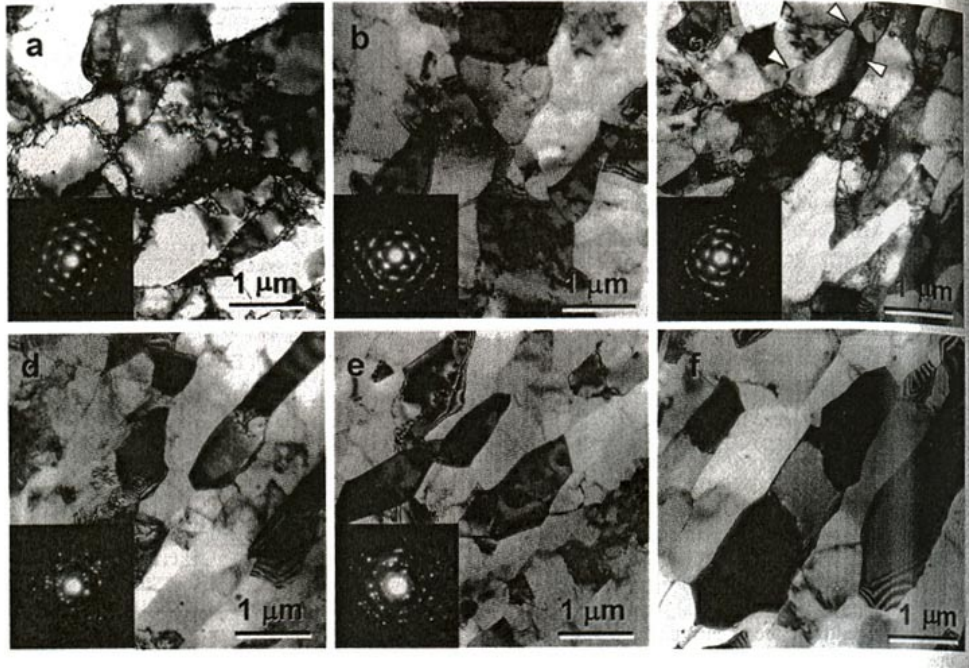
**Şekil 2.15** Al-1050 alaşımlarının DCAP sonrası mikroyapı durumu [Lee vd., 2001]

- (a) Kayma deformasyonu desenlerinin optik mikroskop görünümü,
- (b) A bölgesindeki tane yapısının optik mikroskop görünümü (DCAP öncesi),
- (c) B bölgesindeki tane yapısının optik mikroskop görünümü (DCAP sonrası),
- (d) TEM aydınlık alan görüntüsü ve seçilmiş alan kırınım örgesi ile DCAP sonrası hücre yapıları,
- (e) SEM ile DCAP sonrası kenar yüzeylerdeki kayma bantları yönünün görünümü

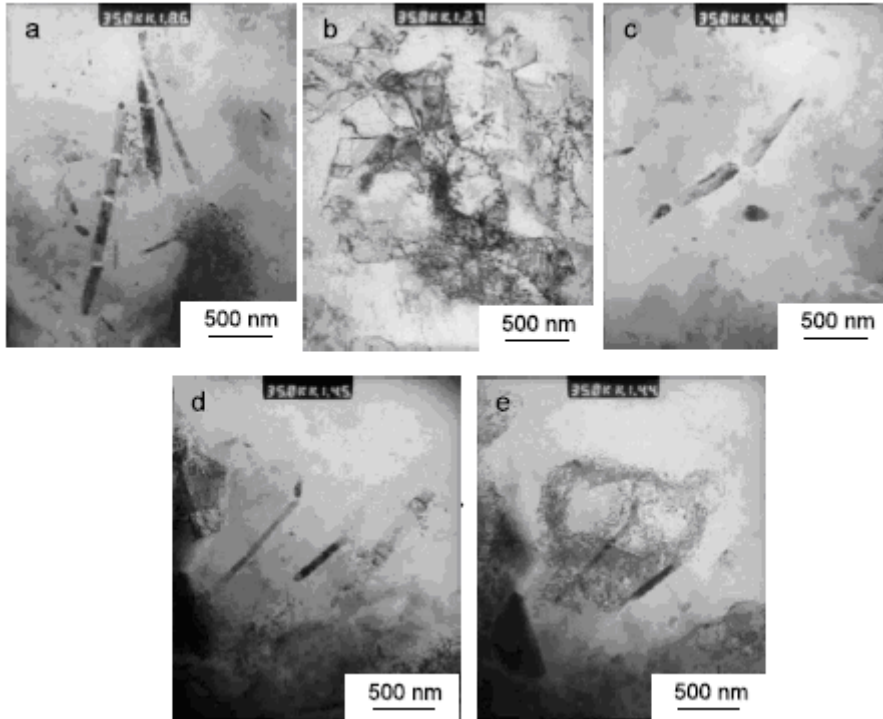
DCAP sisteminin bir diğer avantajı ise çoklu paso deformasyona izin vermesidir. Han vd.nin (2004c) birden fazla DCAP pasosunun etkisini inceleyen bir çalışmada, düşük gerinme miktarları için ( $\epsilon_{eff} < 5.8$ ) doku bileşenleri yoğunluklarının biriken gerinme ile değiştiği, fakat yüksek gerinme miktarlarında ( $\epsilon_{eff} > 5.8$ ) doku bileşenleri yoğunluğunda önemli bir değişim olmadığı rapor edilmiştir. Lee vd. (2003b) tarafından ise saf alüminyumda, düşük gerinme miktarının ( $\epsilon < 2$ ) sebep olduğu sertleşme ve aşırı yüksek gerinme miktarının ( $3 < \epsilon < 58$ ) sebep olduğu yumuşama araştırılmış ve mikroyapı ile ilişkilendirilmiştir. Şekil 2.16'da  $\phi=120^\circ$  için DCAP paso sayısına (N) bağlı olarak tane yapısındaki değişimin TEM görüntüleri verilmiştir.

Yaşlandırılabilir alüminyum alaşımlarının DCAP deformasyonu sırasında çökeltilerin malzeme özelliklerine etkisi de azımsanmayacak boyuttadır. Nam vd. (2003) 7050 alaşımı plakaların DCAP sırasındaki mikroyapı değişimine çökeltilerin etkisini incelenmiştir. Geniş plaka şeklinde  $MgZn_2$  ve ince küresel  $Al_3Zr$  çökeltilerinin ince taneli yapı değişiminde önemli rollerde buldukları tespit edilmiştir. (Şekil 2.17 ve Şekil 2.18).



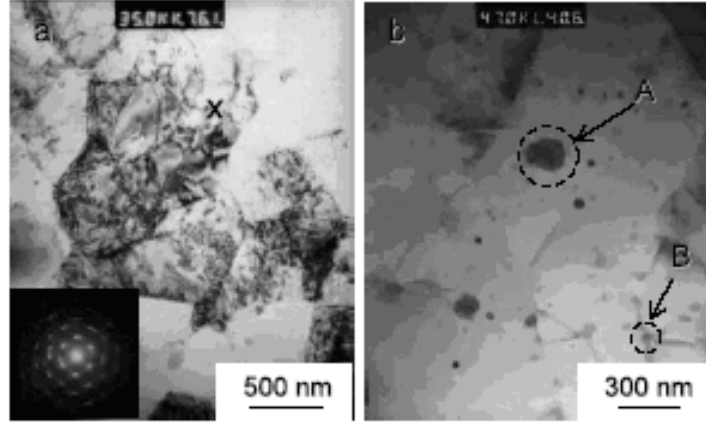


**Şekil 2.16** DCAP paso sayısına (N) bağlı tane yapısındaki değişim [Lee vd., 2003b]  
**(a)** N=1 ( $\epsilon=0.6$ ), **(b)** N=2 ( $\epsilon=1.2$ ), **(c)** N=3 ( $\epsilon=1.7$ ), **(d)** N=5 ( $\epsilon=2.9$ ), **(e)** N=9 ( $\epsilon=5.2$ ), **(f)** N=70 ( $\epsilon=40.6$ )



**Şekil 2.17** 7050 alaşımı TEM görüntüleri ve çökeltilerin etkisi (Nam vd. 2003)  
**(a)** 2 DCAP pasosu sonrası **(b-e)** 2 DCAP pasosundan sonra 250°C'de 30 dakika ısıtılmış.





**Şekil 2.18** Çökeltilerin DCAP sonrası mikroyapı değişimine etkisi (Nam vd. 2003)  
**(a)** 6 DCAP pasosundan geçmiş 7050,  
**(b)** Geniş plaka şeklinde  $MgZn_2$  çökeltilerinden kırılarak oluşmuş ince küresel çökeltiler

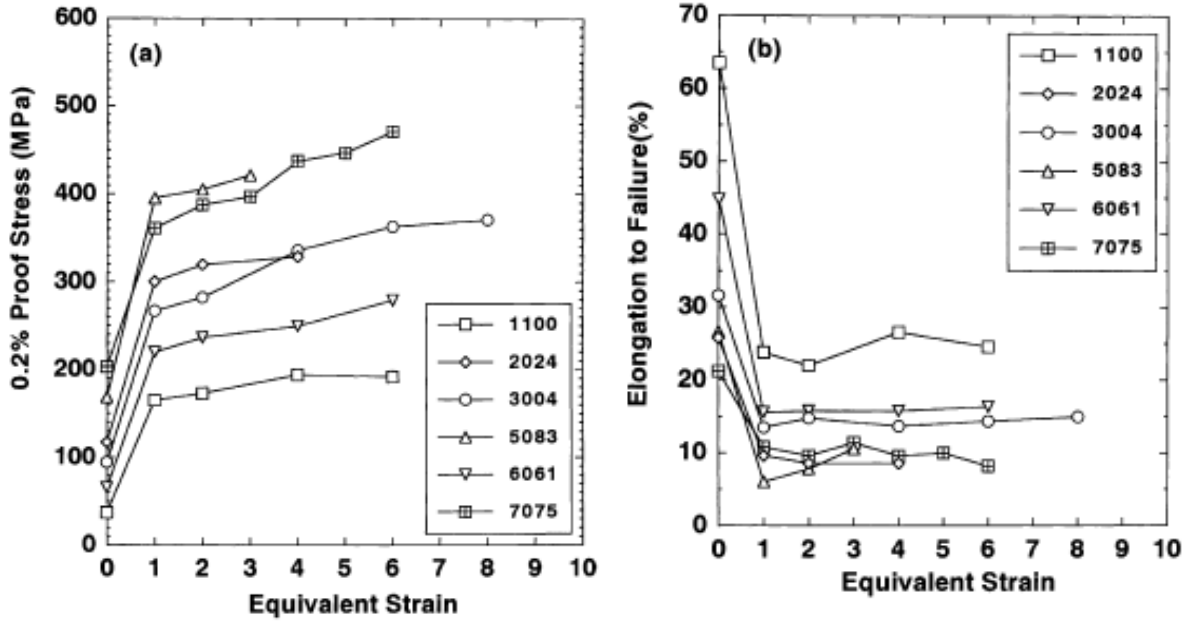
Han vd. (2008) tarafından yapılan bir diğer araştırma ise çok yüksek plastik gerinmenin etkilerini incelemektedir. DCAP sisteminde kayma deformasyonun oluşturduğu birikmiş gerinmenin şekillendirme ve düzlemsel eşyönsüzlük üzerindeki etkisi incelenmiştir. Malzemede 32 paso DCAP ile çok yüksek plastik gerinme ( $\epsilon_{eff} \sim 19$ ) elde edilmiştir. Doku ölçümleri sonucunda Lankford parametresi (r-value) hesaplanmış ve çok pasoluk geçiş sonucundaki doku oluşumunun şekillendirme ve düzlemsel eşyönsüzlük üzerine etkisi incelenmiştir.

## 2.7. Literatürün Genel Değerlendirmesi

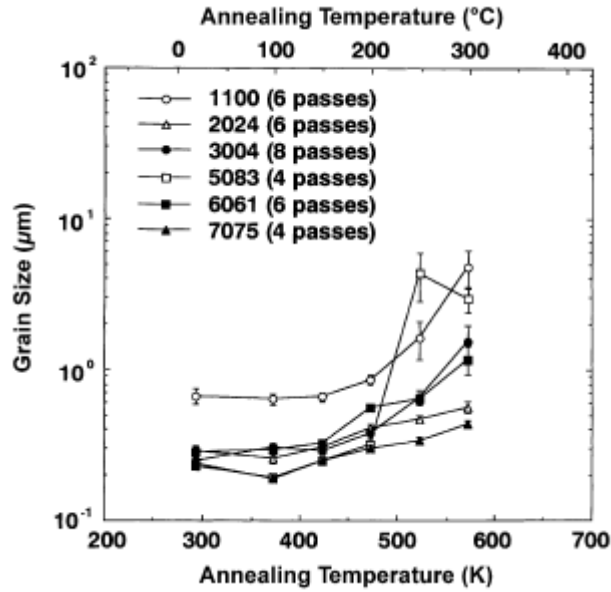
Yukarıda yapılan değerlendirmeden anlaşılacağı üzere mikron ve mikron altı seviyelerinde tane boyutu, yüksek dayanç ve sertlik, yorulma ömründeki iyileşme ve standart T6 işlemine göre belirgin avantajlar içermesi, gerek 6xxx serisi gerekse diğer yüksek dayançlı alüminyum alaşımları için (2xxx ve 7xxx) arzu edilen bir durumu ifade etmektedir. Bunu mümkün kılan aşırı plastik deformasyon yöntemlerinin alüminyum alaşımlarında sağlayacağı iyileşmeler Horita vd. (2001) tarafından özetlenmiştir.

Hemen hemen bütün alüminyum ve alüminyum alaşımlarında dayanç ilk paso ile artmakta, buna karşılık sünekliğin azaldığı gözlenmektedir (Şekil 2.19). Ancak, takip eden pasolarda dayançta az da olsa oluşan artış ve süneklikte bir değişikliğin olmaması, malzeme tokluğunda artışı işaret etmektedir. Kırılma tokluğunu konu alan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yöntemin diğer dikkat çekici bir yönü ECAP yöntemi ile malzeme tane yapısının ısıl kararlılığıdır. Çoğu malzeme  $200^\circ C$  'ye kadar tane büyüklüğünü muhafaza etmekte, bu sıcaklık 2xxx ve 7xxx serisi alaşımlarda  $300^\circ C$  'ye kadar çıkabilmektedir (Şekil 2.20).

Literatürdeki bilgiler, aşırı plastik deformasyon yöntemlerinin uygulanmakta olan termo-mekanik işlemlerin yerini alabileceğini göstermektedir.



Şekil 2.19 Aşırı plastik deformasyonun mekanik özellikleri etkisi [Horita vd. 2001]



Şekil 2.20 Al alaşımlarında aşırı plastik deformasyon sonrasında tane büyüklüğünün tavlama sıcaklığı ile değişimi [Horita vd. 2001]

### 3. GEREÇ ve YÖNTEM

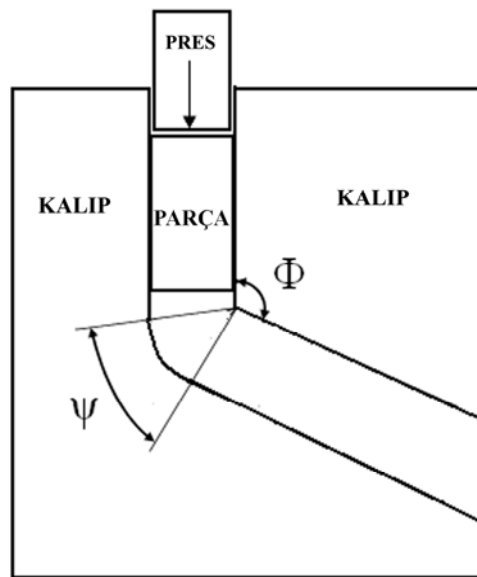
İlk olarak, imal edilecek laboratuvar ölçekli deformasyon düzeneklerinin tasarıma yardımcı olmak ve deformasyona etki eden faktörleri irdelemek için sonlu eleman yöntemiyle modelleme çalışmaları yapılmıştır. Takiben, önce çubuk şeklinde hacimli parçaları deforme eden Eş Kanallı Açısal Presleme (ECAP) sistemi; daha sonra yassı mamulleri kesintisiz deforme edebilen Değişken Kanallı Açısal Presleme (DCAP) sistemi imal edilmiştir. Bu iki sistemde aşırı plastik deformasyon uygulanan 2024 (çubuk) ve 6061 (şerit) Al-alışımı numuneler, metalografi (SEM, TEM), X-ışınları kırınımı ve çeşitli mekanik deneyler yardımıyla incelenmiştir.

Raporun bu kısmı; modelleme çalışmalarında kullanılan analiz yöntemlerini, ECAP ve DCAP sistemlerinin tasarım ve modernizasyon aşamalarını açıklamaktadır. Daha sonra, elde edilen örneklerin karakterizasyonu için uygulanmış olan inceleme metotları anlatılmaktadır.

#### 3.1. Modelleme Çalışmaları (Sonlu Eleman Analizi)

Proje kapsamında üretilmesi planlanan kesintisiz deformasyon tezgahı için, tasarım aşamasında önce ECAP yöntemi ele alınarak deformasyon mekanizmasının anlaşılması ve kesintisiz işlem tasarımı için temel oluşturulması hedeflenmiştir. Tasarım tamamlandıktan sonra devam edilen modelleme çalışmalarında malzeme özelliklerinin ve işlem parametrelerinin ECAP performansına etkisi incelenmiştir.

##### 3.1.1. Eş Kanallı Açısal Presleme (ECAP) İşleminin Simülasyonu



Şekil 3.1 ECAP düzenekinin şematik gösterimi

ECAP işlemi Şekil 3.1’de gösterilen bir düzenele gerçekleştirilmektedir. Sistem de eşit kalınlıktaki giriş ve çıkış kanalları iç kalıp açısı ( $\Psi$ ) ve dış kalıp açısı ( $\Phi$ ) ile belirtilen açılarda kesilmektedirler. Giriş kanalına beslenen metal parça, presle kontrol edilen bir şahmerdan yardımı ile deformasyon bölgesinden geçirilip, çıkış kanalına yönlendirilmektedir.

Kare kesitli kalıp düzeneğinde, kayma doğrusu alanı teorisinden yararlanılarak sürtünmesiz durum için ulaşılabilecek etkin gerinme miktarı bağıntı (3.1) ile hesaplanabilir (Segal vd. 1995). Tek pasoda elde edilecek gerinme miktarı sadece  $\Phi$  açısına bağlıdır.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cot(\Phi) \quad (3.1)$$

Daha sonra, Iwahashi vd. (1996) tarafından  $\Psi$  açısının etkisi de hesaba katılmış ve bağıntı (3.2) önerilmiştir.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ 2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \right] \quad (3.2)$$

Bu bağıntılar, ideal pekleşmeyen plastik malzemeler varsayımı ile elde edildiği için köşe boşluğu oluşumunu ve malzemenin deformasyon davranışına olan etkisini tahmin edememektedir. Sürtünme, deformasyon hızı hassasiyeti gibi parametrelerin etkisinin de analitik yöntemlerle tahmini mümkün değildir. Bu yüzden, sonlu elemanlar yöntemiyle modelleme yapılmıştır.

Aşırı plastik deformasyon işlemlerinde deformasyon homojenliği çok önemli bir parametredir. Zira, gerinme dağılımdaki homojenlik üniform tane boyutu ve şekli -üniform mekanik özellikler elde edebilmek için gereklidir. Homojenliği bozan herhangi bir etken aynı zamanda işlem sonucunda beklenen özelliklerin de kaybolmasına sebep olacaktır. Gerinme homojenliğinden uzaklaşmak aynı zamanda işlem tasarımı ile ilgili problemlere de yol açmaktadır. Homojen olmayan deformasyon çarpımlara ve malzeme içinde yüksek kalıntı gerilmelere sebep olmaktadır.

Çarpılma ve kalıntı gerilmeler, sonraki imalat süreçlerinde problemlere sebep olmaktadır. Özellikle bir kesiti diğer kesitlerine göre oldukça küçük olan plakalarda bu hayati önem taşımaktadır. Kalıntı gerilmeler kalıptan çıkan plakanın çarpılmasına ve bükülmesine sebep olmaktadır. Şekil bozulması ilave deformasyonla bir miktar düzeltilebilse de, sonraki imalat süreçleri için problem yaratmaktadır. Bu nedenlerle, elden geldiğince homojen yatay ve dikey plastik gerinme dağılımı elde etmek gerekmektedir. Bu problemin çözümü için kalıp ve işlem tasarımı anahtar işlevi görmektedir.

ECAP işleminde deformasyon homojenliğine malzeme özellikleri dışında işlem parametresi olarak kalıp geometrisi ve sürtünme katsayısı etki etmektedir. Bu nedenle, çeşitli kalıp geometrileri ve sürtünme katsayıları ile simülasyonlar gerçekleştirilerek optimum kalıp geometrisi ve sürtünme katsayısı belirlenmeye çalışılmıştır.

ECAP işleminin simülasyonu Msc.Marc yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Problemin basitleştirilmesi ve işlem zamanından kazanmak için “düzlemsel boyut değiştirme” varsayımı yapılarak problemin çözümü için sadece kalıp ve kütüğün ortasından geçen düzlem modellenmiştir. Aynı zamanda işlemin sabit sıcaklıkta gerçekleştiği varsayılmıştır. Literatürde (Pei vd., 2003) ECAP işlemi sırasında meydana gelen aşırı plastik deformasyondan ötürü sıcaklık artışı olduğuna dair gözlemler de mevcuttur. Fakat bu ön teorik çalışmada işlemin oldukça yavaş bir hızda gerçekleştirildiği (1 mm/s) ve kalıbın iyi yağlandığı ve soğutulduğu varsayılırsa bu yaklaşım kabul edilebilir hal almaktadır. Aynı zamanda bu işlemin proje kapsamında uygulanması öngörülen alüminyum alaşımlarının ısı iletkenliği oldukça yüksek olduğundan, yerel ısınmadan ötürü adiabatik kayma bölgelerinin de oluşması beklenmemektedir.

Deformasyonun düşük hızda gerçekleşmesi ve Al alaşımlarının oda sıcaklığında deformasyon hızı hassasiyetinin düşük olması nedeniyle deformasyon hızının malzeme özelliklerine olan etkisi ihmal edilmiştir. Çatlama, kırılma, yırtılma gibi durumların ön görülmesi için kullanılan hasar modellerine yer verilmemiştir. Bunun en önemli nedeni bu modellerin genel olarak üretim sürecine bağlı empirik bağıntılar olmasıdır. Gereken parametreleri bulmanın tek yolu ise çok sayıda deney yapmaktır. Bu yüzden, kalıp tasarımı yapmadan önce yapılan bir ön çalışma için uygulanabilir değildirlir.

İşlemin simülasyonu için yüksek dayançlı alüminyum alaşımlarını temsil eden varsayımsal bir malzeme tanımlanmıştır. Kullanılan malzeme modelinde

- elasto-plastik deformasyon davranışı gösterdiği,
- von Mises akma yüzeyi aracılığı ile elastik-plastik geçişinin belirlendiği,
- ilişkili akma kuralı aracılığı ile plastik akma vektörünün belirlendiği,
- malzemenin parçalı sürekli izotropik sertleşme kuralına göre pekleştiği

varsayılmıştır. Yüksek dayançlı alüminyum alaşımlarını temsil eden tipik değerler olarak, elastik modül 69 GPa, Poisson oranı 0.33 alınmış ve plastik bölgede gerilme-gerinme ilişkisi için bağıntı (3.3) kullanılmıştır.  $\bar{\sigma}$  ve  $\bar{\epsilon}$  sırasıyla etkin akma gerilmesi ve etkin plastik gerinmedir.

$$\bar{\sigma} = 150 + 250\bar{\epsilon}^{0,35} \quad (3.3)$$

### 3.1.2. 3-Boyutlu Analiz Yöntemi

2 boyutlu “düzlem gerinme (plane strain)” varsayımının doğrulanması amacı ile aynı parametrelerle simülasyonların bir kısmı 3 boyutlu olarak modellenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. 3 boyutlu simülasyonlar için 90° iç açılı kalıp kullanılmıştır. 50 mm x 10 mm x 10 mm boyutlarındaki iş parçası ortalama kenar uzunluğu 1 mm olan 5000 tane sonlu eleman ile modellenirken kalıp ve presin boyut değiştirmedikleri kabul edilmiştir. Çarpılma ve yüksek deformasyon etkilerinden ötürü “ağ örgüsünün tamamen yenilenmesi (global remeshing)” seçeneği etkinleştirilmiştir. Deformasyon bölgesinde hassasiyeti artırma amacı ile daha ince bir ağ örgüsü oluşturmak için uyarlamalı yöntemlere başvurulmuştur. 3 boyutta gerçekleştirilen simülasyonlar, iki boyutlu simülasyonlara göre 16-20 kat daha fazla zaman almıştır.

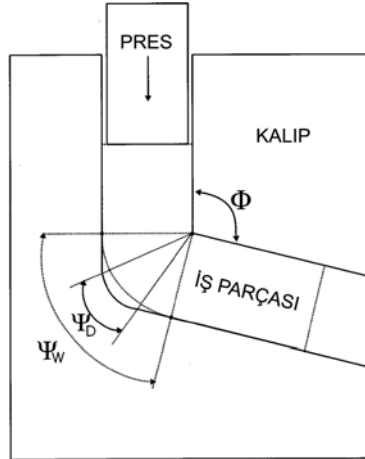
### 3.1.3. Malzeme Özelliklerinin Etkisinin İncelenmesi

ECAP performansı ve gerinme homojenliği üzerinde yapılan çalışmalarda kalıp geometrisinin etkisi sıkça incelenmiş olsa da, kullanılan malzemenin plastik deformasyon karakteristiklerinin deformasyon homojenliğine olan etkisi üzerinde yapılmış sistematik ve nicel sonuçlara dayanan bir çalışma literatürde mevcut değildir. Yapılan çalışmaların çoğunda malzemenin gerinme sertleşmesine uğramadığı var sayılmış veya uğradığı varsayılsa da malzeme özelliklerinin işlem performansına olan etkisi detaylı olarak irdelenmemiştir.

ECAP kalıp tasarımı yaparken işleme tabii tutulacak malzemenin özellikleri de göz önünde bulundurulmazsa tahmin edilen eşdeğer gerinme değerlerinde gözle görülür bir sapma meydana geleceği anlaşılmıştır. Örneğin, Iwamatho'nun bağıntısında eşdeğer boyut değiştirme bağıntı (3.4)'de belirtildiği üzere sadece iç ve dış kalıp açısına bağlıdır.

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ 2 \cot \left( \frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left( \frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right] \quad (3.4)$$

Oysa, Şekil 3.2'de görüldüğü üzere, gerinme pekleşmesine uğrayan malzemelerde köşe boşluğu oluşumu gözlemlenmektedir ve bu durum tahmin edilen eşdeğer boyut değiştirmeyi etkilemektedir. (3.4) numaralı bağıntıda kalıbın geometrik dış köşe açısı ( $\psi$ ) yerine malzemenin oluşturduğu köşe boşluğu açısı ( $\alpha$ ) konulursa tahmin edilen değerlerin gerçek değerlere daha çok yaklaştığı gözlemlenmiştir. Diğer bir deyişle, geometrik dış kalıp açısı malzemenin köşe boşluğu açısından küçük olduğu sürece sonuçları etkilememektedir. Aksi durumda ise sistemde ölü metal bölgesi oluşarak gerinme homojenliğini kötü etkilemektedir. Bu durumda, kalıbın dış köşe açısı için ideal değer malzemenin köşe boşluğu açısı olmalıdır. Bu hususun dikkate alınarak kalıp tasarımı yapılması işlemin performansını önemli ölçüde arttırabilir.



Şekil 3.2 Tipik bir ECAP sistemi ve malzemenin işlem sırasındaki davranışı.

Yukarıdaki husus göz önünde bulundurularak literatürdeki bu boşluğun doldurulması için sistematik bir sonlu elemanlar analizi çalışması gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, malzemenin plastik deformasyon özelliklerinin ECAP performansına etkisini açık bir şekilde ortaya çıkarmıştır.

Simulasyonlarda 90° iç açılı kalıp kullanılmış ve problem düzlem boyut değiştirme varsayımı yapılarak 2 boyuta indirgenmiştir. Bunların yanı sıra deformasyon hızı ve ısınma etkileri ihmal edilmiştir. 50 mm x 10 mm x 10 mm boyutlarındaki numune ortalama kenar uzunluğu 0.5 mm olan 2000 sonlu elemana bölünerek modellenmiştir. Ayrıca, önceki çalışmalara benzer şekilde kalıp ve presin deformasyonu ihmal edilmiştir. Malzeme parametreleri bilinen bütün alüminyum alaşımlarını kapsayacak şekilde seçilmiştir. Elasto-plastik malzeme modeli kabul edilip, elastiklik modülü 69 GPa, Poisson oranı 0.33, yoğunluğu 2.7 g/cm<sup>3</sup> kabul edilmiştir. Malzemenin plastik bölgedeki davranışını betimleyen kurucu yasa olarak da Ludwik yasası tercih edilmiştir (Bağıntı (3.5)).

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n \quad (3.5)$$

İfadede  $\sigma_0$ , malzemenin akma dayancı, K ve n sırası ile gerinme pekleşmesi çarpanı ve üssüdür. Analizler sırasında kullanılan K ve n değerleri Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

**Çizelge 3.1** Analizlerde kullanılan K ve n değerleri

<b>K</b>	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
<b>n</b>	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5

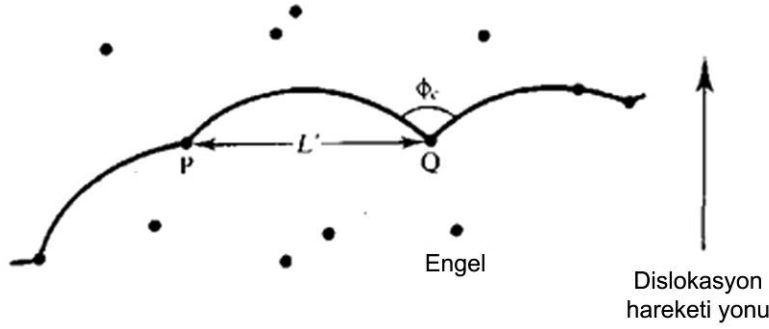
Analizlerin sonunda Şekil 3.2’de  $\alpha$  olarak gösterilen malzeme köşe boşluğu açısı ölçülerek malzeme parametreleri ile ilişkilendirilmiştir.

### 3.1.4. Malzeme Sertleşme Mekanizmaları ve Hasar Oluşumu Etkilerinin İncelenmesi

Metalik malzemelerin elastoplastik davranışının betimlenmesi için 3 temel öğeye ihtiyaç vardır: akma fonksiyoneli, akma yasası ve sertleşme yasasıdır. İzotropik metalik malzemeler için von Mises akma yüzeyi ve Prandtl-Reuss akma yasası yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat, metalik malzemeler için 3 farklı sertleşme mekanizması (izotropik, kinematik ve kombine) söz konusudur. İzotropik sertleşmede akma yüzeyi merkezi sabit kalarak genişlemeye uğramakta, kinematik sertleşmede boyutu sabit kalarak merkezi gerilim uzayında hareket etmekte, kombine sertleşmede ise her iki etki bir arada gözlemlenmektedir. İzotropik sertleşmeye uğrayan bir malzemenin tek yönlü mekanik testlerde yükleme yönünden bağımsız olarak (çekme ya da basma) aynı özellikleri gösterdiği varsayılmaktadır. Bu varsayım, bir çok metal ve alaşım için (özellikle yaşlandırılabilir Al-alaşımlarının belirli temperleri için) doğru değildir. Malzemenin ters yüklemede daha kolay plastik deformasyona uğraması (Bauschinger etkisi) durumuna çözüme alınıp su verilmiş yaşlandırılabilir Al-alaşımlarında (2XXX, 6XXX) sıkça rastlanılmaktadır. Bu etkinin ardında yatan nedenler yüksek deformasyonlarda oluşan dislokasyon yığılmaları ve Orowan mekanizmasıdır. Dislokasyon yığılmaları ince tane yapıları malzemelerde sıkça karşılaşılan olgular olmasına rağmen, yaşlandırılabilir Al-alaşımlarına özgü Orowan mekanizmasının etkisi genel olarak daha yoğun olarak hissedilmektedir. Şekil 3.3’te görüldüğü gibi, ince ve homojen dağılmış sert çökelti arasında dislokasyon hareketi çok zordur. Bu etki, malzemenin akma dayancının artışı ile kendini göstermektedir. Sabitleyici görevi gören çökelti arasında dislokasyonlar kritik bir yarı çapa kadar eğilmektedir. Kritik yarıçapa dislokasyon bütünlüğünü yitirip, bir yarım dislokasyon salınmakta ve çökelti etrafında 2 tane dislokasyon çemberi bırakılmaktadır. Bu, aynı zamanda bir dislokasyon oluşturma

mekanizmasıdır. Bu etki bir yöne yüklemde malzemenin yüksek akma dayanıcının yanı sıra yüksek sertleşme hızına sahip olmasına sebep olmaktadır. Fakat aynı mekanizma, ters yöne yükleme gerçekleştirildiğinde dislokasyon yok etme mekanizması olarak işlemektedir. Çökeltiler etrafında bırakılan dislokasyon halkaları ters yöne hareket eden dislokasyonlara bir çekme kuvveti uygulayarak akma dayanıcını düşürmekte ve kendilerine ulaşan dislokasyonları yok etmektedirler. Bu mikroskobik olaylar, makroskopik fenomenolojik plastisite teorisine göre tipik kinematik sertleşme davranışları olarak yorumlanır. Kombine sertleşme durumunda isotropik sertleşme (temel olarak dislokasyon-dislokasyon etkileşimlerinden ötürü) ve kinematik sertleşme aynı anda aktiftir. Oranları gerinme miktarına bağlı olarak değişmektedir. Projede kullanılan 2XXX ve 6XXX alaşımları bu özellikleri taşıdığından kinematik ve kombine sertleşmenin etkilerinin incelenmesi gerekmektedir.

Literatürdeki ECAP çalışmalarında şaşırtıcı biçimde sadece izotropik sertleşme yasaları kullanılmıştır. Bu eksikliği tespit eden proje grubumuz, proje çerçevesinde gidilen Ufa'daki kongrede bu alanda çok sayıda yayını olan Dr. H.S. Kim (G.Kore Cumhuriyeti) ile görüşerek bu çalışmaya katkı yapmasını sağlamıştır. Bu çerçevede, hem simülasyon hem deneysel sonuçlara dayanan ortak bir çalışma yürütülmeye başlanmıştır.



**Şekil 3.3** Orowan mekanizması ve kinematik sertleşme mekanizması ile olan ilişkisi

ECAP işleminde ulaşılabilen minimum tane boyutu işlemin tekrarlanabilirliği ile yakından ilişkilidir. İşlemin sürdürülebilirliği ise malzeme hasar birikimine bağlıdır. Literatürde ve bu proje kapsamında yapılan çalışmalarda, hidrostatik basıncı arttıran geri tepme basıncı uygulanmasının ECAP işleminde yaşanan yırtılma, çatlama ve kırılma gibi problemleri azalttığı tespit edilmiştir. Bu konuda literatürde ne mekanizmaya yönelik deneysel, ne de simülasyon çalışması bulunmamaktadır. Varolan yayında ise çeşitli sünek kırılma kriterleri kullanarak ECAP sırasında hasar oluşumunu irdeleyen 1-2 çalışma ise, sistematik olmaktan uzak ve yetersizdir. Daha da önemlisi sürekli ortamlar hasar mekaniği (SOHM) çerçevesinde hasar oluşumun ve gelişiminin tüm etkilerini (efektif gerilimdeki düşme, akma yüzeyindeki daralma, esnemezlikte düşme vs.) kapsayan gerçek eşlenmiş hasar mekaniği modelleri değildirler. Bu açığı kapamak üzere, proje tamamlandıktan sonra ilave çalışmaların yapılması planlanmaktadır. Bu raporda, yaygın kullanılan bir sünek kırılma kriteri olan Cockcroft-Latham kriterleri kullanılarak sertleşme mekanizmasının hata oluşumuna etkisinin olup olmadığı irdelenmiştir.



Kinematik sertleşmenin etkilerini belirgin olarak görebilmek için yükleme-ters yükleme durumlarının ardışık olarak bulunması gereken bir sisteme ihtiyaç vardır. Bu amaçla 2 adet ters yöne kayma deformasyonuna sebep olan kanallı bir sistem kullanılmıştır. Modellerde kullanılan sisteme benzer toplam 4 tane 120° kanal içeren bir kalıp sistemi proje kapsamında üretilmiş ve kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar analizi için, 130 mm x 10 mm x 10 mm boyutlarında bir çubuk 2000 elemanla modellenmiştir. Modelde kalıplar ve RAM sürtünmesiz katı cisimler olarak kabul edilmiş ve RAM 1 mm/s sabit hızla hareket ettirilmiştir. Hasar parametresinin enterpolasyondan etkilenmesini engellemek için otomatik tekrar ağ örgüsü oluşturmayı gerektirmeyecek bir ilk ağ örgüsü ile analize başlanmıştır. Kullanılan malzemenin akma eğrisi Ludwig kanuna göre aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\bar{\sigma}_f = 328,3 + 83,1(\bar{\epsilon}_p)^{0,32} \quad (3.6)$$

Analizlerde, sadece izotropik, sadece kinematik ve kombine sertleşme mekanizmaları kullanılmıştır. Kinematik sertleşme sırasında akma yüzeyinin gerilim uzayındaki hareketinin tanımlanması için Prager yasası kullanılmıştır. Kombine sertleşmede izotropik sertleşmenin kinematik sertleşmeye oranı eşdeğer plastik gerinmenin fonksiyonu olarak tanımlanmıştır: Düşük gerinmelerde izotropik sertleşme ağırlıklıyken, yüksek gerinmelerde izotropik sertleşmenin miktarı azaltılırken, kinematik sertleşmenin etkisi artırılmıştır.

ECAP işleminin sürdürülebilirliği açısından en önemli parametrelerden birisi malzemedeki hasar birikmesidir. Proje kapsamında yapılan mikro ve makro incelemeler, işlem parametreleri kontrol edilemezse malzemedeki çatlakların ve boşlukların oluştuğunu doğrulamaktadır. Malzemedeki hasar birikimini belirlemek için birçok kırılma ve hasar kriteri literatürde mevcuttur. Bu rapor kapsamında, sünek malzemeler için sıkça kullanılan Cockcroft-Latham hasar indeksinden yararlanılmıştır. Cockcroft-Latham kriterine göre, malzemenin herhangi bir noktasında akümüle olan hasar o noktada yapılan çekme-plastik işi ile orantılıdır. Cockcroft-Latham kriteri matematiksel olarak bağıntı (3.7) 'deki gibi ifade edilir.

$$\int \frac{\sigma_{\max}^+}{\bar{\sigma}} \dot{\epsilon} dt \geq C \quad (3.7)$$

$\sigma_{\max}^+$  maksimum çekme asal gerilimi,  $\bar{\sigma}$  eşdeğer von Mises gerilimi,  $\dot{\epsilon}$  eşdeğer gerinme hızı ve C hasar limitidir.

## 3.2. Laboratuvar Ölçekli Kalıp (ECAP)

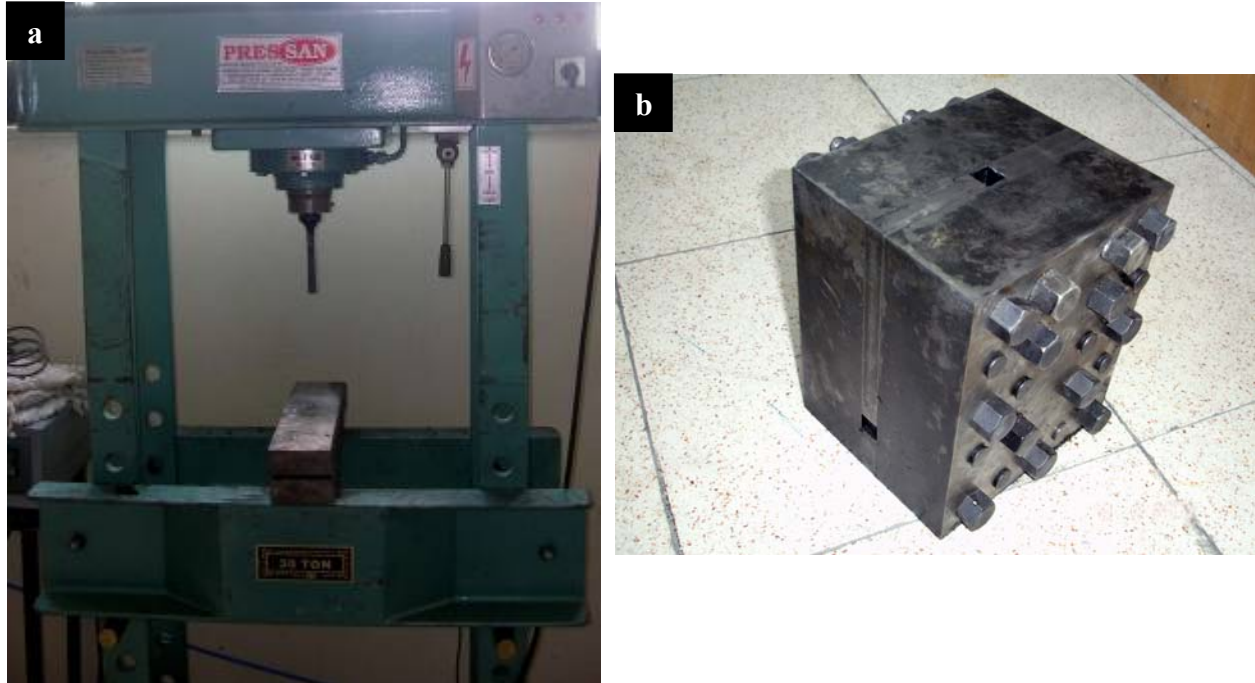
Projede laboratuvar ölçekli kalıp olarak geçen sistem hacimli (bulk) malzeme deformasyonunda kullanılan ECAP sistemini ifade etmektedir. ECAP deformasyonu hakkında yapılan çalışmaların kesintisiz sistem için temel oluşturması bakımından son derece önemlidir. İlk olarak deformasyon sistemi tasarlanmış ve gereksinimler doğrultusunda modernize edilmiştir. Sistematik deneylere başlanmasıyla üretilen tek pasoluk örnekler mekanik özellikleri, mikroyapıları açısından karakterize edilmiştir. Alt başlıklarda tasarım ve inceleme yöntemlerine dair bilgiler sunulmuştur.

### 3.2.1. Sistem Tasarımı ve Modernizasyonu

Laboratuvar ölçekli deformasyon sistemi tasarımında temel olarak iki çeşit pres kullanılmıştır: dikey ve yatay eksenli. Dikey eksenli sistemde başlayan denemeler sistem sabitlemenin daha rahat olduğu yatay sistemde devam ettirilmiş; 90° ve 120° açılı kalıp sistemleri kullanılmıştır. Sistematik denemelere geçiş öncesi yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

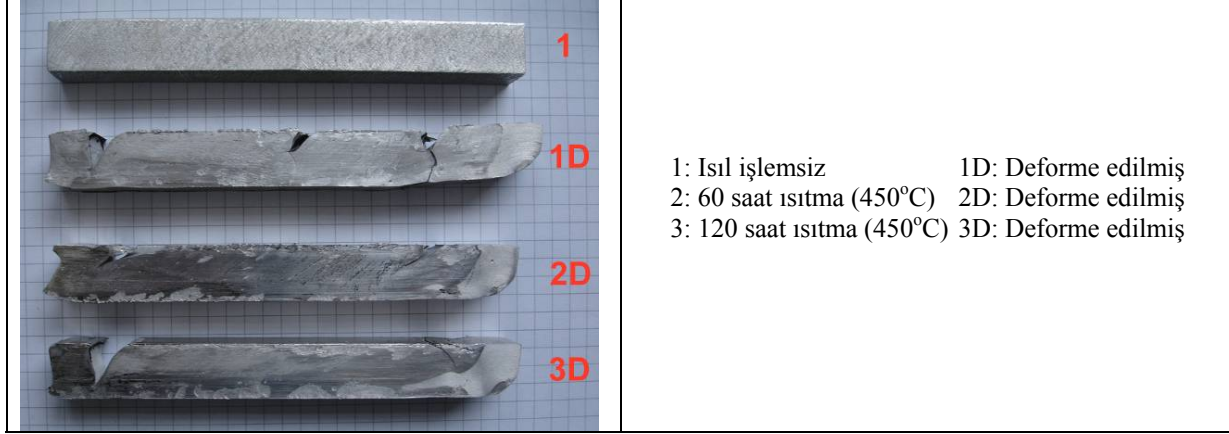
#### 3.2.1.1. Dikey Eksenli Pres

Laboratuvar ölçekli kalıp (ECAP) için ön çalışmalar optimum işlem parametrelerinin belirlenmesi konusunda önem teşkil etmektedir. Bölüm imkanları ile imal edilen ECAP düzeneği kullanılmıştır. Sistem dikey eksenli hidrolik prese (Şekil 3.4a) yerleştirilen 90° açılı kanala sahip takım çeliğinden imal edilen ECAP kalıbından (Şekil 3.4b) oluşmaktadır. MoS<sub>2</sub> ile yağlanan numuneler ortalama 20 ton yük ile kalıptan geçirilmiştir.



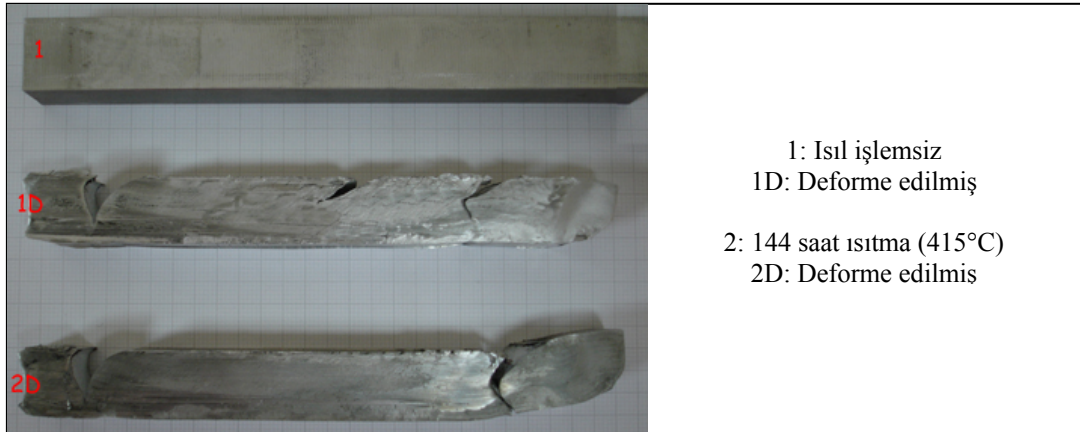
Şekil 3.4 ECAP düzeneği (a) 30 ton kapasiteli dikey eksenli hidrolik pres, (b) 90° ECAP kalıbı

3 adet 6066 Al-alaşımı numunede (14mmx14mmx130mm) tek pasoluk deformasyon yapılmıştır. İlk numune deformasyon sırasında çeşitli noktalardan kırıldığından, ısıtma işlemi numuneler daha sünek hale getirilmiştir. 450°C’de 60 saat ve 120 saat ısıtılmış numunelerde kırılmanın sadece başlangıç ve bitiş kısmında olduğu ve kalan kısmın çatlaksız olduğu görülmüştür (Şekil 3.5).



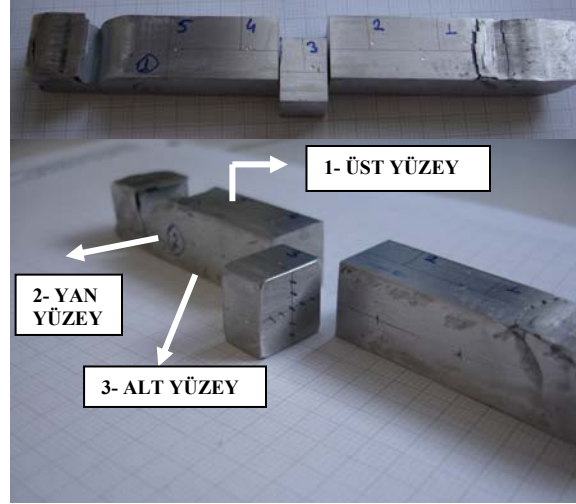
Şekil 3.5 6066 numunelerde tek pasoluk deformasyon denemeleri

6066 Al-alaşımı numuneler 120 saat ısıtılarak daha sünek hale getirilseler dahi başlangıç ve bitiş uçlarındaki çatlak oluşumunun önüne geçilememiştir. Bu kapsamda farklı malzemelerin davranışını değerlendirmek üzere 5083 Al-alaşımı tek pasoluk deforme edilmiştir. İlk numune başlangıç ve bitiş kısımlarının yanı sıra orta bölgeden de çatlamıştır. 415°C’de 6 gün tavlanarak yumuşatılan numunede ise orta bölgedeki çatlak kaybolduğu ancak başlangıç kısmının üretim sırasında koptuğu gözlenmiştir (Şekil 3.6).



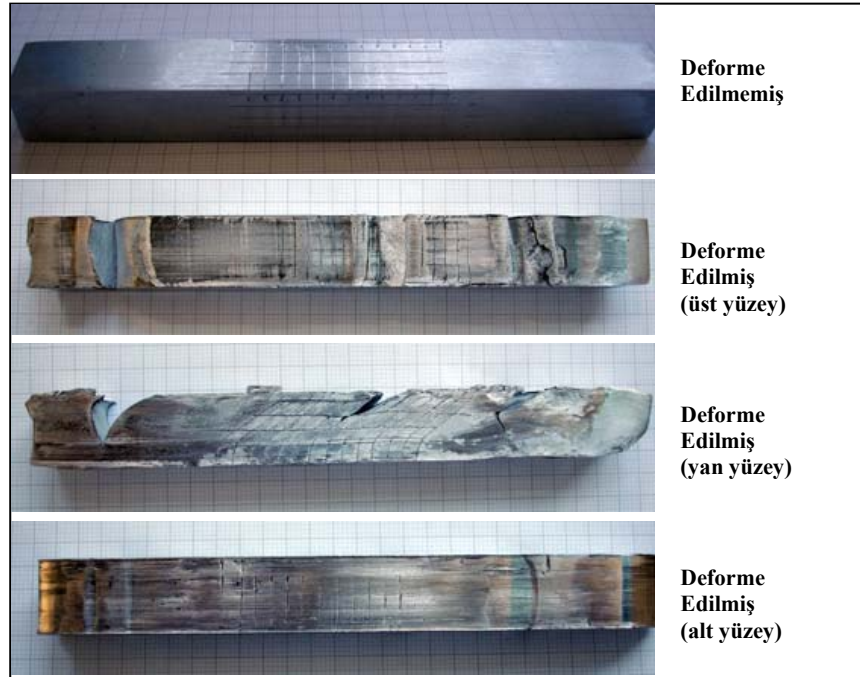
Şekil 3.6 5083 Al-alaşımı numunelerin ECAP öncesi ve sonrası fotoğrafları

Ayrıca, malzeme ortasından parça çıkarılarak kesit boyunca sertlik değişimi kontrol edilmiştir. Bu bağlamda 450°C’de 120 saat ısıtılan Al- 6066 numunenin orta bölümünden parça çıkarılarak (Şekil 3.7); kesit bölgesinin makro ve mikro sertlik dağılımı incelenmiştir. Şekilde, “1” numaralı yüzey numunenin üst yüzeyini, “3” numara alt yüzeyini, “2” numara ise yan yüzeyi göstermektedir. Kesit boyunca değişim sonlu eleman analiz yöntemi sonuçlarıyla kıyaslanmıştır.



Şekil 3.7 Numune yüzeylerinin kodlanması

Malzemenin kalıpta uğradığı deformasyonu gözlemlemek amacıyla malzeme yüzeyinde kare desenler oluşturulmuştur. 5083 Al-alaşımının üst, yan ve alt yüzeylerin orta bölgesine maket bıçağı yardımıyla çizilen desenlerdeki değişim Şekil 3.8’de verilmiştir. Genel olarak alt ve üst yüzeydeki kare formu bozulmamış; ancak alt yüzeydeki çizgiler aşırı sürtünmeden dolayı kaybolma eğilimindeyken, üst yüzeydeki çizgiler ise çatlak başlangıç mevkileri olarak davranmışlardır. Deformasyon etkisini yan yüzeydeki kare deseni paralel-kenar desene dönüştürerek ortaya koymuştur. Kare desendeki kayma miktarı; sonlu eleman analizlerindeki eleman kaymasıyla kıyaslanarak modelleme ve deneysel yöntem karşılaştırılmıştır. Dikey eksenli sistemde yapılan ön çalışma sonuçları Bulgular kısmında detaylandırılmıştır.



Şekil 3.8 5083 Al-alaşımında ECAP sonrası kare desenlerdeki değişim

### 3.2.1.2. Yatay Eksenli Pres

Ön çalışmalarda, çatlaksız numune elde edilmeye çalışılmış; 6066 ve 5083 Al-alışımı numunelere (14mmx14mmx130mm) 90° tek paso ECAP uygulanmıştır. ECAP kalıbının, uzun süreli kullanımdan dolayı kanal içi yüzey kalitesi bozulmuştur. Sonlu eleman modellemesinde düşük sürtünme yüksek sürtünmeden çok daha az zararlı bulunmuş ve mümkün olan en iyi yağlama tavsiye edilmiştir. Bu bağlamda varolan kalıbın modernizasyonu gündeme alınmıştır. Kalıp iç yüzeyinin elektro polisaj ve plazma nitrasyon yapılarak pürüzsüz yüzey elde edilmesi, kalıp sisteminin sabitlenmesine gerek duyulmuştur. Yeni bir tasarımla kalıp imal edilerek üretime OSTİM’de devam edilmiştir. Kalıp sisteme sıkıca sabitlenebildiğinden üretim sırasında oynama probleminin önüne geçilmiş; sabit sistemde peş peşe üretim kolaylığı sağlanmıştır. Yatay eksenli preste (Şekil 3.9) 120° açıyla kestirilmiş kanallar bulunduran kalıplar kullanılmıştır. İki farklı kalıpla (120°lik Ø=18mm dairesel kesitli) denemeler yapılarak son karara varılmıştır.



Şekil 3.9 Yatay eksenli ECAP sistemi ve kalıbı

#### 3.2.1.2.1. 120° lik 14x14mm kare kesitli kalıp

İlk olarak 14mmx14mm kesitli numune için üretilen AISI H13 sıcak iş takım çeliğinden mamul kalıp kullanılmıştır. 100mm uzunluğundaki numunelerin deformasyonu sırasında kenar bölgelerinden patlamıştır (Şekil 3.10). Kırılma anında tesbit edilen yük 212,76 kg/mm<sup>2</sup> mertebelerindedir. Kalıp köşelerindeki gerinim birikmesinin patlamaya neden olduğu düşünülmektedir. Köşelerin yuvarlatılarak yük birikiminin engellenmesi yerine dairesel kesitli kalıp hazırlanması tercih edilmiştir.



Şekil 3.10 Üretim sırasında çatlayan 14mmx14mm kare kesitli kalıp



### 3.2.1.2.2. Çift 120° lik 18mm çaplı dairesel kesitli kalıp

Kare kesitli kalıpta yaşanan patlama sonucunda tasarım değiştirilerek 18 mm çapında kanal boşluğuna sahip çift açılı kalıp (Şekil 3.11) üretilmiş ve çalışmalar bu kalıp vasıtasıyla yürütülmüştür. Bu kalıpta amaçlanan kalıp açılmadan tek defada çift deformasyon verilebilmesidir. Bu kalıp sistemiyle elde edilen tecrübe Çizelge 3.2’de sunulmuştur.



Şekil 3.11 18mm çaplı Çift 120° lik ECAP kalıbı.

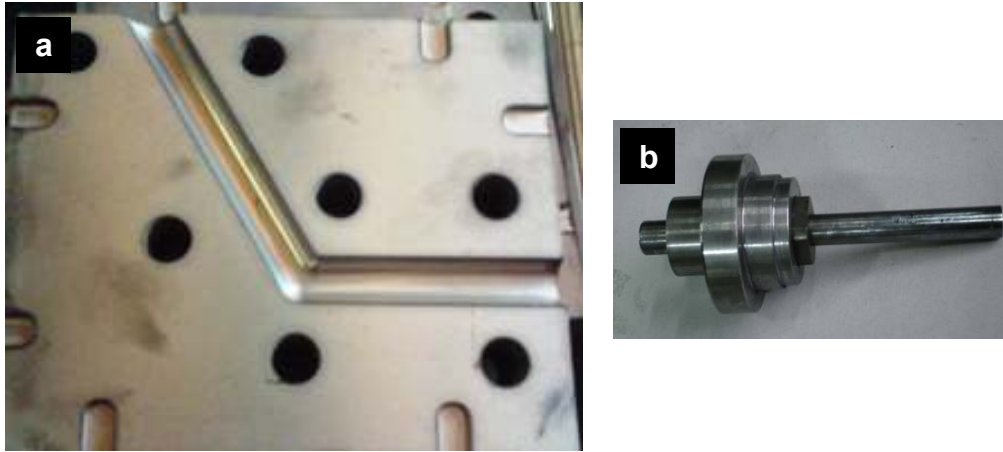
Çizelge 3.2 Çift açılı ECAP kalıbıyla elde edilen tecrübe.

	Uygulama	Gözlem
1	Geri tepme basıncı uygulanmamış deformasyon Örnek parçalara bölünmüştür.	
2	2,5 – 3 ton geri tepme basıncı uygulanmış deformasyon denemesi Parçalanma azalmış ama çatlaklar mevcuttur.	
3	Örnek deforme edilmeden önce bakır içine gömülerek hidrostatik basınçla çatlak oluşumu engellenmeye çalışılmıştır. Çatlaklarda gözle görülür azalma mevcuttur.	
4	Deformasyon öncesi 420 °C de 1 saat tavlansak örnek yumuşatılmıştır. Çatlaksız tek parça ürün elde edilmiştir.	
5	Deformasyon öncesi örnekler 495 °C de 1 saat çözeltiliye alınarak suda su verilmiştir. Derinlemesine çatlak oluşumu mevcuttur.	

Bu sistemde elde edilen en önemli bulgu numunenin çatlaksız tek parça çıkarılabilmesi için geri tepme basıncı uygulamasının gerekliliğidir. Geri tepme basıncının artırılmasıyla çatlak oluşumu kısıtlanmaktadır. Tavlanmış numune tek parça çıkmasına rağmen, projede amaçlanan su verilmiş numunenin tek parça halinde çıkmasını gerektirdiğinden kalıp tasarımı yeniden revize edilmiştir.

### 3.2.1.2.3. Son Tasarım (120°lik 18mm çaplı dairesel kesitli kalıp)

Kazanılan deneyimler neticesinde, son kalıp tasarımı olarak tek 120°lik 18mm çaplı dairesel kesitli kalıp (Şekil 3.12) kullanılmasına karar verilmiştir. Kalıp H13 sıcak iş takım çeliğinden üretilmiş; kanal iç yüzeyleri elektro polisaj ve plazma nitrasyon yapılarak pürüzsüz yüzey elde edilmiştir. Gereken itki 150mm çapındaki pistonlara bağlı tungsten-karbürden mamul punçlarla (Şekil 3.12b) sağlanmaktadır.



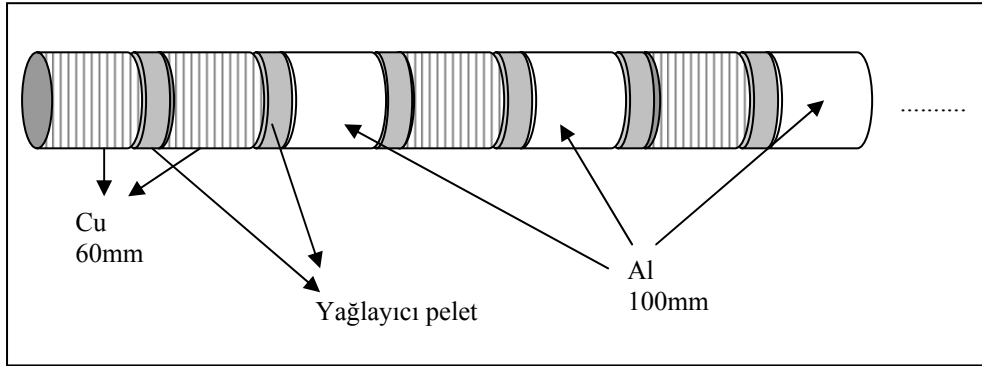
Şekil 3.12 Son sistemde başarıyla kullanılan  $\varnothing=18$ mm dairesel kesitli kalıp ve itki punç

Sonlu eleman analizleri ile köşe boşluğu oluşumu incelenmiş ve malzemenin kalıpla uygun olmayan sürtünmesi nedeniyle deformasyon heterojenliğinin arttığı saptanmıştı. Bu problem ise deforme edilen malzemenin ön kısmına sürtünmeyi artırıcı dolayısıyla heterojen deformasyonu azaltıcı malzeme konularak çözülmüştür. Bu amaçla 30 mm uzunluğundaki her Al numunenin önüne bakır malzeme yerleştirilmiş ve geri tepme basıncı (back pressure) oluşturulmuştur. Kalıp yüzeyindeki sürtünme Mo esaslı toz yağlayıcıyla azaltılmaktadır. Deforme edilecek tüm numunelerin arasına yaklaşık 2 mm kalınlığında yağlayıcı peletler konulmaktadır. Ayrıca itki malzemesi olarak kullanılan bakır parçaların yan yüzeylerine açılan kanallara dolan toz yağlayıcı sürekli yağlamayı gerçekleştirmektedir. Efektif yağlama işlemi aynı anda bu iki basamağın uygulanmasıyla sağlanmaktadır.

Hidrolik aksamının azami itme basıncı 360 bar civarında olup; kritik geri tepme basıncı aşırsa numuneler kalıp içerisinde sıkıştığından (Şekil 3.13) kalıbın açılması gerekmekte ve bu işlem çok uzun sürmektedir. İlk Al-2024 numune öncesi iki bakır parça; devamındaki her bir numune için en az bir bakır parça kullanılmasının kalıp açmadan en fazla sayıda numune üretilmesine olanak sağladığı saptanmıştır. Al numune öncesi konan bakır sayısı basınçtaki artış göz önüne alınarak iki veya üçe çıkarılabilmektedir. Kalıp içerisindeki numune yerleşimi Şekil 3.14'de; numuneler açılı bölgeden geçerken ölçülen basınç değerleri ise Çizelge 3.3'de sunulmuştur.



Şekil 3.13 Aşırı basınç yükselmesi sonucu ters ekstrüzyon ve numune sıkışması



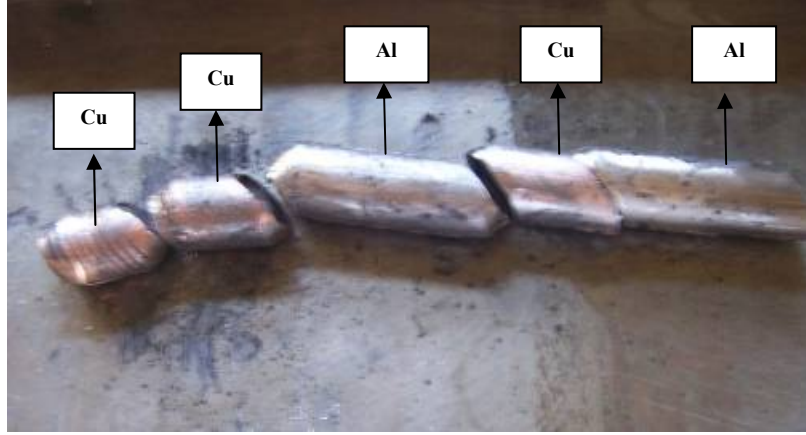
Şekil 3.14 Kalıp içindeki şematik numune sıralaması

Çizelge 3.3 Deformasyon sırasında sistemde ölçülen yağ basıncı

	→									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Açılı bölgeden geçen malzeme	Cu	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Cu	Al
Hidrolik yağ basıncı (bar)	80	80	160	140	260	260	320	310	280	360

Elde edilen deneyimler sonucunda Al-2024 alaşımları tek parça ve çatlaksız olarak geçirilebilmiştir (Şekil 3.15). Projenin bundan sonraki incelemeleri bu sistem kullanarak yapılmış ve elde edilen ürünler karakterize edilmiştir.





Şekil 3.15 Kalıptan başarıyla geçirilmiş örnekler

### 3.2.2. Malzeme ve Isıl İşlem

Sistematik çalışma boyunca kimyasal bileşimi Çizelge 3.4’de belirtilen Al-2024 alaşımı kütük kullanılmıştır. Kütükten çıkarılan 18mm çapında 100mm boyunda çubuklar ECAP sisteminde deforme edilmiştir.

Çizelge 3.4 Al-2024 alaşımı spektral analizi ve standart alaşım kimyasal kompozisyonu

	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Cr</i>	<i>Ti</i>
<b>Kullanılan</b>	92,6	0,106	0,217	4,9	0,595	1,24	0,156	0,0166	0,0292
<b>Standart</b>	90,7 – 94,7	<0,5	<0,5	3,8 – 4,9	0,3 – 0,9	1,20 – 1,80	<0,250	<0,100	< 0,150

Çözeltiye alma işlemi için numuneler muffle fırında 495°C de 1 saat tavllanmış ve takiben buzlu suda (0°C) soğutulmuştur. Ara basamaklarda oluşabilecek doğal yaşlanmanın önüne geçebilmek için numuneler –18°C ’de derin dondurucuda tutulmuştur. ECAP uygulanmış ve uygulanmamış numunelerin yaşlandırılmasında  $\pm 1^\circ\text{C}$  hassasiyetteki yağ banyosu kullanılmıştır. Yağ ortamı olarak 1000cp viskozitede silikon yağı tercih edilmiştir. Yaşlandırma sıcaklıkları ve süreleri Çizelge 3.5’de sunulmuştur.

ECAP sonrası ısıl kararlılık araştırılması ve TEM incelemelerinde tane sınırının görünebilir yapılması için tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Tavlama işlemi muffle fırında 400°C de 1 saat süreyle gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.5 Yaşlandırma sıcaklıkları ve süreleri.

Deforme edilmemiş örnekler	Sıcaklık (°C)	Süre (saat)					
		0.5	1	2	4	8	12
ECAP uygulanmış örnekler	80	30	43	55	65	86	
	100	6	12	24	32	6	12
	190	0.25	0.5	1	2	4	6

### 3.2.3. Numunelerin Karakterizasyonu

#### 3.2.3.1. X-Işınları Kırınımı (XRD)

X-ışını kırınım profilleri bakır hedef metale sahip  $K\alpha$  monokromatik dalga boyunda x-ışını üreten ( $\lambda=1.54183\text{\AA}$ ) Rigaku DMAX2200 X-ışını cihazıyla elde edilmiştir. Kırınım verileri,  $2\theta = 37,5^\circ - 40^\circ$  aralığında (111) düzlemi için toplanmış ve karşılaştırılmıştır.

Deformasyon sonrası hücre yapısı boyutunun (cell size) ölçülmesi amacıyla X-ışınları çizgi genişlemesi (line broadening) yönteminden yararlanılmıştır. Limitli hücre boyutu sayesinde kırınım genişlemektedir. Kırınım genişliği, B, yarım maksimumdaki tam genişlik (FWMH) yöntemiyle ölçülerek; hücre boyutu, t ile aşağıdaki bağıntı ile ilişkilendirilmiştir:

$$t = (0,9\lambda)/(BS \cdot \cos \theta_B) \quad (3.8)$$

BS yapısal genişleme (structural broadening),  $\lambda$  kullanılan dalga boyu ve  $\theta_B$  kırınım Bragg açısıdır. Yapısal genişleme,  $BS^2 = BE^2 - BR^2$  formülüyle hesaplanmıştır. BE yapısal ve cihaz nedenli genişlemeyi içeren ECAP uygulanmış numuneye ait kırınım genişliğini; BR ise sadece cihazsal genişlemeyi içerdiği düşünülen referans kırınım genişliğini ifade etmektedir.

#### 3.2.3.2. Mikroyapı İncelemeleri

Mikroyapı incelemesi için optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve geçirim elektron mikroskobu (TEM) kullanılmış ve ECAP işlemi ve sonrası ısıl işlemlerin etkileri araştırılmıştır. OM ve SEM incelemeleri öncesi numuneler standart metalografi yöntemleriyle hazırlanmış ve Keller dağılayıcısı (2.5ml  $HNO_3$  + 1.5ml  $HCl$  + 1.0ml  $HF$  + 95ml su) ile dağlanmış. Hazırlanan örnekler Nikon Optiphot-100 optik mikroskop ve Jeol JSM6400 Tarama Mikroskobu ile incelenmiştir. 25% nitrik asit + 75% metanol çözeltisinde  $-33^\circ C$ 'de elektroparlatma yöntemiyle hazırlanan örnekler JEOL 2100 Geçirim Elektron Mikroskobu ile incelenmiştir. Karanlık Alan (DF), Parlak Alan (BF), Seçilmiş Alan Elektron Kırınımı (SAED) ve EDS teknikleriyle mikroyapı araştırılmıştır.

#### 3.2.3.3. Sertlik Ölçümleri

Brinell sertlik taramaları 2,5mm çelik top uçlu Heckert analog sertlik cihazıyla Çizelge 3.6'da verilen yükler altında yapılmıştır.

Çizelge 3.6 Heckert analog sertlik cihazında kullanılan yükler.

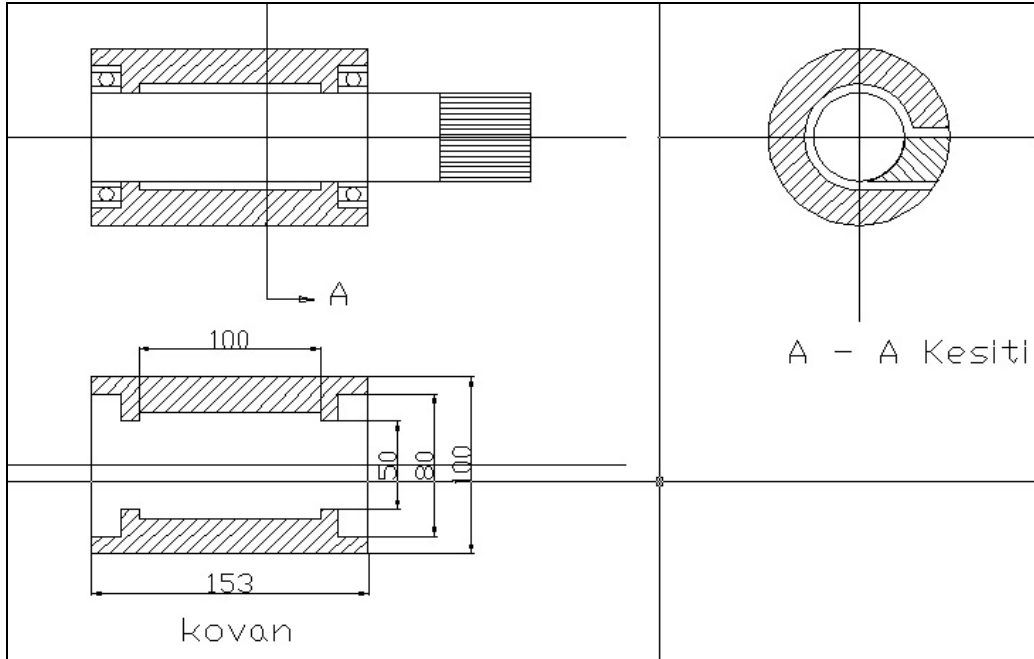
	kp
Çözeltiyeye Alınmış ( $495^\circ C$ , 1s)	31.25
Tavlanmış ( $420^\circ C$ , 3s)	31.25
Çözeltiyeye Alınmış ( $495^\circ C$ , 1s) + ECAP uygulanmış	62.5
Çözeltiyeye Alınmış ( $495^\circ C$ , 1s) + ECAP uygulanmış + Yaşlandırılmış	62.5
Çözeltiyeye Alınmış ( $495^\circ C$ , 1s) + ECAP uygulanmış + Tavlanmış	31.25

### 3.3. Kesintisiz Tezgah (DCAP)

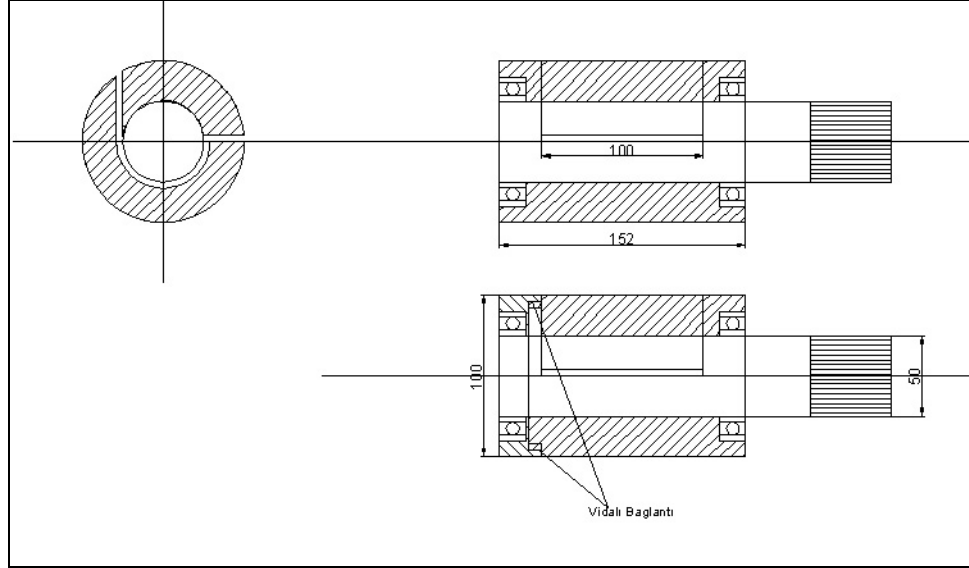
Proje grubunun ECAP sisteminde edindiği bilgi birikimi ve tecrübenin aktarılarak plaka deformasyonu yapabilecek kesintisiz tezgahın (DCAP: Dissimilar Channel Angular Pressing) tasarımı, imalatı ve denemeler bu bölümde anlatılmaktadır. Cihaz imalatının ardından sistemin sağlıklı çalışması için bir dizi merdane ve kalıp revizyonlarına gidilmiş; numunenin rahat beslenebilmesi, çoklu paso yapılabilmesi, son ürünün yüzey kalitesi ve mekanik test yapılabilirliği gibi kriterler göz önüne alınmıştır. Sistem tasarım aşamaları bu bölümde; mekanik deneylerin sonuçları ise bulgular bölümünde yer almaktadır.

#### 3.3.1. Sistem Tasarımı

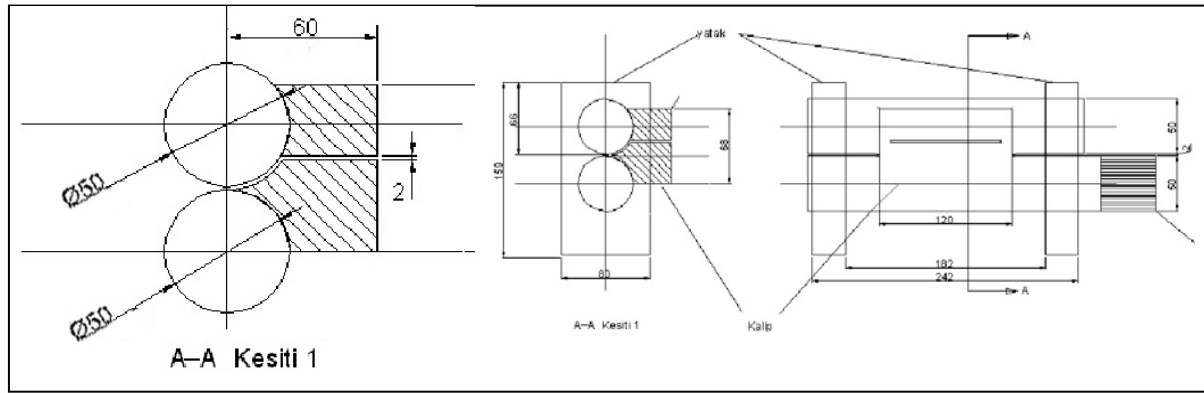
Tasarım birkaç defa değiştirilerek yassı mamul deformasyonuna uygun sistem araştırılmıştır. Kesintisiz üretim için, ilk aşamada ECAP yöntemi esas alınarak bir tasarım yapılmıştır (Şekil 3.16). Ancak bu kalıp bir yerden beslenmekte ve hemen üzerinden kalıptan geçirilmiş numune alınmaktadır. Bunun pratik uygulama zorluğu nedeniyle Şekil 3.17'deki tasarım ele alınmış; yapılan simülasyon sonuçları, bu tasarımın da istenilen sonucu vermeyeceğini göstermiştir. Literatür araştırması sonunda, alüminyum plakaların kesintisiz deformasyonu için Şekil 2.13'deki tasarım "DCAP" ön plana çıkmış ve, Şekil 3.18'de verilen düzenek imal edilmiştir.



Şekil 3.16 Kesintisiz düzenek için ilk ECAP düzeneği tasarımı



Şekil 3.17 Kesintisiz düzenek için ikinci ECAP düzeneği tasarımı



Şekil 3.18 Kesintisiz üretim için DCAP düzeneği tasarımı

### 3.3.1.1. Plakalar için Kesintisiz Üretim Sürecinin Simulasyonu

Alüminyum plakalar için kesintisiz üretime uygun bir aşırı plastik deformasyon yöntemi tasarımında ECAP temellerden yararlanılarak çeşitli işlem önerileri ortaya atılmıştır.

Plakaların tane boyutunun inceltilmesi ve nano ölçekte tane boyutlarına yaklaşılması için ECAP yöntemindeki prensiplerden yararlanılabilmesi süreç tasarımında bazı değişikliklere gidilmesini gerektirmiştir. Plaka gibi yassı mamullerin presle basılarak bir kalıptan geçirilmesi mümkün değildir. Bunun en temel nedeni yükseklik/kalınlık oranı arttıkça basma kuvvetleri altında bir plastik kararsızlık durumu oluşması ve bunun sonucu olarak plakanın bükülmeyi tercih etmesidir. Benzer şekilde çekme kuvvetleri ile aynı iş yapılmaya çalışılırsa bu sefer boyun oluşumu, plakada aşırı inceltme hatta yırtılma problemleri gözlemlenmektedir.

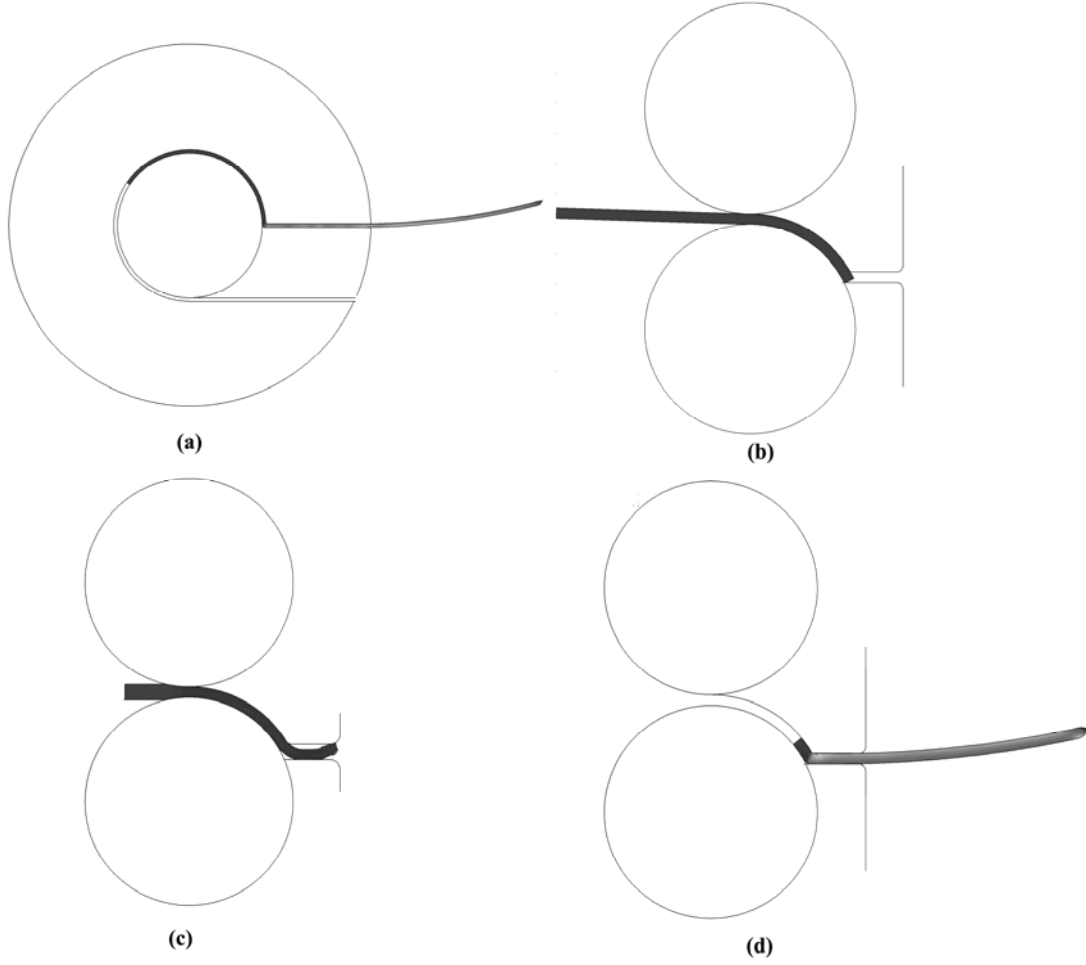
Bu problemlerin giderilmesi ve deformasyon işleminin gerçekleştirilmesi ancak kayma kuvvetleri ile deformasyon gerçekleşirse mümkündür. Bir malzemeye kesme kuvvetleri uygulamanın en

temel yöntemi sürtünme kuvvetlerinden faydalanmaktadır. Projede tasarlanan süreç ve ekipman tasarımlarında bu prensip göz önüne alınmış ve haddeleme işleminden esinlenerek bazı sürekli ECAP tasarımları yapılmıştır. Bunlardan ilki Şekil 3.19a'da sunulan  $270^0$  lik bir merdane dönüşü sonrasında malzemenin sürtünme kuvvetleri aracılığı ile  $90^0$  dış kalıp ve  $120^0$  lik iç kalıp açısı ile çıkış kanalına yönlendirildiği tasarımdır.

Bu üretim süreci için çeşitli kalınlıkta plakalar için sonlu elemanlar simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda bu işlemin gerçekleştirilmesinin teorik limite çok yüksek hadde sürtünme katsayıları ile ancak ve ancak çok ince plakalarda (1 mm veya daha ince) gerçekleştirilebileceği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda bu işlemde haddenin plakayı kavraması için başlangıçta plaka bir miktar kalıba sürülmesi gerekmektedir. Bunlar göz önüne alınarak bu işlemin uygulanmasının çok zor veya pratik olarak imkansız olduğu kararına varılmıştır.

Daha sonra merdanelerin plakayı kavrama problemini engellemek amacı ile çift merdaneli bir ECAP düzeneği tasarlanmıştır (Şekil 3.19b). Bu tasarım plaka kavrama problemini büyük ölçüde ortadan kaldırırsa da sürtünme kuvvetlerinden yararlanılan alan daha kısa olduğu için giriş kanalına beslenen plakanın deforme olup çıkış kanalına yönlendirilmesi için gerekli kuvvetler çok yüksek sürtünmelerde bile merdaneler tarafından uygulanamamıştır. Bu yüzden çift merdaneli ECAP tasarımından da vazgeçilmiştir.

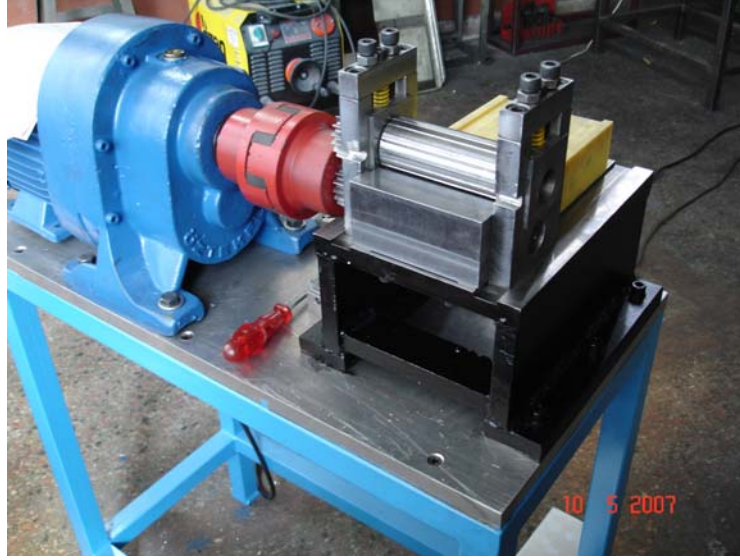
İlk iki düzeneğin tasarımındaki sorunlar değerlendirilerek, temel problemin sürtünme kuvvetinden verimli olarak yararlanamamak olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Hem kavrama problemini çözmek hem de sürtünmeden daha etkin olarak yararlanmak için ECAP işlemine bir alternatif olan Değişik Kanallı Açısız Presleme (DCAP) yönteminin sürekli üretime uyarlanmasına karar verilmiştir. Şekil 3.19c'de buna yönelik ilk tasarım sunulmuştur. Bu tasarımda, plakaya merdaneler tarafından öncelikle %20'lik bir deformasyon verilmektedir, çıkış kanalının genişliği ise girişteki plaka kalınlığı ile aynı olacak şekilde tercih edilmiştir. Böylece boyut değiştirmeden işlemin gerçekleşeceği düşünülmüştür. Sistemdeki sürtünme kuvvetleri normal kuvvetle orantılı olduğu için, malzemenin elastik tepkisi sayesinde düşük sürtünme katsayılarında bile yüksek sürtünme kuvvetleri elde edilmiştir. Böylece plakanın kavranması ve çıkış kanalına yönlendirilmesi problemi tamamen çözülmüştür. Fakat, bu işlemde de bir kısıtlama farkedilmiştir: ilk haddeleme işleminde aşırı deformasyon verilirse plaka çıkış kanalını doldurmamaktadır. Önceki aşamadaki verilerden yararlanarak, ardarda yinelenen simülasyonlar aracılığı ile merdaneler tarafından verilen deformasyonun %8'den az olduğu durumlarda çıkış kanalının doldurulduğu ve işlemin problemsiz gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir (Şekil 3.19d). Bu işleme sürekli DCAP adı verilmiştir.



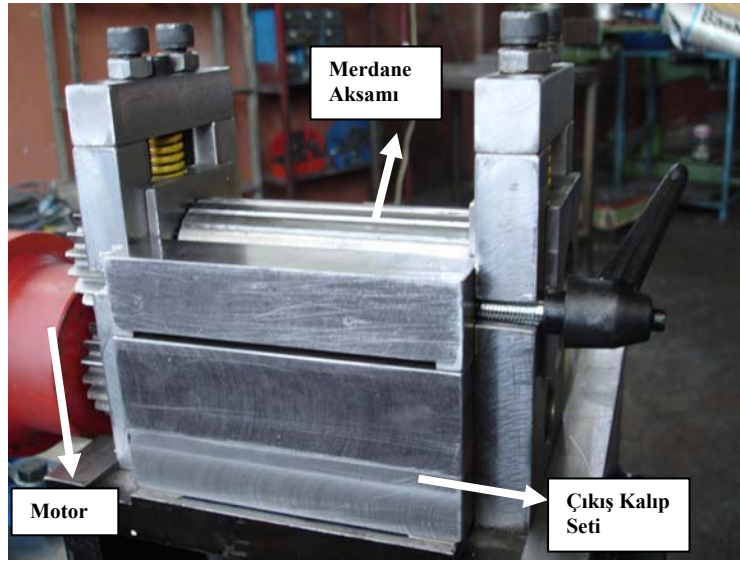
Şekil 3.19 Kesintisiz üretim için tasarılan çeşitli düzeneklerin şematik gösterimleri

### 3.3.1.2. Kesintisiz Deformasyon Tezgahı (DCAP) İmalatı

Kesintisiz deformasyon için Şekil 3.18'deki kalıp imal edildi. Şekil 3.20'de, tasarıma bağlı olarak imal edilen DCAP tezgahı ana hatlarıyla görülmektedir. Düzenek temel olarak motor, merdane aksamı ve çıkış kalıp seti olmak üzere üç birimden oluşmaktadır (Şekil 3.21). Motor, sacı 20 cm/dak sabit hızla ilerletebilecek torka sahip motordan ve redüksiyon bölümünden oluşmaktadır. Sacı kalıp içerisine süren merdane aksamı 50 mm çapında 120 mm boyunda, ara mesafesi ayarlanabilir iki merdaneyi barındırır. Motor gücü her bir merdaneye bağlı dişli ile iletilir. Sistemin temelini teşkil eden çıkış kalıp seti ise alt ve üst olmak üzere iki parçadır. Alt kısım ana iskelete monteli, üst kısım ise gerekli ayarların yapılabilmesi (DCAP kalıbıyla merdane arasındaki mesafenin ayarlanabilmesi) için sökülebilir tarzda tasarlanmıştır. Kalıplara, gerekli mukavemeti gösterecek tarzda ısıl işlem uygulanmıştır.



Şekil 3.20 DCAP tezgahı



Şekil 3.21 DCAP düzeneği ve birimleri

Düzeneğin çalışabilirliğini denemek için çeşitli alüminyum saclara DCAP uygulanmış ve karşılaşılan problemler giderilmeye çalışılmıştır. Temel sorun, numunelerin merdaneler yardımıyla kalıp içerisine ilerletilmesi olmuştur. Bu problemi gidermek ve numune üzerinde yeterli sürtünmeyi sağlamak için merdane yüzeylerinde kanallar açılmıştır (Şekil 3.22).

Tezgah kullanılarak (110 mm x 600 mm x 2 mm) boyutlarında 99.6% saflıkta alüminyum saclardan tek pasoluk ve çift pasoluk birer numune üretilmiştir. Şekil 3.23'te görülen numuneler incelenmiş ve makro sertlik ölçümleri sonucunda, düzenekte “merdane – alt kalıp” ve “alt kalıp – üst kalıp” ölçülerinin ayarsız olduğu anlaşılmıştır. Kalıp kanal boşluğundaki ayarlamaları takiben yapılan denemelerde 2xxx serisi sac ve saf alüminyum saclar kullanılmış ve makro sertliklerinde gözle görülür bir iyileşme sağlanmıştır.



Şekil 3.22 Numuneyi DCAP kalıbına süren merdane yüzeyinden görünüm



Şekil 3.23 DCAP tezgahından geçirilmiş saf alüminyum numuneler

### 3.3.1.3. Sistem Revizyonları

Yapılan denemeler, kanal açılmış olan merdane yüzeyi ile ancak 4 paso uygulanabileceğini göstermiştir. Ancak, zımpara destekli olarak 6 paso başarılı olmuştur. Üretilen numunelerden alınan sertlikler anlamlı sonuçlar vermesine rağmen, malzeme yüzeyinde oluşan izlerde çatlak oluşumu tespit edilmiştir. Çatlaklı numuneler, çekme deneyini imkansız hale getirmiştir. Merdane sisteminin fazla paso uygulamaya elverişsiz olması; merdane tasarımının revizyonunu gündeme getirmiş ve yeni merdane yüzeyi tasarlanıp imalatı tamamlanarak kesintisiz tezgaha monte edilmiştir (Şekil 3.24). Yeni merdane, paso geçirme ile ilgili sorunları gidermekle birlikte, önceki dönemlerde de karşılaşılan “merdane-alt kalıp” ve “alt kalıp-üst kalıp” ölçülerinin ayarsızlığı nedeniyle istenilen kalitede numune elde edilememesi sorunu çözmemiştir. Alt ve üst kalıplar, bir metal çerçeve (Şekil 3.25) ile sabitlenmiş ve kesintisiz tezgah (DCAP) istenilen nitelikte numune üretimine hazır hale getirilmiştir.





Şekil 3.24 Dokulu merdane yüzeyi



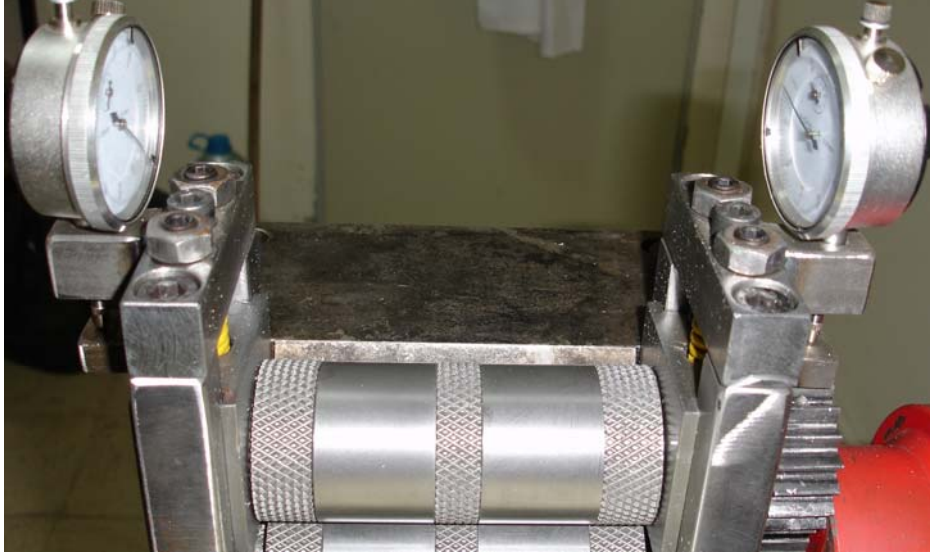
Şekil 3.25 Alt-üst kalıbı sabitleyen çerçeve tasarımı

Dokulu merdane yüzeyi ile üretilen numunelerde sertlik ölçülmüş; çekme deneyi uygulanmıştır. Numuneden çıkarılan örnekler Şekil 3.26'da verilmiştir. İki paso deformasyonla akma dayanıcı yaklaşık %10 oranında artma göstermiştir. Ancak malzeme tamamen kırılğan davranmıştır. Bu durum; malzeme yüzeyindeki dokunun çentik etkisi yarattığı izlenimini vermektedir. Ayrıca çok pasolu deformasyondan sonra malzeme yüzeyinden sertlik alınabilecek bölgeler azalmıştır. Dokulu merdane, paso sayısını arttırmasına rağmen test yapılabilirliği tamamıyla azaltmıştır. Kalıp sabitlemek için kullanılan çerçeve sistemi de istenilen performansı vermemiştir.



Şekil 3.26 6061 çekme testi numunesi (çekme deneyi öncesi ve sonrası)

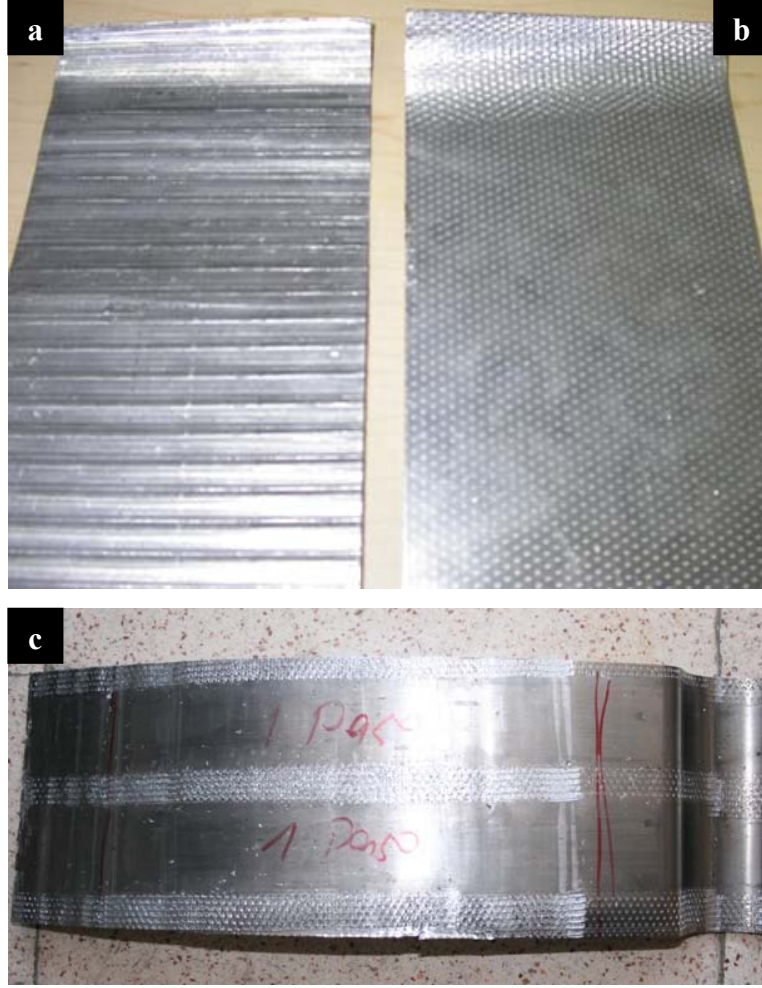
Dolayısıyla merdane yüzeyinde ve kalıp setinde ciddi bir revizyona gidilmesi zorunlu hale gelmiştir. Merdane yüzeyi Şekil 3.27'deki gibi malzemeyi içeri sürebilecek dokulu ve test yapılabilecek düz yüzeyleri barındıracak tarzda işlenmiştir. Ayrıca düz yüzeyler arası (merdaneler arası) mesafenin çok hassas ayarlanabilmesi için merdane setine komparatörler yerleştirilmiştir. Çıkış kalıbındaki oynamanın giderilmesi için çıkış kalıp seti tümüyle değiştirilmiştir. Cihazın son hali Şekil 3.28'de sunulmuştur. Şekil 3.29'da kanallı ve dokulu merdane ile üretilmiş numuneler kıyaslanmak amacıyla verilmiştir.



Şekil 3.27 Son merdane yüzeyi ve hassas ayar için komparatörler



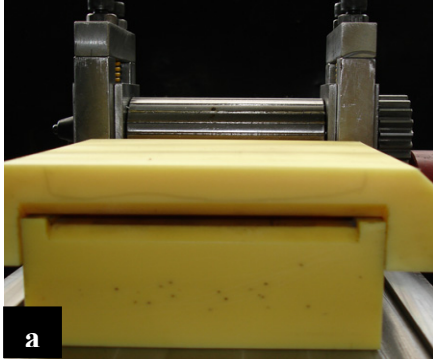
Şekil 3.28 DCAP düzeneğinin son hali



**Şekil 3.29** DCAP sistemiyle üretilen numuneler  
(a) kanallı merdane, (b) dokulu merdane, (c) Kısmi dokulu merdane

#### 3.3.1.4. Kesintisiz Tezgahta (DCAP) Sıcak İşlem Tasarımı

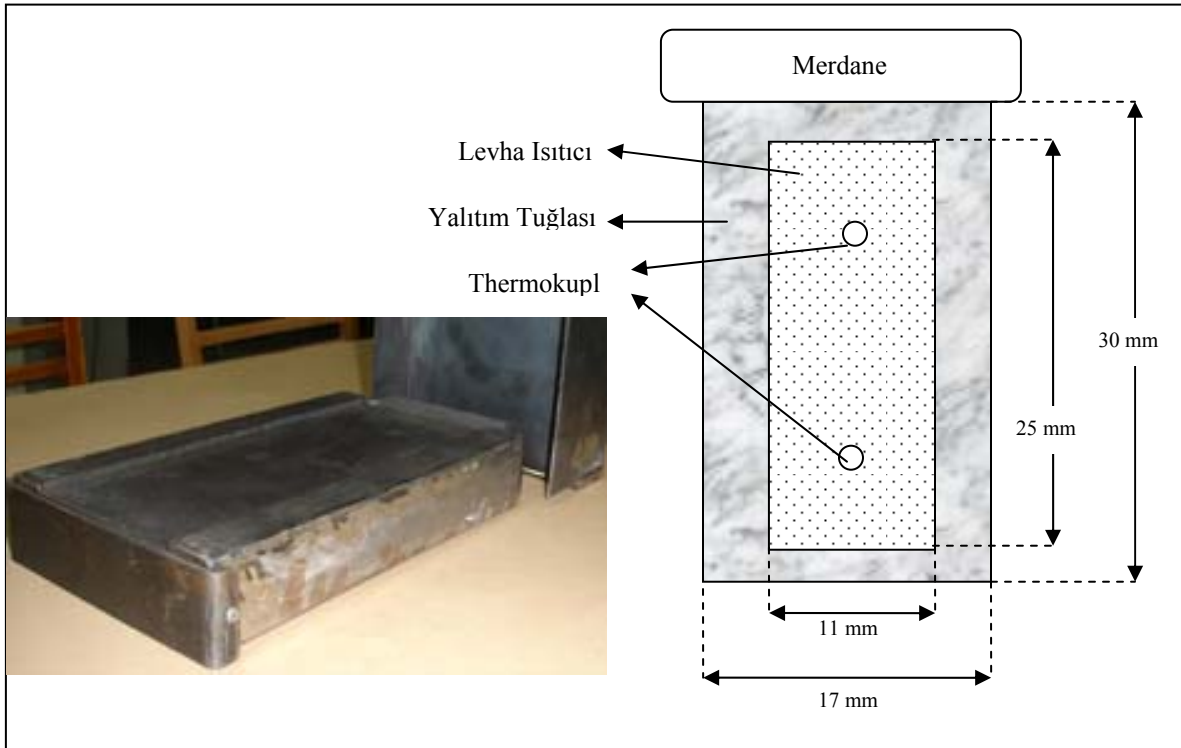
Sıcak işlem için malzemenin merdaneye girmeden önce istenilen sıcaklığa ısıtılması amacıyla polyamid parçanın yerine bir fırın tasarlanmış ve bölüm imkanları ile imal edilmiştir (Şekil 3.30). Isıtıcı eleman grubu olarak rezistans tel, standart ocak ısıtıcısı ve levha ısıtıcılar denenmiş; en verimli sonuç levha ısıtıcıyla alınmıştır. Tasarımda üst bölümde sadece yalıtım malzemesinin, alt bölümde ise Şekil 3.32’de şematik olarak gösterilen yalıtım tuğlası–levha ısıtıcı grubunun yer alması planlanmıştır. Bu tasarım 25mm x 11mm ölçülerinde alüminyum levhayı DCAP öncesi ısıtacak yapıdadır. Isıtma hızının ayarlanabilmesi ve sıcaklık sabitlenmesi amaçlı tasarlanan ısıtıcı kontrol sistemi (Şekil 3.31); katı-hal rölesi (solid state relay), akım ayarlayıcı (dimmer), ampermetre ve sıcaklık kontrolöründen oluşmaktadır. Sistemin sıcaklığı ikinci bir termokupl ile kontrol edilebilmektedir. Ön çalışmalarda 300–600°C aralıklarında ısıtma süreleri ve ayarlanan sıcaklıkta sabitlenmeyi kolaylaştıracak amperaj değerleri saptanmıştır. Merdane tasarımının ve son yapılan değişimle cihaz ana iskeletindeki değişimle fırın kısmı modifiye gerektirmiş ve montaj tamamlanamamıştır. DCAP sisteminde öncelik hatasız test yapılabilir numune üretimine verildiği için sıcak işlem safhasına geçilememiştir.



Şekil 3.30 (a) Merdane öncesi polyamid numune yolu, (b) Tasarlanan fırınlı numune yolu



Şekil 3.31 Fırın düzeneği ve kontrol ünitesi



Şekil 3.32 Fırınlı numune yolu iç şematik görünümü

### **3.3.2. DCAP Numunelerinin Karakterizasyonu**

#### **3.3.2.1. Çekme Testi**

Çekme testi için numuneler ASTM B557M-02a standartına göre hazırlanmıştır. Numuneler 10kN kapasiteli Schimadzu dijital çekme cihaz sistemi ile 0,5mm/dakika sabit hızla çekilerek koparılmış; yük-uzama verileri analiz edilmiştir.

#### **3.3.2.2. Sertlik Taraması**

Numunelerin Brinell sertlik taramaları 2,5mm çelik top uçlu Heckert analog sertlik cihazıyla ve Vickers sertlikler (HV30) ise EMCO Universal Digital cihazıyla yapılmıştır.



## 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Projenin temelinde deformasyon sistemi tasarlayıp; malzeme mekanik ve mikroyapı incelemesi olmasına karşın; laboratuvar ölçekli kalıp (ECAP) deformasyonu üzerine modelleme çalışmalarına proje süresince devam edilerek katkı sağlanmıştır. Dolayısıyla ECAP sistemi modelleme çalışmalarından elde edilen bulgular ayrı bir başlık altında sunulmuştur. Modelleme sonuçlarının ardından sırası ile ECAP deformasyonunun Al-2024 alaşımı mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkilerinin incelendiği bölüm, ve kesintisiz tezgahla (DCAP) deformasyonun modelleme sonuçlarının sunulduğu ve malzeme özelliklerine etkilerinin incelendiği son bölüm yer almaktadır.

### 4.1. Modelleme Bulguları

Modelleme çalışmalarıyla ECAP işlem parametrelerinin (kalıp geometrisi, sürtünme katsayısı) ve deforme edilen malzeme özelliklerinin (deformasyon pekleşmesi parametreleri/mekanizmaları ve deformasyon hızı hassasiyeti) işlem performansına etkileri incelenmiştir. Ayrıca malzeme sertleşme mekanizmaları ve hasar oluşumunun ECAP deformasyonuna uğrayan malzeme üzerine etkileri tartışılmıştır.

#### 4.1.1. Kalıp Geometrisinin Etkisi

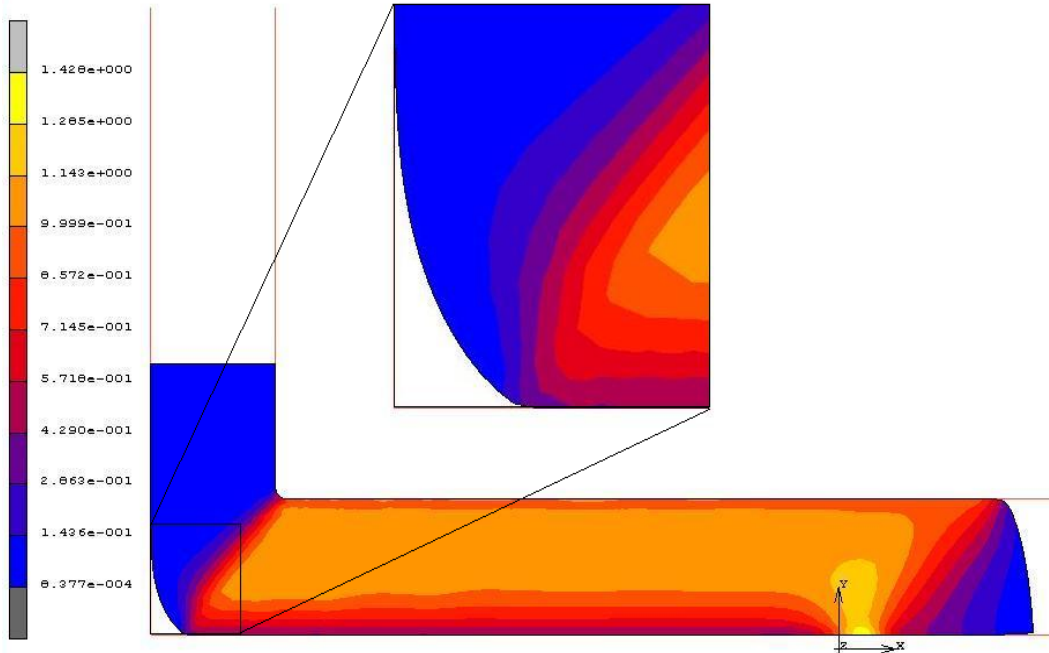
Kalıp geometrisinin gerinme homojenliğine etkisinin incelenmesi amacıyla  $\Phi$  ve  $\Psi$  açılarının çeşitli kombinasyonları için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.  $\Phi$  için literatürde sıkça kullanılan  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  ve  $150^\circ$ ,  $\Psi$  için ise  $0^\circ$ ,  $22^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  tercih edilmiştir.

Deformasyonun yatay ekseninde nispeten homojen olduğu göze çarpmaktadır (Şekil 4.1). Fakat, parçanın kalınlığı (dikey kesit) boyunca plastik gerinmeler değişkenlik gösterdiğinden daha çok dikey kesitteki deformasyon homojenliği irdelenmiştir. Diğer önemli nokta ise köşe boşluğu oluşumudur. ECAP sırasında ekstrüzyondaki “ölü metal bölgesi” oluşumuna benzer şekilde metalin kalıbın bir bölgesini doldurmadığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni parçanın üst kısmı ile alt kısımlarının farklı hızlarda deformasyona uğraması ve takip ettikleri yolların farklılığıdır. Pekleşen bir malzemede önce deformasyona uğrayan bölgeler hızla sertleşip ileriki aşamalarda daha yavaş akmaktadır. Bu yüzden deformasyon bölgesinde, kalıbın üst yüzeyi ile alt yüzeyi arasında bir hız farkı oluşmaktadır. Bu durum, deformasyonun homojenliğinin kaybının ana sorumlusu olan köşe boşluğu oluşumunun temel sebebidir.

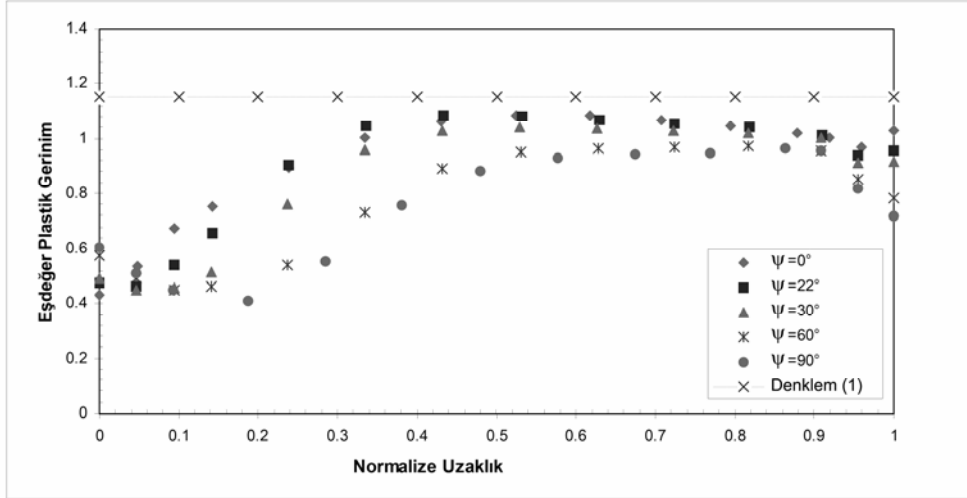
Şekil 4.2’de plastik gerinmelerin parçanın orta kesimlerinde teorik değerlere yakın bir plato oluşturduğu ve buradan kalıp yönündeki iki kenara doğru uzaklaştıkça plastik deformasyonun azaldığı görülmektedir. Kalıbın üst yüzeyine yakın tarafta bu düşme bir süre sonra tekrar artışa dönüşürken, alt yüzeyde böyle bir davranış gözlenmemektedir. Bu nedenle, minimum plastik deformasyon bölgesi alt yüzeyden bir miktar yukarıda konumdadır.

Diğer önemli bir sonuç ise, dış kalıp açısının malzemeye bir pasoda verilebilecek maksimum etkin plastik deformasyonu değiştirdiğidir. Sonlu elemanlar simülasyonları sonucunda parçanın orta kısımlarında bağıntı (3.1) ile öngörülen teorik değere yakın maksimum gerinmeler gözlemlenmiştir. Buna göre,  $\Phi$  arttıkça bir pasoda ulaşılabilen maksimum plastik deformasyon azalmaktadır. Zira maksimum eşdeğer plastik gerinmenin  $\Phi=90^0$ ,  $120^0$  ve  $150^0$  için değerleri sırasıyla yaklaşık olarak 1.1, 0.6 ve 0.3 olarak hesaplanmıştır.  $\Psi$  açısı ise sadece  $90^0$ 'lık kalıp için maksimum plastik deformasyona kayda değer bir etki yapmaktadır. Geniş açılı kalıplarda iç kalıp açısının maksimum plastik gerinmeye ciddi bir etkisi bulunmamıştır. Simülasyonlarda elde edilen değerlerin bağıntı (3.1)'de sunulan değerlere ulaşamamasının nedeni, bu denklem çıkarılırken ideal pekleşmeyen plastik malzeme varsayımı yapılmıştır. Bu yüzden köşe boşluğu da oluşmadığı kabul edilmiştir. Zira, boşluk oluşumunun temel nedeni farklı yollarda hareket edip deforme olan kısımların farklı miktarlarda sertleşmesidir. Pekleşmeyen plastik malzeme için böyle bir hız farklılık olmadığından köşe boşluğu oluşumu beklenemez.

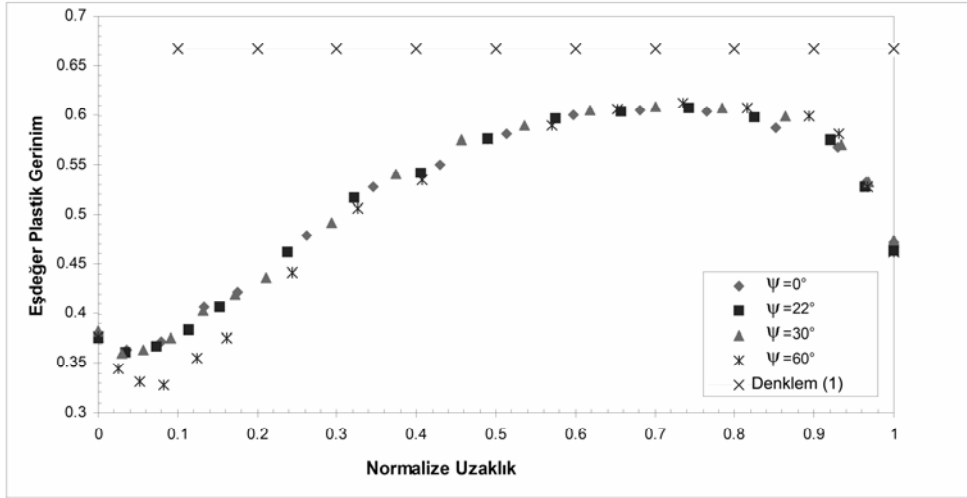
Deformasyon homojenliği bakımından  $\Phi$  açısı,  $\Psi$  açısından daha etkindir. Hatta geniş açılı kalıplar için iç kalıp açısının etkin plastik gerinme profiline olan etkisi yok denecek kadar azdır. Deformasyonun homojenliğinin nicel olarak değerlendirilmesi oldukça zor olduğundan, homojenlik kriteri olarak orta bölgedeki homojen bölgenin genişliği ve maksimum plastik gerinmenin minimuma oranı dikkate alınmıştır. Buna göre, geniş açılı kalıpların nispeten daha homojen deformasyona sebep olduğu söylenebilir. Fakat maksimum plastik gerinmeden bir miktar feragat ederek dik açılı kalıpta  $60^0$  ya da  $90^0$  iç kalıp açısı kullanarak benzer bir homojenlik oranına ulaşmak mümkündür. Bu şekilde bir pasoda elde edilen maksimum plastik gerinme ile deformasyon homojenliği arasında bir denge kurulabilmektedir. Bu yüzden dik açılı kalıp ve geniş iç kalıp açısı veya  $120^0$ 'lık kalıbın pratik uygulanabilirlikleri daha yüksektir. Zira,  $\Phi=150^0$  için bir pasoda ulaşılabilecek maksimum plastik deformasyon oldukça düşüktür ve istenen tane incelmesinin elde edilebilmesi için işlemin defalarca tekrarlanması gerekmektedir.



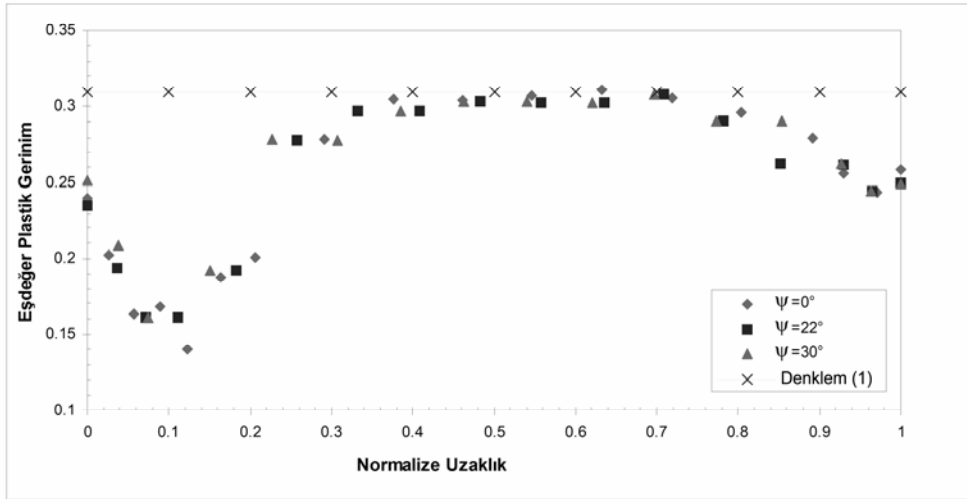
Şekil 4.1 Sürtünmesiz durum için tipik plastik gerinme dağılımı ve köşe boşluğu oluşumu.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.2 Sürtünmesiz durum için kalıp geometrisinin dikey kesitte plastik deformasyon homojenliğine etkisi (a)  $\Phi=90^\circ$ , (b)  $\Phi=120^\circ$ , (c)  $\Phi=150^\circ$



#### 4.1.2. Sürtünme Etkisi

Dik açılı kalıp üzerinde sürtünmesiz durumdan, sürtünme katsayısının  $\mu=0.15$  olduğu duruma kadar 0.025'lik adımlarla sürtünme katsayısı değiştirilerek simülasyonlar tekrarlanmıştır. Simülasyon sonuçları, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de özetlenmiştir.

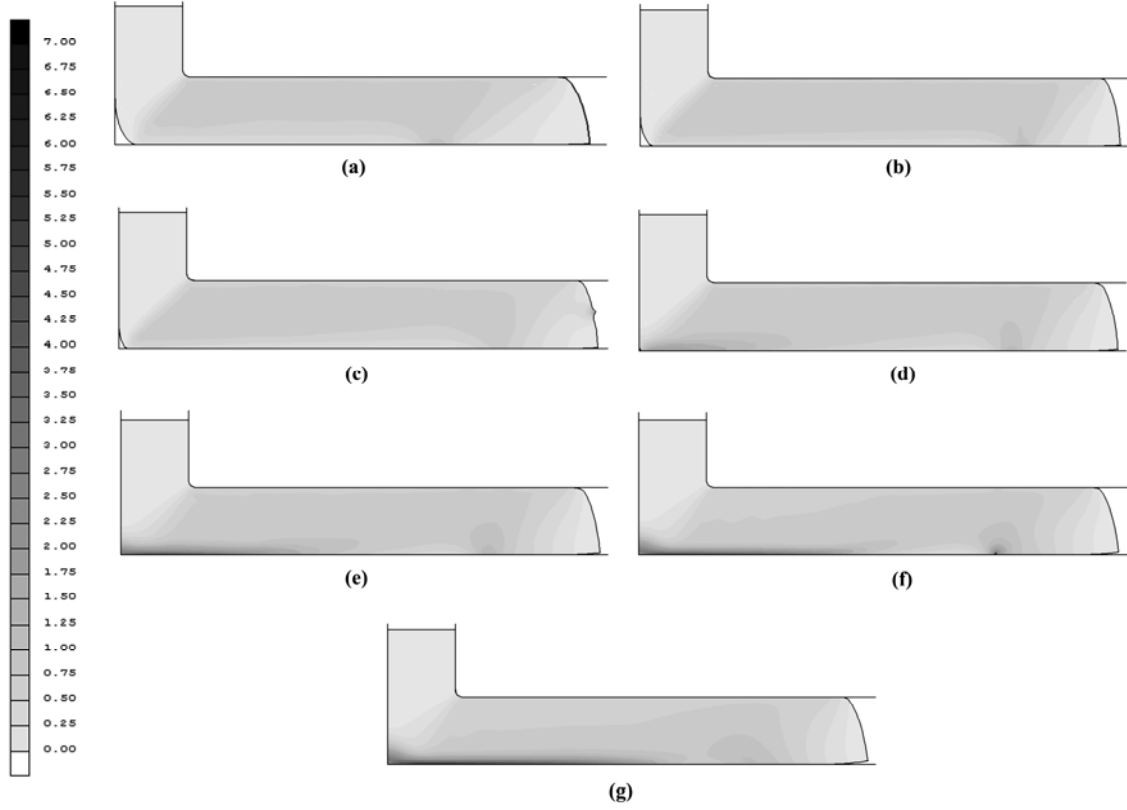
Şekil 4.3'te sürtünme katsayısı arttıkça köşe boşluğu oluşumunun azaldığı, hatta  $\mu=0.1$ 'den büyük değerler için boşluğun tamamen kapandığı görülmektedir. ECAP işleminin başlangıcında oluşan köşe boşluğu, deformasyonun ilerleyen sürecinde alt yüzeydeki etkin sürtünme kuvvetlerinin etkisiyle metalin ters yönde akması sonucunda kapanmıştır. Fakat bu bölgeler, sürtünme kuvvetleri tarafında aşırı miktarda plastik deformasyona uğramıştır. Bu durum, köşe boşluğu oluşumun engellenmesine rağmen, daha kötü bir etki yaratarak, deformasyon homojenliğinin kaybına sebep olmuştur.

Şekil 4.4'te sürtünmenin dikey deformasyon homojenliğine olan etkisi nicel olarak incelenmiştir. Sürtünmesiz durumla karşılaştırıldığında  $\mu>0.1$  olduğunda alt kalıp yüzeyinde sürtünme kayma kuvvetlerinden ötürü yerel olarak yoğun plastik deformasyon gözlenmektedir. Fakat, az miktarda sürtünmenin deformasyon homojenliğine pozitif etkisi olduğu söylenebilir. Sürtünme kuvvetlerinin oluşturduğu direnç, alt ve üst kalıp yüzeyleri arasındaki kayma hızı farklılıklarını azaltarak, pekleşmenin etkisini azaltmaktadır. Fakat bir noktadan sonra malzeme alt yüzeyde sürtünme nedeniyle yoğun plastik deformasyona uğramakta, hatta ileriki aşamalarda ters yönde akmaya başlayarak köşe boşluğunu doldurmaktadır. Sonuçlar, ideal deformasyon homojenliği için sürtünme katsayısının 0.075 ile 0.1 arasında olması gerektiğini göstermektedir.

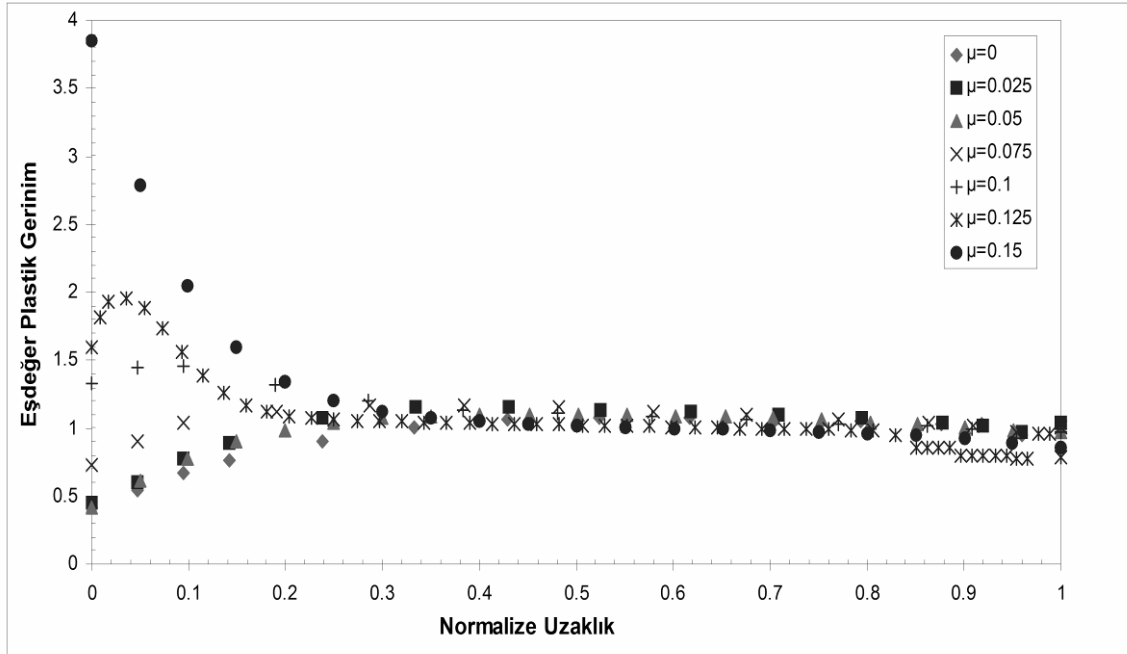
Deformasyon homojenliğini arttırmak için uygulanacak diğer bir yöntem ise kalıbın alt kısmına üst kısmından nispeten daha yüksek farklı bir sürtünme katsayısı uygulamaktır. Fakat, pratik uygulamada böyle bir kalıp üretimi ve yağlama koşullarının ayarlanması çok zor olacağından bu durum için simülasyonlar gerçekleştirilmemiştir.

Bu sonuçlardan yararlanılarak proje ile ilgili şu kararlar alınmıştır:

- (1) Laboratuvar ölçekli veya kesintisiz üretim için dış kalıp açısı  $90^0$  veya  $120^0$  olmalıdır.  $90^0$  kalıplar için yüksek iç kalıp açısı tercih edilmelidir. Bu şekilde bir pasoda hem yüksek plastik gerinme hem de uygun gerinme homojenliği elde edilebilecektir.
- (2) Mümkün olduğunca iyi bir yağlama yapılmalıdır. En iyi sonuçlar  $\mu = 0.75-0.1$  arasında elde edilmiş olsa da sürtünmenin bu kadar hassas kontrolü pratikte zor olduğundan elde edilebilecek en iyi yağlama türü uygulanmalıdır. Zira düşük sürtünme yüksek sürtünmeden çok daha az zararlı bulunmuştur.



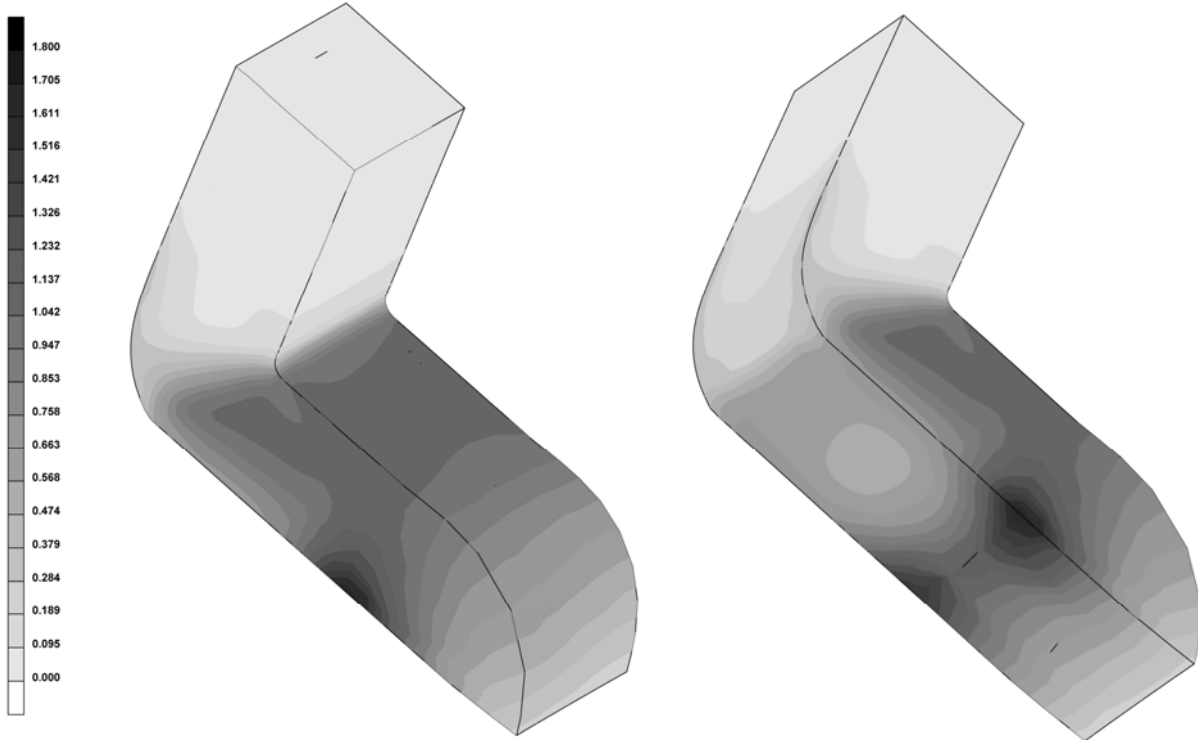
Şekil 4.3 Değişik sürtünme koşulları altında eşdeğer gerinme dağılımları :  
 (a)  $\mu=0$ , (b) 0.025, (c) 0.050, (d) 0.075, (e) 0.100, (f) 0.125, (g) 0.150



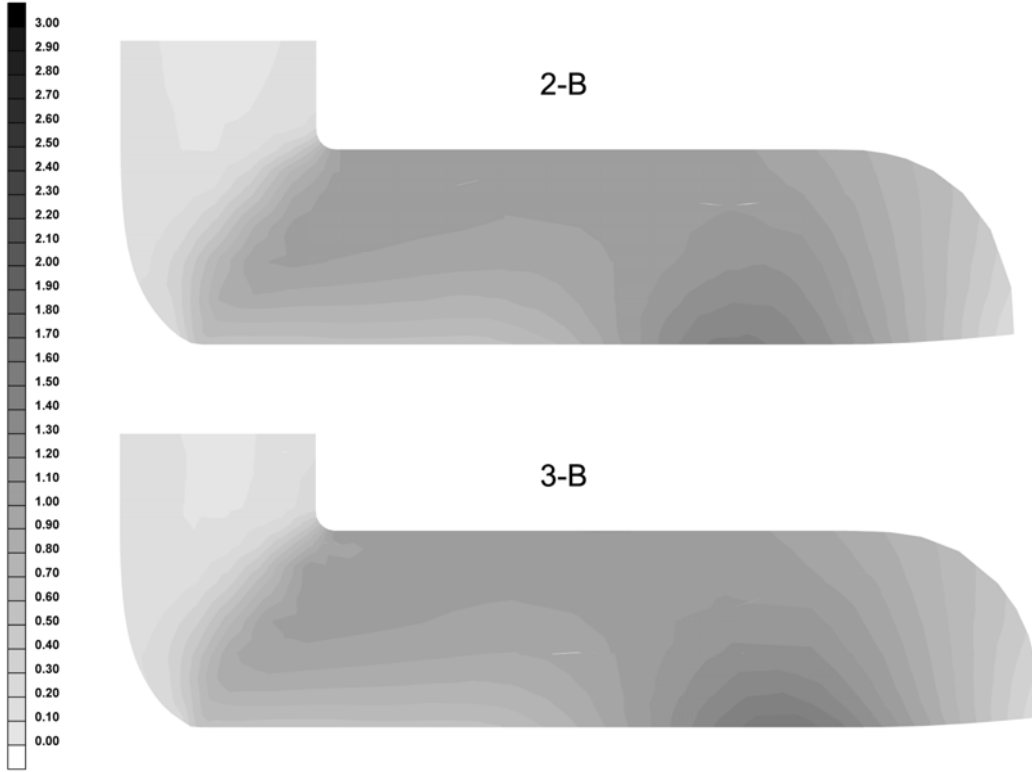
Şekil 4.4 Dik açılı kalıp için değişik sürtünme durumları için dikey kesit için eşdeğer gerinme dağılımları

### 4.1.3. 3-Boyutlu Analiz Karşılaştırması

Şekil 4.5’de 3 boyutlu simülasyonlarda elde edilen numune üzerindeki eşdeğer plastik gerilmelerin dağılımı sunulmuştur. Temel olarak 2 boyut varsayımının doğruluğunu kontrol etmek için 2 boyutta sabit olduğu varsayılan derinlik yönündeki gerilmelerin dağılımından faydalanılabilir. Bu şekilde de açıkça görüldüğü üzere parçanın x-z ve y-z düzlemlerindeki eşdeğer plastik gerinme miktarı oldukça homojendir. Aynı zamanda parçanın derinlik yönünün ortasından alınan bir kesitteki plastik gerinme miktarları 2 boyutlu modelle karşılaştırılmıştır. ECAP işlemi sonunda her iki varsayımın sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için merkez düzlemdaki eşdeğer plastik gerinme dağılımları Şekil 4.6’da sunulmuştur. Bu değerlerin 2 boyut varsayımı ile elde edilen değerlere çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu noktadan yola çıkarak ve 3 boyutlu simülasyonların daha uzun zaman almasından ötürü, simülasyon çalışmalarının düzlem gerinme varsayımı ile yapılmasına karar verilmiştir.



Şekil 4.5 ECAP işlemi sırasında iş parçasında eşdeğer plastik gerinme dağılımı

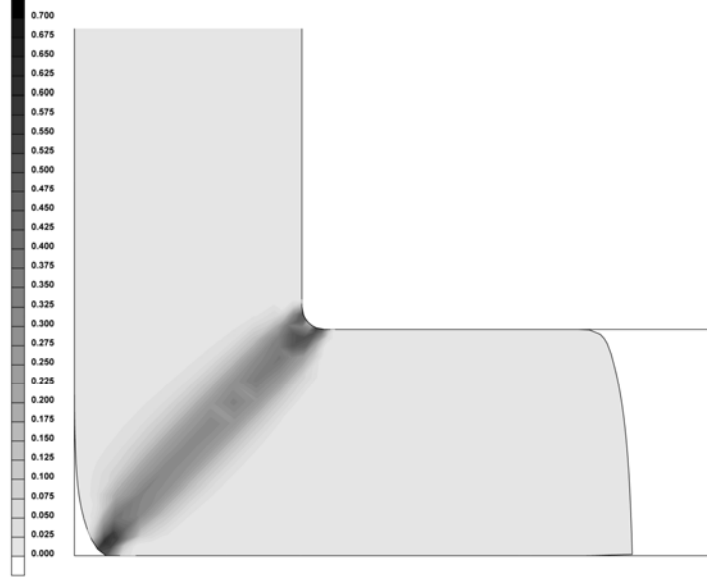


**Şekil 4.6** 2 ve 3 boyutlu ECAP simülasyonları sonucunda merkez düzlemdeki eşdeğer plastik gerinmelerin karşılaştırılması

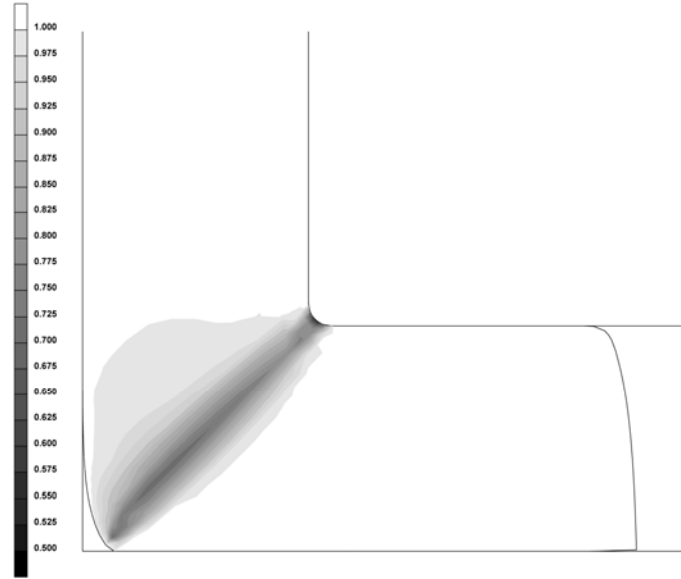
#### 4.1.4. Malzeme Özelliklerinin ve Köşe Boşluğu Oluşma Mekanizması Etkisi

İdeal durum varsayımında, ECAP işlemi sırasında deformasyon iç ve dış kalıbı birleştiren düzlem üzerinde basit kayma ile gerçekleşmektedir. Fakat malzemenin gerçek davranışının bundan uzak olduğu gözlemlenmiştir. Yol farkı ve malzemenin gerinme pekleşmesi karakteristiklerinden ötürü köşe boşluğu oluşmakta ve bu deformasyon bölgesinin bir düzlem olmaktan çıkıp hacimsel bir durum almasına neden olmaktadır. ECAP işlemi sırasında deformasyon bölgesinin belirlenmesi için eşdeğer gerinme hızı veya eşdeğer gerilme konturlarından yararlanılabilir. Şekil 4.7’de görüldüğü üzere deformasyon bölgesi bir düzlem değil yaklaşık elips şeklinde bir bölgedir. Dikkat edilmesi gereken diğer husus, bu bölgede gerinme hızının değişken olmasıdır.

Köşe boşluğu oluşmasının nedeni deformasyon bölgesinin üst ve alt kısımlarındaki hızlar arasındaki farklılık olarak belirlenmiştir. Şekil 4.8’de hızın deformasyon bölgesindeki değişimine bakıldığında, kalıbın alt tarafına temas ederek akan kısmın üst tarafına temas eden kısımdan daha hızlı aktığı ve bunun sonucunda köşe boşluğu oluştuğu görülmektedir. Bu hız farkına yol farkı, sürtünme ve malzemenin pekleşme özellikleri neden olmaktadır. İster pekleşen, ister pekleşmeyen malzeme olsun deformasyon sırasında kalıbın iç kısmına yakın olan noktaların takip ettiği yol dış kısmına yakın olanlardan daha kısadır. Fakat bu durum, parça çok kalın olmadığı sürece hatırı sayılır bir hız farkına ve köşe boşluğu oluşumuna sebep olmamaktadır. Literatürde de Al-6061 gibi neredeyse pekleşmeyen alüminyum alaşımlarda köşe boşluğu oluşumu belirgin biçimde gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.7 ECAP işlemi sırasında eşdeğer plastik gerinme hızı dağılımı.



Şekil 4.8 ECAP işlemi sırasında hız dağılımı

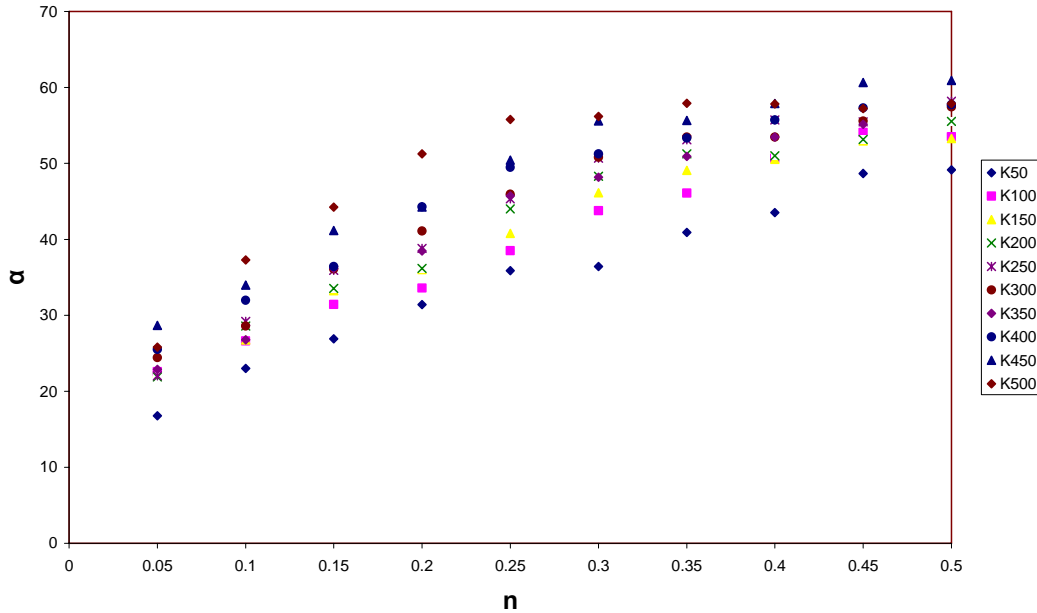
Sürtünme de, yol farkı etkisini arttırması nedeniyle, köşe boşluğu oluşumunda etkindir. Bununla birlikte, kalıbın üst ve alt yüzeylerinde aynı düşük sürtünme katsayısı varsayılırsa sürtünmenin bu kısımlara yaklaşık aynı şekilde etki ederek sonuçları çok değiştirmeyeceği varsayılabilir. Buradan yola çıkarak kalıbın alt kısmına üst kısmından daha yüksek bir sürtünme vererek köşe boşluğunun azaltılmasının mümkün olabileceği sonucuna varılabilir.

ECAP sırasında köşe boşluğu oluşumunun en önemli sebebi malzemenin pekleşmesidir. ECAP işleminin ilk aşamasında deformasyon bölgesine giren parçacıklar farklı gerinme geçmişlerine sahiptirler. Örneğin, deformasyon bölgesine giren çıkış kanalının üst kısmına yakın olan parçacıklar alt kısımdakilere oranla daha büyük gerinmelere maruz kalırlar ve yerel bir pekleşme

gözlemlenir. Daha az gerinmelere maruz kalan alt kısımlar daha yumuşaktır. Akma ve normalite yasası gereğince plastik gerinme hızı vektörünün uzunluğu akma fonksiyonelinin gerilme durumuna göre türevi ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla, kalıbın üst kısmında daha fazla sertleşmiş olan kısmın plastik olarak daha yavaş akması gerekir. Plastik gerinme hızlarındaki farklılık malzemenin akış hızına etki edecek ve bu da köşe boşluğu oluşumuna sebep olacaktır.

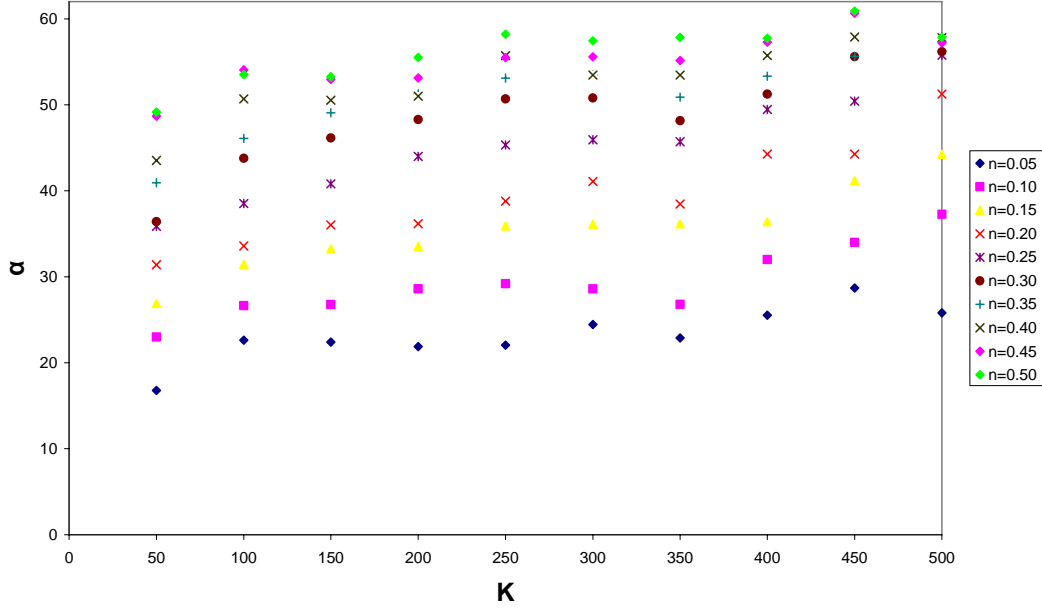
Herhangi bir nedenle malzemenin yerel akma dayancını yükselten bir durum, köşe boşluğu oluşumuna yardımcı olacaktır. Bunun sebebi, plastik geçmiş farklılığından kaynaklı gerinme sertleşmesi ya da örneğin gerinme hızı hassasiyeti olabilir. Genel olarak Al alaşımlarının oda sıcaklığında ECAP sırasında görülen gerinme hızları aralığında gerinme hızı hassasiyetleri düşüktür. Deformasyon hızı da 1 mm/saniye gibi düşük bir hız kabul edildiğinden bu çalışmada gerinme hızının köşe boşluğu oluşumuna etkisi ihmal edilmiştir.

Şekil 4.9, köşe boşluğu ve akabinde deformasyon heterojenliğinin  $n$  değeri arttıkça belirgin bir biçimde arttığını göstermektedir. Artış rejimi için parabolik denilebilir. Bu sonuç önceki bölümde açıklanan prensiplerle uyumludur. Yüksek  $n$  değerleri malzemenin deformasyon bölgesinin üst ve alt kısımlarındaki akma dayançlarındaki farklılığın daha fazla olmasına ve akma kanununun sonucu olarak üst kısımdaki malzemenin alt kısma oranla belirgin biçimde daha yavaş akmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla, malzeme köşe boşluğu açısı artmaktadır.



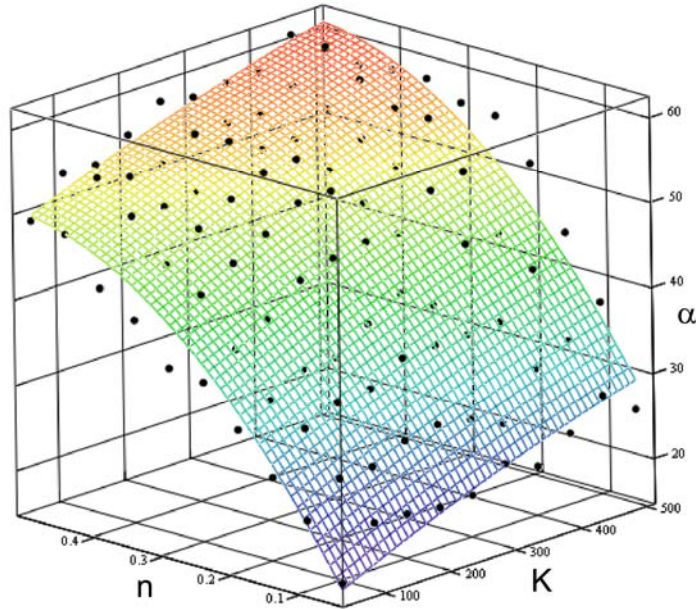
Şekil 4.9 Köşe boşluğu açısının ( $\alpha$ ) gerinme pekleşmesi üssü ( $n$ ) ile değişimi

Şekil 4.10, malzeme gerinme pekleşmesi çarpanının da ( $K$ )  $n$ 'ye benzer bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Burada,  $K$ 'nın etkisinin  $n$ 'ye oranla daha az olduğuna dikkat edilmelidir. Köşe boşluğu oluşumunun temel sebebi pekleşme üssü ( $n$ ) olmakla birlikte  $K$ 'nın da bir miktar etkisi vardır.  $K$ 'nın etkisi malzemenin akma dayanıcındaki artışı artırarak köşe boşluğu oluşumunu daha belirgin hale getirmektedir. Bu etki, yüksek  $n$  değerine sahip malzemelerde daha belirgindir. Zaten  $K$  parametresi Ludwik denkleminde çarpan olarak bulunurken,  $n$  üst şeklinde yer almaktadır.  $K$ 'nın köşe boşluğu açısına olan etkisi kabaca doğrusal kabul edilebilir.



Şekil 4.10 Köşe boşluğu açısının ( $\alpha$ ) gerinme sertleşmesi çarpanı (K) ile değişimi

Şekil 4.11'de K ve n'nin köşe açısı üzerindeki birleşik etkisini görmek için 3 boyutlu bir grafik sunulmuştur. Elde edilen veri noktalarına çok değişkenli regresyon analizi uygulanarak bu noktalara en yakın 2. derece yüzey belirlenmiştir. Buna göre, köşe boşluğu açısının K ile değişimi doğrusal, n ile değişimi parabolik kabul edilebilir. Sonuç olarak, gerinme pekleşmesine uğrayan malzemeler için ECAP kalıbı tasarlanırken geometrik faktörlerin yanı sıra malzeme özelliklerinin de göze alınması gerektiği anlaşılmıştır.

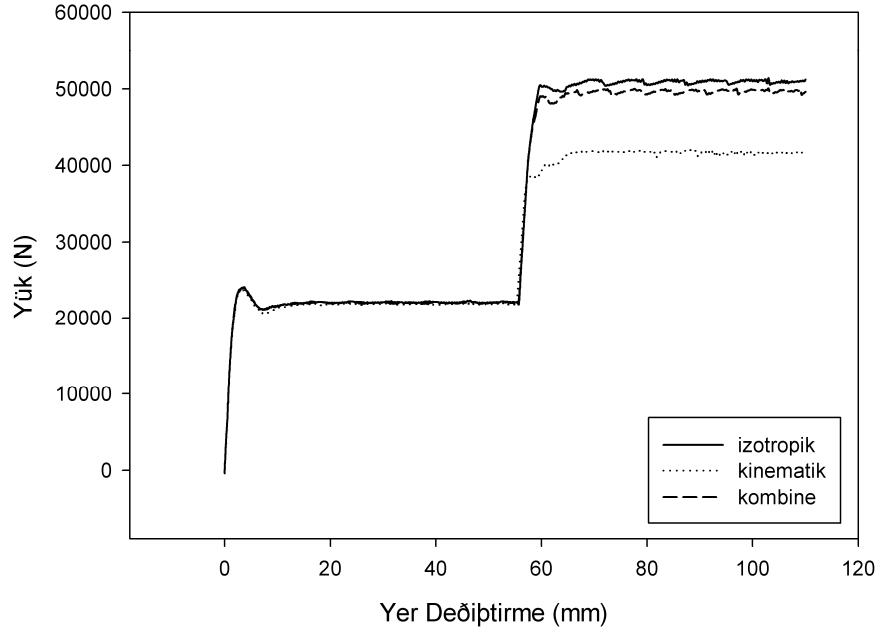


Şekil 4.11 Köşe boşluğu açısının ( $\alpha$ ) gerinme sertleşmesi çarpanı (K) ve üssü (n) ile değişimi

#### 4.1.5. Malzeme Sertleşme Mekanizmaları ve Hasar Oluşumu Etkileri

Şekil 4.12’de değişik sertleşme mekanizmalarının uygulanması gereken kuvvete etkisi sunulmuştur. Sonuçlara göre, izotropik ve kombine sertleşen malzemeleri 2 kanallı ECAP kalıbından geçirebilmek için 500 MPa civarı bir basınç uygulanması gerekirken, kinematik sertleşme durumunda 400 MPa yeterli olmaktadır. Ters yükleme sırasında malzemenin akma dayanıcının azalmasından kaynaklanan bu etki beklenmekte olan bir etkidir. Kombine sertleşen malzeme 2 pasodan sonra izotropik sertleşen malzemeye yakın davranmaktadır. Fakat kinematik sertleşme yüksek gerinmelerde daha baskın olacağından ECAP işlemi sürdürülürse sonraki pasolarda aradaki farkın belirgin şekilde açılması beklenmektedir.

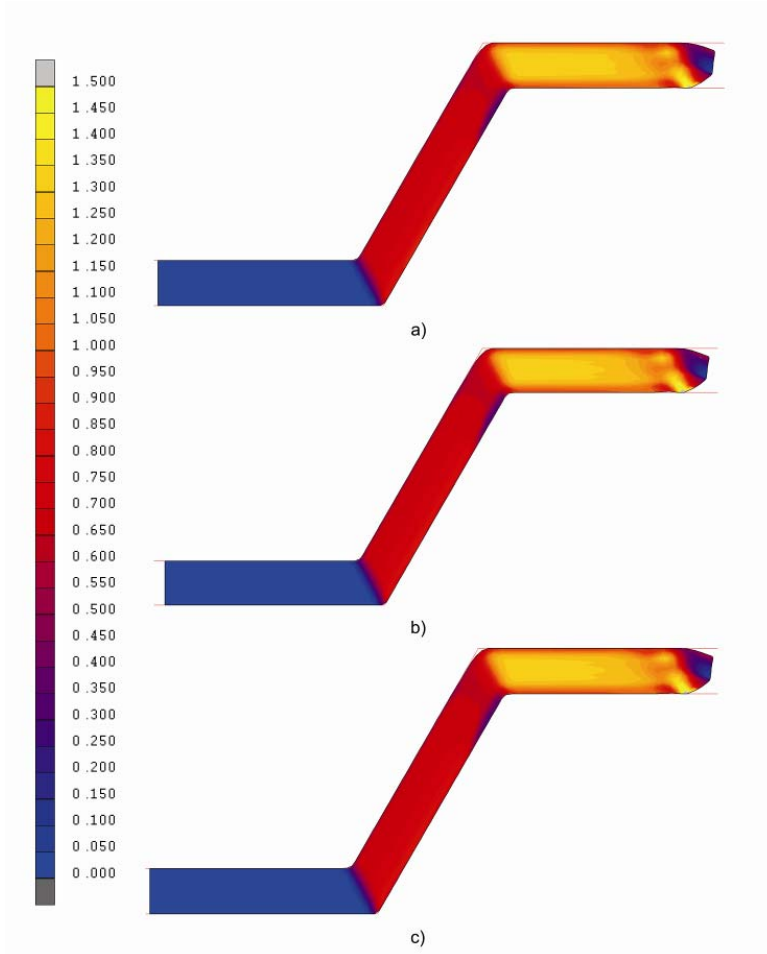
Bu kısımdan çıkarılabilecek önemli bir sonuç, kinematik sertleşen bir malzemenin ECAP işlemine tabii tutulmasının daha küçük bir presle gerçekleştirilebileceğidir. Aynı zamanda bu durum, kalıp dizaynı için de avantajlıdır. Zira, uygulanan kuvvetin azalması ile kalıba binecek yük de azalacaktır. Fakat, ECAP tasarımı için uygulanan kuvvet ve kalıbın yanısıra gerinme homojenliği ve hasar birikimi de incelenmelidir.



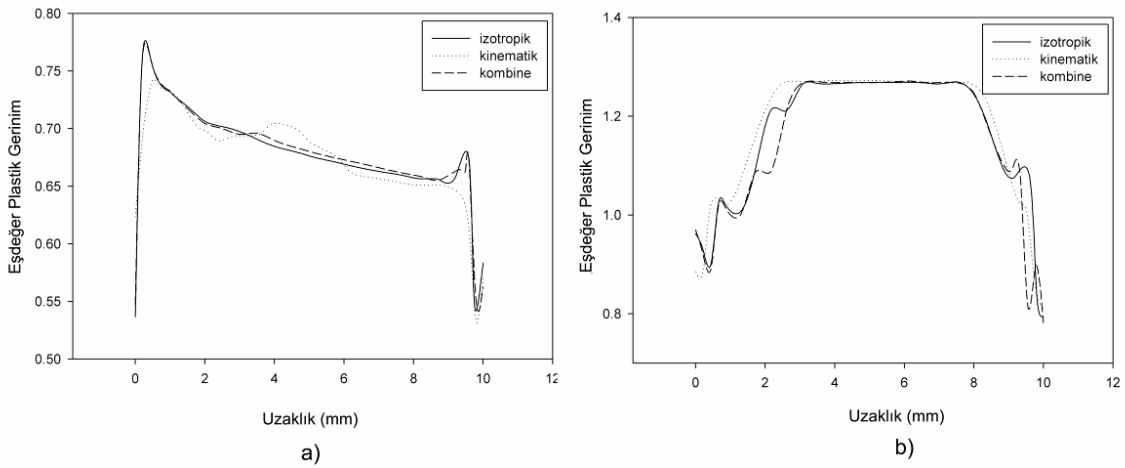
Şekil 4.12 Sertleşme mekanizmasının uygulanması gereken kuvvete olan etkisi.

Şekil 4.13’de 3 farklı sertleşme mekanizması için ECAP sırasında eşdeğer plastik gerinme dağılımı incelendiğinde, sertleşme mekanizmasının deformasyon bölgesini ve gerinme dağılımını önemli derecede etkilemediği görülmektedir. Daha ayrıntılı inceleme için, birinci ve ikinci pasolardan sonra malzemenin kesiti boyunca eşdeğer plastik gerinme dağılımı Şekil 4.14’te sunulmuştur. Buna göre, sertleşme mekanizması gerinme dağılımını etkilemekle birlikte baskın değildir. Yine Şekil 4.13’de köşe açısı oluşumunun sertleşme mekanizmasından etkilendiği görülmektedir. Bunun nedeni, özellikle ikinci paso sırasında gerinme hızları dağılımının malzemenin yumuşamasından etkilenmesidir.



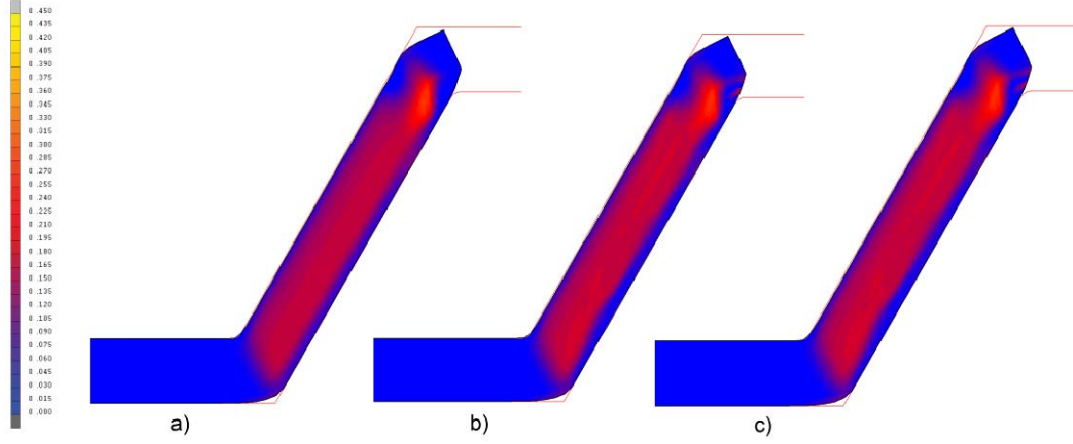


**Şekil 4.13** ECAP sonrasında çeşitli sertleşme mekanizmaları için eşdeğer plastik gerinme dağılımı  
**(a)** izotropik, **(b)** kinematik, **(c)** kombine



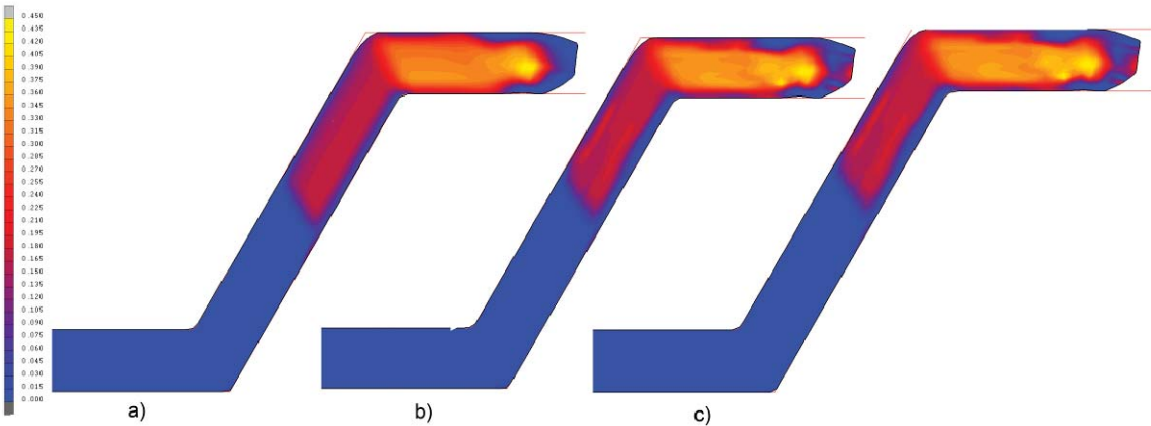
**Şekil 4.14** Malzemenin kesiti boyunca eşdeğer plastik gerinme dağılımı  
**(a)** birinci pasodan sonra, **(b)** ikinci pasodan sonra

Şekil 4.15'te, ilk paso sonunda değişik sertleşme mekanizmalarına sahip malzemelerde Cockcroft-Latham hasar indeksinin dağılımı sunulmuştur. Sonuçlara göre, ilk paso sonunda sertleşme mekanizmasının hasar birikime etkisi zayıftır, kinematik ve kombine sertleşen malzemelerde burun bölgesinde fazladan küçük bir hasar bölgesinin oluşması dışında belirgin bir fark yoktur.



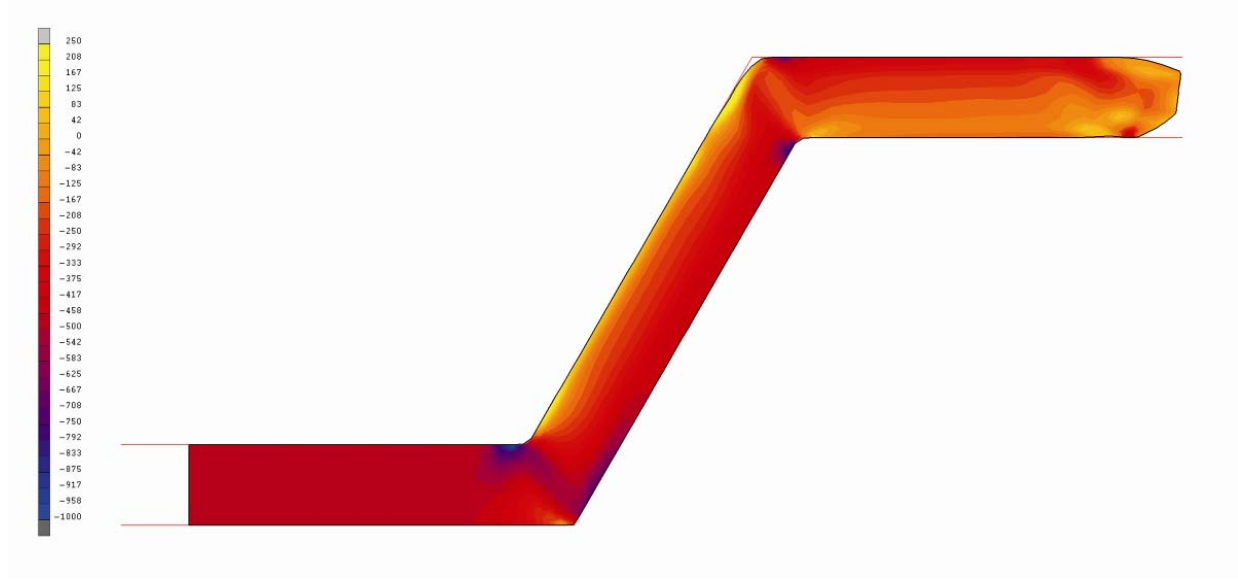
**Şekil 4.15** ECAP sırasında çeşitli sertleşme mekanizmaları için ilk pasodan sonra Cockcroft-Latham hasar indeksine göre malzemedeki hasar birikimi.  
(a) izotropik, (b) kinematik, (c) kombine

Şekil 4.16'da, sertleşme mekanizmasının 2. paso sonunda hasar birikimi sunulmuştur. Şekle göre, 2 paso sonunda sertleşme mekanizmasının hasar birikimine olan etkisi artmış olsa da, hala etkisi nispeten azdır. Kinematik ve kombine sertleşen malzemelerde hasar birikimi belli noktalarda daha yoğundur. Çok kez yinelenen ECAP işlemlerinde bu etkinin daha belirgin olması beklenmektedir. Bu yüzden kinematik sertleşen malzemelerin ECAP işlemi sırasında hasar birikimi oluşturmaya daha eğilimli olduğu söylenebilir.



**Şekil 4.16** ECAP sırasında, çeşitli sertleşme mekanizmaları için ikinci pasodan sonra Cockcroft-Latham hasar indeksine göre malzemedeki hasar birikimi.  
(a) izotropik, (b) kinematik, (c) kombine

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'nın karşılaştırılması sonucu ilginç bir gözlem yapılabilir. Malzemenin ilk kısmı ikinci pasoyu yaparken, diğer uçta ilk paso deformasyona uğrayan kısım artık çok az, hatta hiç hasara uğramamaktadır. Bu durumu açıklamak için hasar birikimine önemli etkisi olan hidrostatik basıncın durumu incelenmiştir. Şekil 4.17'de izotropik sertleşen bir malzemede hidrostatik gerilimin dağılımı sunulmuştur. Bu şekilde yararlanarak hasar oluşumunu engelleyen mekanizma açığa çıkarılabilir. Malzemenin uç kısmı, ikinci ECAP kanalına girerken deformasyona karşı gösterilen direnç, birinci kanaldan geçmekte olan malzemeye (1000 MPa'ya varan) yüksek hidrostatik basınç uygulanmaktadır. Bu yüksek hidrostatik basınç hata oluşumuna karşı direnci önemli ölçüde arttırmaktadır. Fakat, bu basıncın ilk kanalda deformasyonu zorlaştırma ve uygulanan yükü arttırmak gibi bir yan etkisi bulunmaktadır.



Şekil 4.17 ECAP sırasında hidrostatik gerilme dağılımı

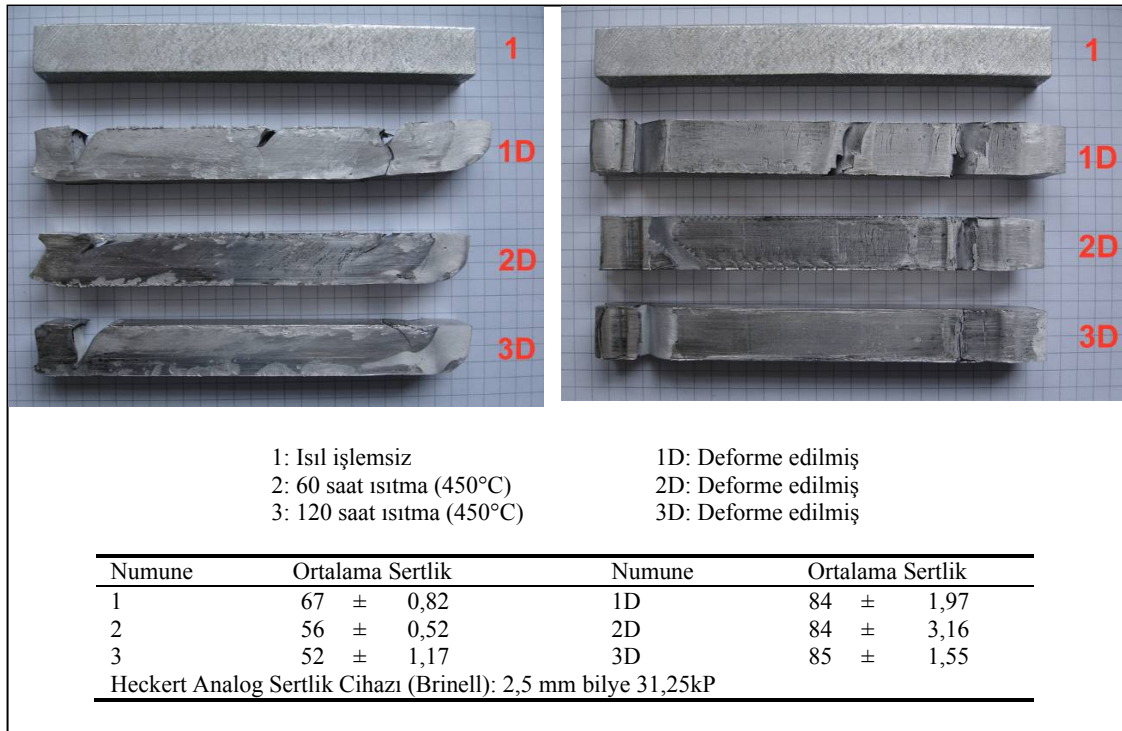
## 4.2. Laboratuvar Ölçekli Kalıp Bulguları (ECAP)

Bu bölümde ECAP sistemi kullanılarak deforme edilen farklı alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinde ve mikroyapısındaki değişim incelenmektedir. İlk bölümde sistem tasarımı sırasında elde edilen deneyim paylaşılmakta ve ECAP sisteminin getirdiği sonuçlar sunulmaktadır. İkinci kısım ise ECAP sistemi yapılandırıldıktan sonra gerçekleştirilen sistematik Al-2024 deneylerini kapsamaktadır.

### 4.2.1. Tasarım Sürecinde Elde Edilen Bulgular

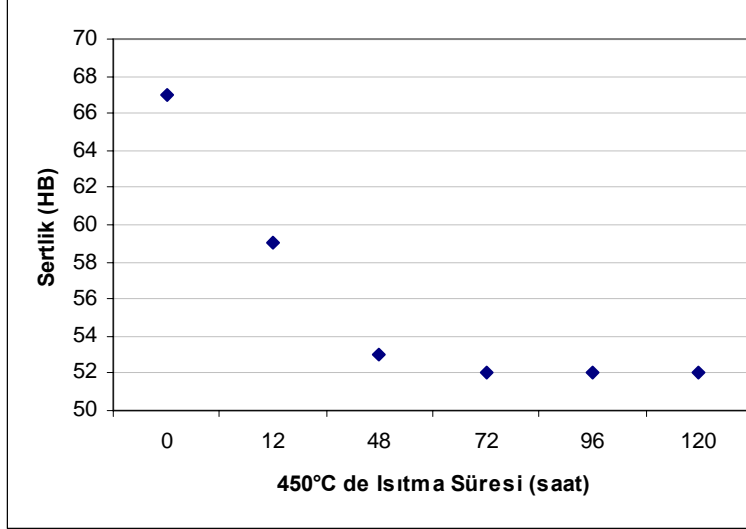
İlk denemeler bölüm olanaklarıyla üretilmiş 90°lik kalıp kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmalarda Al-6066 ve Al-5083 alaşımları kullanılmış ve ECAP yönteminin tanınmasında faydalı sonuçlar elde edilmiştir.

Öncelikle, 3 adet 6066 Al-alaşımı numunede (14mmx14mmx130mm) tek paso ECAP deformasyonu yapılmıştır. İlk numune deformasyon sırasında çeşitli noktalardan kırıldığından, ısıtma işlemi numuneler daha sünek hale getirilmiştir. 450°C’de 60 saat ve 120 saat ısıtılmış numunelerde kırılmanın sadece başlangıç ve bitiş kısmında olduğu ve kalan kısmın çatlaksız olduğu görülmüştür. Numunelerin yan yüzeylerinde, uzunluk boyunca 6 farklı noktada sertlik ölçümü alınmıştır (Şekil 4.18).



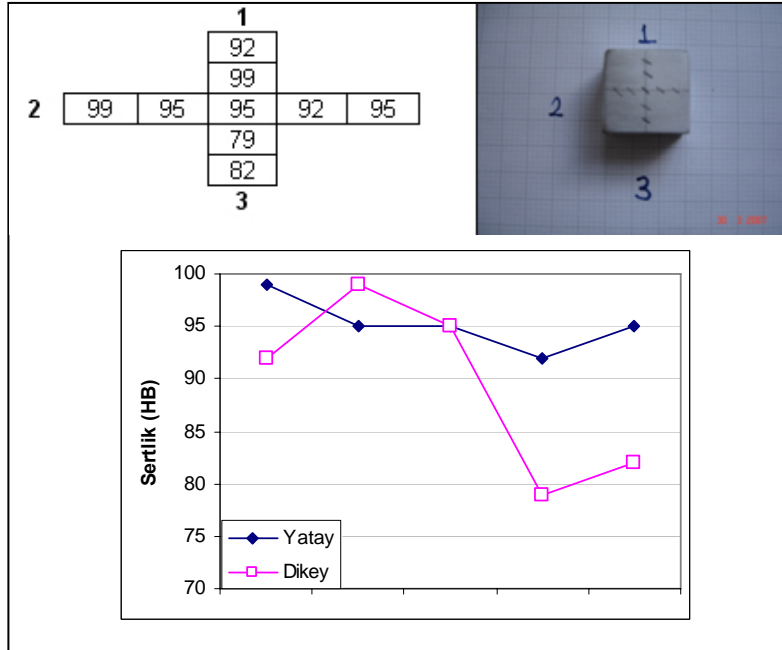
Şekil 4.18 Numunelerin farklı yönlerden fotoğrafları ve ortalama sertlik değerleri

Isıl işleme yumuşatma sırasında fırın içerisine yerleştiren şahit numune vasıtasıyla sertlik değişimi gözlenmiştir. Şekil 4.19’da sertliğin zamana bağlı değişimi, üçüncü gün sonunda sertlik değerinin sabitlendiğini göstermektedir.



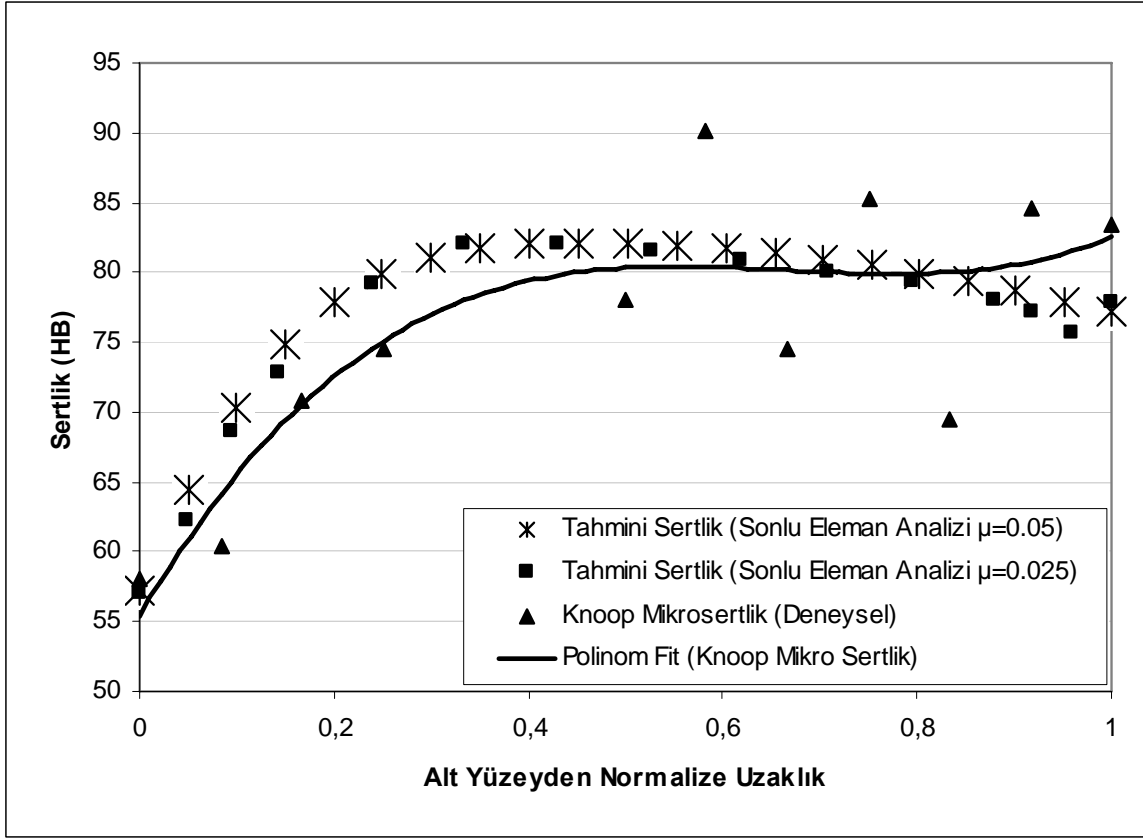
Şekil 4.19 6066 Al-alajımı numunelerde 450°C’de ısıtma süresine bağlı sertlik değişimi

450°C’de 120 saat ısıtılan numunenin orta bölümünden parça çıkarılarak; kesit bölgesinin makro ve mikro sertlik dağılımı incelenmiştir. Şekil 4.20’deki makro sertlik değişimi incelendiğinde yatay eksende pek bir değişim gözlenmediği buna rağmen deformasyonun etkilerinin dik eksende olduğu saptanmıştır. Dik eksendeki sertlik taraması birbirinden eşit uzaklıkta mikro-sertlik (Knoop) yöntemiyle tekrar edilmiştir (Şekil 4.21).



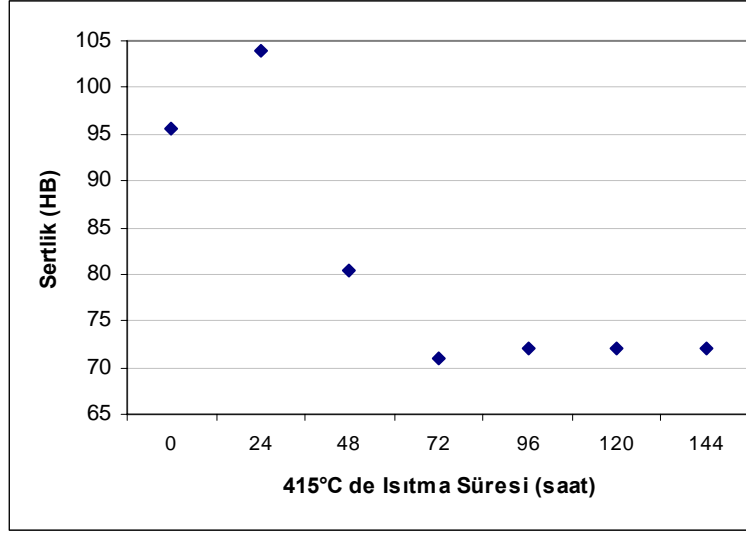
Şekil 4.20 ECAP sonrası kesit alanda makro-sertlik dağılımı

Plastik gerinmelerin parçanın orta kesimlerinde teorik değerlere yakın bir plato oluşturduğu ve buradan kalıp yönündeki iki kenara doğru uzaklaştıkça plastik deformasyonun azaldığı görülmektedir. Kalıbın üst yüzeyine yakın tarafta bu düşme bir süre sonra tekrar artışa dönüşürken, alt yüzeyde böyle bir davranış gözlenmemektedir. Bu nedenle, minimum plastik deformasyon bölgesi alt yüzeyden bir miktar yukarıdadır. Bu sonuçlar sonlu eleman yöntemiyle elde edilen modelleme çalışmalarına benzerlik göstermektedir. Şekil 4.21’de simulasyon ve ölçme ile elde edilen sertlik dağılımlarının bir karşılaştırması verilmiştir.

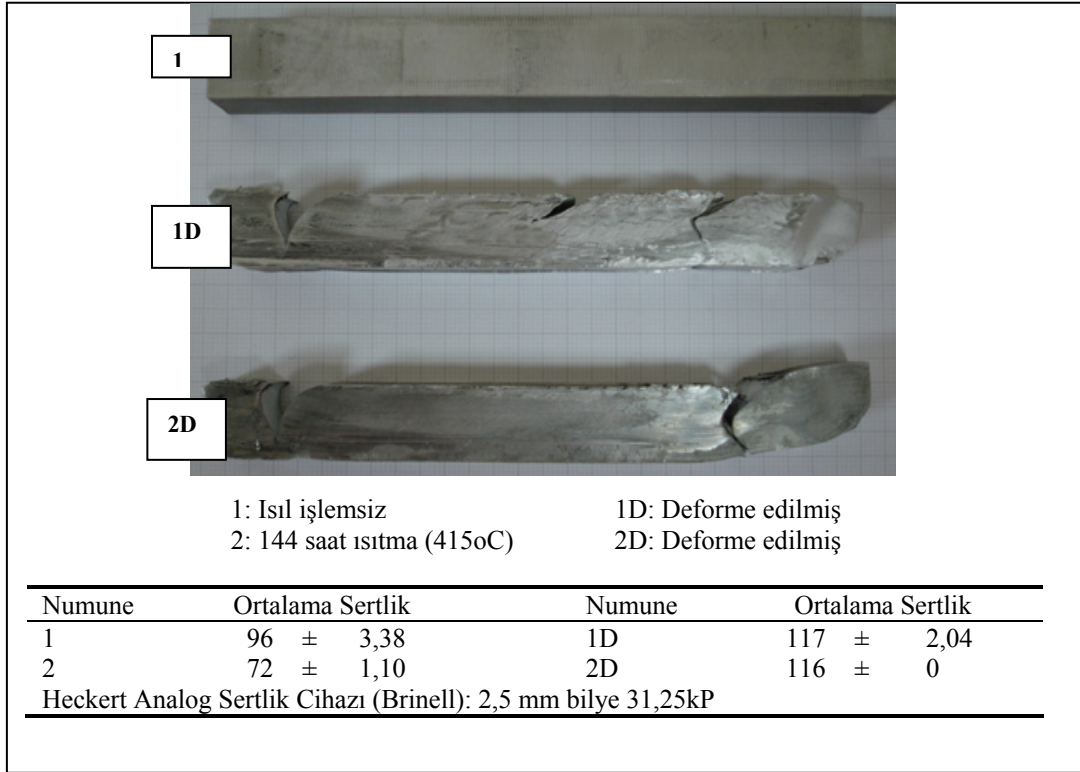


Şekil 4.21 ECAP sonrası kesit alanda mikro-sertlik dağılımı: ölçme ve simulasyon sonuçları

6066 Al-alaşımı numuneler 120 saat ısıtılarak daha sünek hale getirilseler dahi başlangıç ve bitiş uçlarındaki çatlak oluşumunun önüne geçilememiştir. Bu kapsamda farklı malzemelerin davranışını değerlendirmek üzere 5083 Al-alaşımı tek paso deforme edilmiştir. 415°C 'de 6 gün tavlansak yumuşatılan numunede orta bölgedeki çatlakın kaybolduğu ancak başlangıç kısmının üretim sırasında koptuğu gözlenmiştir. Isıl işlem sırasında Brinell sertliğinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.22’de verilen grafikte sunulmuştur. Numunenin sertliği, 72 saat tavlama sonunda 96 HB’den 72 HB’ye düşmüşse de ısıl işleminden geçmiş 6066 alaşımındaki 52 HB değerinin çok üzerindedir. Dolayısıyla deformasyon sırasında daha fazla çatlak oluşmuştur. 5083 alaşımından deformasyon öncesi ve sonrası alınan ortalama makro sertlik değerleri Şekil 4.23’te sunulmuştur.



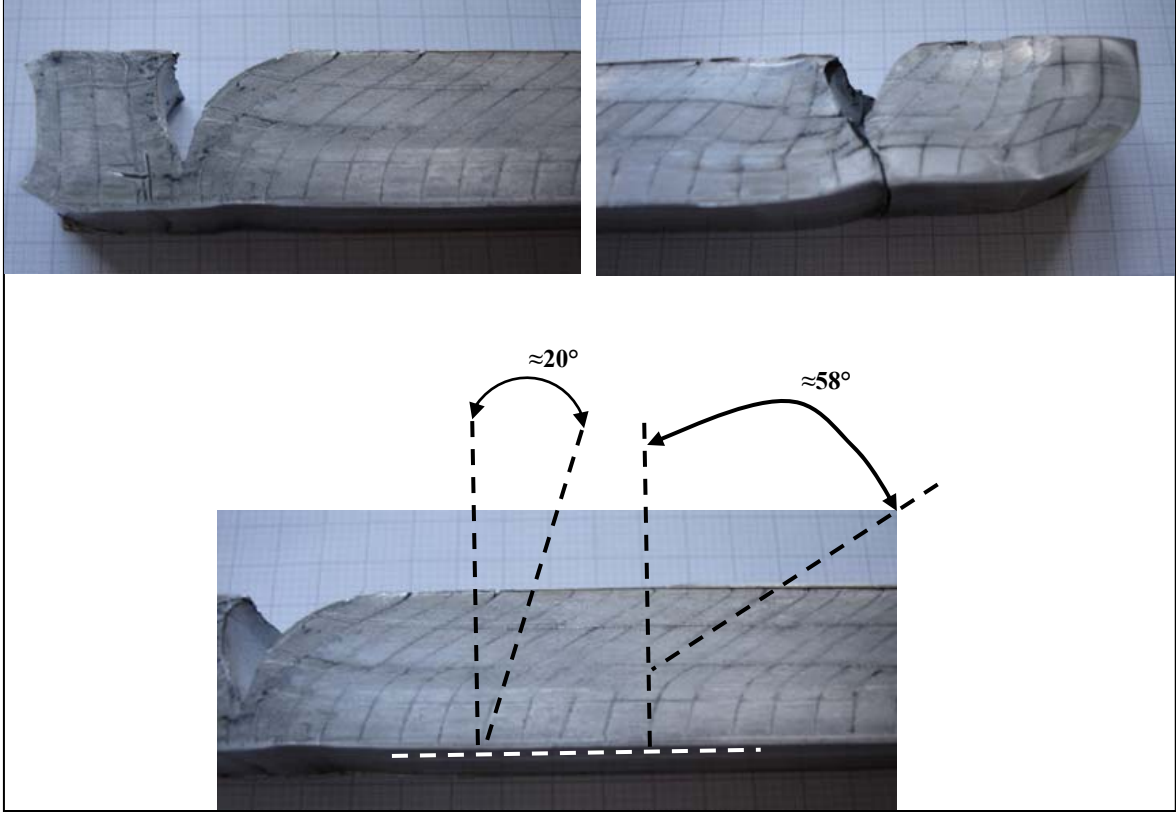
Şekil 4.22 5083 Al-alaşımı numunelerde 415°C 'de ısıtma süresine bağlı sertlik değişimi



Şekil 4.23 5083 Al-alaşımı numunelerin ECAP öncesi ve sonrası fotoğrafları ve ortalama sertlik değerleri

Malzemenin kalıpta uğradığı deformasyonu gözlemlemek amacıyla malzeme yüzeyinde maket bıçağı yardımıyla kare desenler oluşturulmuştur. Çizgilerdeki değişim, Şekil 3.8 'de sunulmuştur. Bütün yan yüzeyin desenlendirildiği çalışma ise, üç farklı bölgenin varlığını ortaya çıkarmaktadır. Başlangıç ve bitiş çatlakları arasındaki çatlaksız bölge, deformasyon karakteristiğini göstermektedir. Yatay çizgilerde pek bir değişiklik gözlenmemesine rağmen

dikey çizgiler yaklaşık  $58^\circ$  kayarak paralelkenar oluşturmuşlardır. Alt yüzeye yakın bölgedeki kayma ise  $20^\circ$ – $25^\circ$  arasındadır. Bitiş çatlğından sonraki kısımda kare formdan herhangi bir sapma yokken; başlangıç çatlğından önceki kısım karmaşık bir deformasyon durumunu işaret etmektedir (Şekil 4.24).

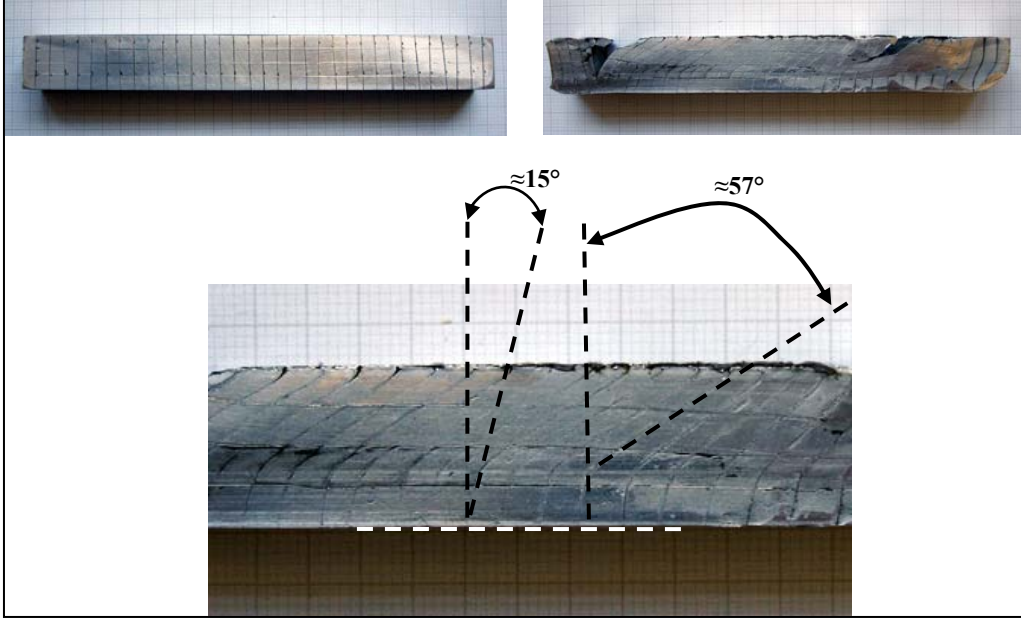


Şekil 4.24 5083 Al-alışımı numunede tek paso ECAP sonrasında yan kesitte desen değışimi

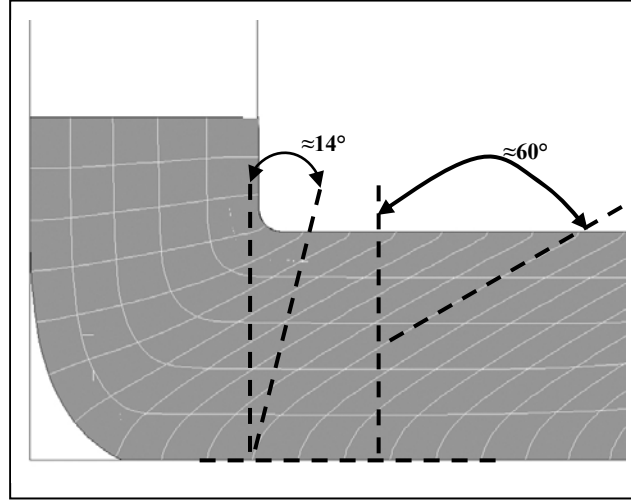
6066 Al-alışımı için yapılan desenleme çalışmaları da 5083 ile paralellik göstermektedir (Şekil 4.25).  $\Phi=90^\circ$  açılı kalıpla deformasyon sonucunda oluşan desen açısı  $57^\circ$ – $58^\circ$  bulunmuştur. Han vd. (2004b),  $\Phi=100^\circ$ ,  $110^\circ$ ,  $120^\circ$  ve  $130^\circ$  açılı sistemle deformasyonda kayma deseni açısı sırasıyla  $\theta=56,8^\circ$ ,  $50,5^\circ$ ,  $43,7^\circ$  ve  $36,9^\circ$  olarak tespit etmişlerdir.

Çatlakların varlığı desen morfolojisini etkilese de orta kısımdaki durum ve desen açısı literatürdeki benzer çalışmaları ve yapılan sonlu eleman analizi sonuçlarıyla (Şekil 4.26) uyum içerisindedir.





Şekil 4.25 6066 Al-alaşımı numunede tek paso ECAP sonrasında yan kesitte desen değişimi



Şekil 4.26 Sonlu eleman simülasyonunda elde edilen desen değişimi

#### 4.2.2. Sistematik Deneyler

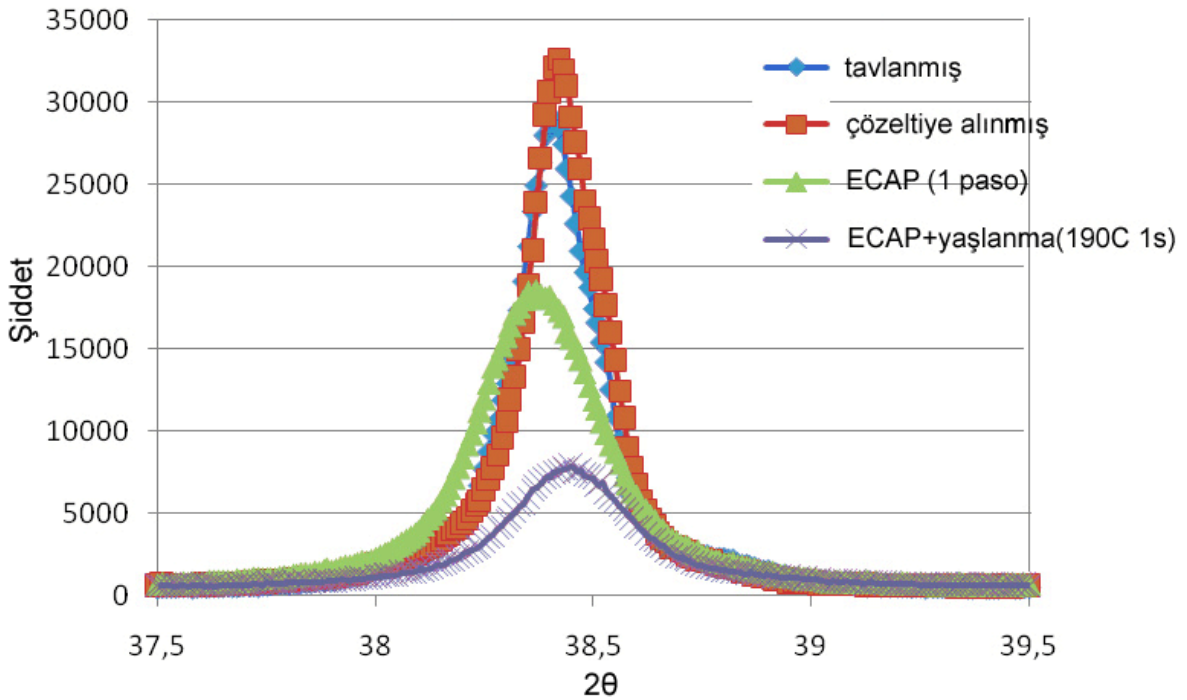
Modernizasyonu ayrıntılarıyla bir önceki bölümde sunulan yeni sistem, beraberinde bir çok avantajı getirmiştir. Kalıp yüzeyi elektropolisaj ve plazma nitrasyon yapılarak pürüzsüzleştirilmiş; kalıp sisteme sabitlenebildiğinden ECAP sırasında oynama sorunu önlenerek peş peşe üretim kolaylığı sağlanmıştır. Ayrıca, bakır malzeme ile geri tepme basıncı uygulanması yöntemi ve Şekil 3.14’de sunulan sıralamaya uyulduğu takdirde suverilmiş örneklerde bile ECAP sonrası numunenin başında ve sonunda artık çatlama olmamaktadır (Şekil 3.15). Bu bölümde Al-2024 alaşımına uygulanmış tek paso ECAP deformasyonunun iç yapı ve mekanik özelliklerine etkisi sunulacaktır. Deformasyon sonrası uygulanan yaşlandırma ve tavlama işlemlerinin etkisi tartışılmaktadır.

#### 4.2.2.1. X-Işını Kırınımı Ölçüm Sonuçları

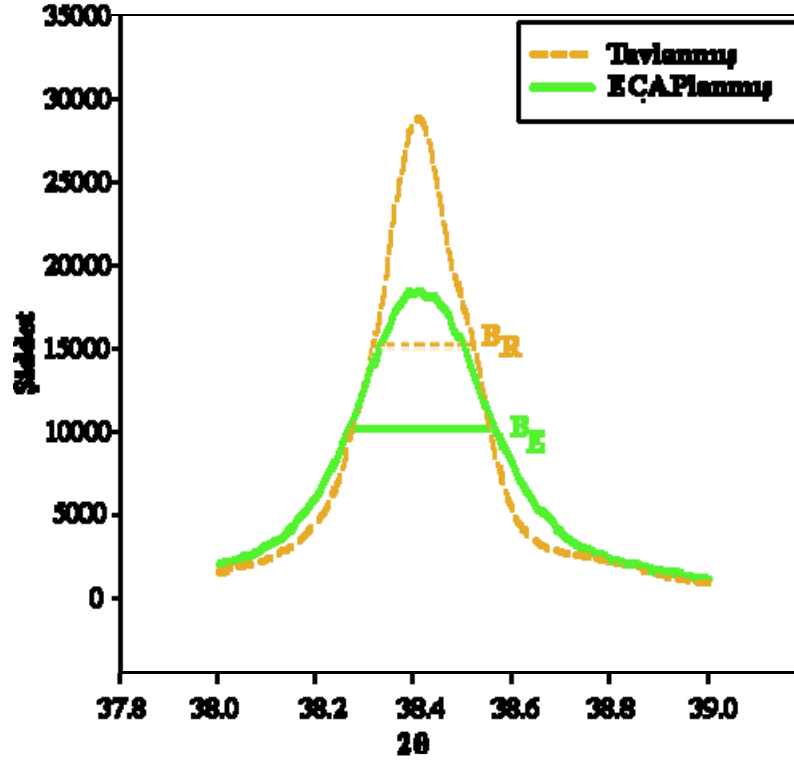
Al-2024 alaşımına uygulanan deformasyon ve yaşlandırma işlemleri malzemenin mikroyapısını değiştirmekte ve x-ışını kırınım profilini etkilemektedir. Ortalama  $2\theta=38,3^\circ$  değerinde gözükten alüminyum (111) düzlemine ait karakteristik kırınım tepesindeki değişimi göstermektedir (Şekil 4.27).

Kırınım tepesi, su verme, deformasyon ve yaşlandırma işlemlerine bağlı olarak genişlemekte, sağa-sola kaymaktadır. Çözeltiye alma sonrası artan yarı yükseklik genişliği; sistemde kalıntı gerilmelerinin oluştuğuna işaret etmektedir. Deformasyon sonrası tepe noktası aşağıya düşmüş ve daha da genişleyerek sola kaymıştır. Bu durum kalıntı geriliminin varlığı ve hücreli yapı (cell structure) oluşumuna işaretir. ECAP sonrası yaşlandırılan örnekte ise profil sağa kaymış ve x-ışını kırınım şiddeti azalmıştır.

ECAP sonrası oluşan hücre boyutunun x-ışını çizgi genişlemesi (line broadening) yöntemiyle tayini için ECAP uygulanmış ve referans olarak seçilen tavllanmış durumdaki kırınım profillerinden çizgi genişlemesi ( $B_E$  ve  $B_R$ ) tayin edilmiştir (Şekil 4.28). Bağıntı (3.8) kullanılarak ECAP sonrası elde edilen ortalama hücre boyutu yaklaşık 50nm olarak tayin edilmiştir.



Şekil 4.27 Uygulanan işlemlerin 2024 Al-alaşımı numunelerde (111) düzlemine ait x-ışını kırınım tepesine etkisi



Şekil 4.28 Tavlınmış ve ECAP uygulanmış örneklerin (111) düzlemi için x-ışını kırınım analizi

#### 4.2.2.2. Mikroyapı İncelemeleri

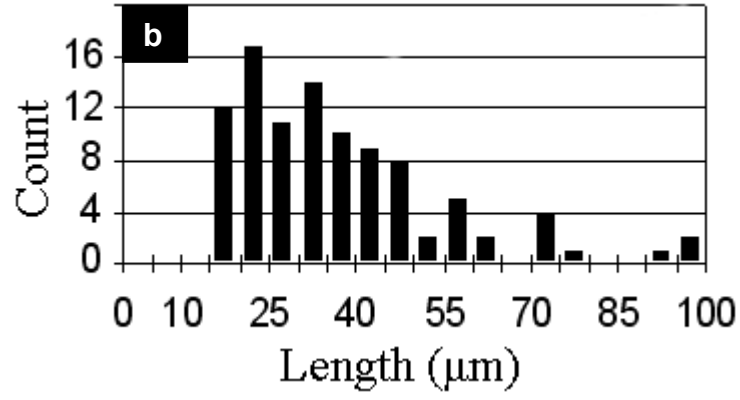
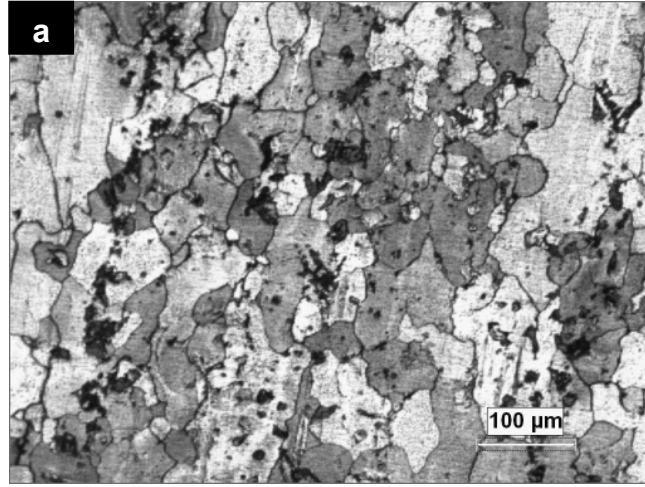
Al-2024 alaşımının başlangıç konumunun belirlenmesi için optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopundan faydalanılmıştır. Deformasyon (ECAP) ve sonrası ısıl işlemler sırasındaki mikroyapı değişimlerinin kontrolü ise geçirim elektron mikroskopuyla tayin edilmeye çalışılmıştır.

##### 4.2.2.2.1. Optik Mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskopu İncelemeleri

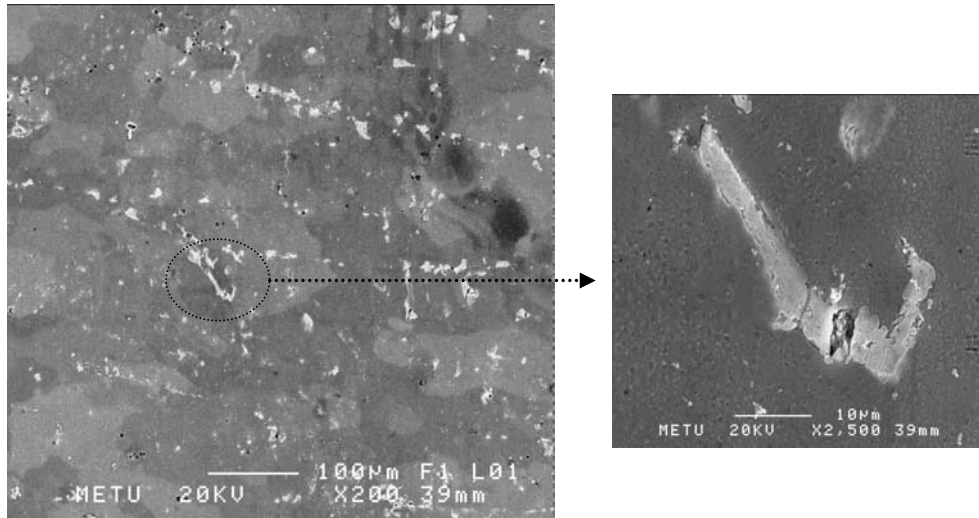
Çözeltiliye alınmış Al-2024 alaşımının optik mikroskop altındaki görünümü Şekil 4.29a'da gösterilmiştir. Görüntü analiz programıyla tane boyutu dağılımı (Şekil 4.29b) ölçülmüş ve ortalama tane boyutu 35µm olarak saptanmıştır. Optik mikroskop ve SEM çalışmaları (Şekil 4.30) matriste yayılmış durumda inklüzyonların varlığını göstermektedir. EDS yöntemiyle matris ve inklüzyonların kimyasal kompozisyonu tayin edilmiş ve Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1 Çözeltiliye alınmış Al-2024 alaşımında matris ve inklüzyonların EDS analizleri

Matris		İnküzyon	
Element	Ağırlıkça %	Element	Ağırlıkça %
Al	94,46	Al	56,86
Cu	5,29	Cu	27,91
Mg	0,25	Mg	-
Fe	-	Fe	8,54
Mn	-	Mn	5,15
Si	-	Si	1,54



Şekil 4.29 Çözeltiye alınmış Al-2024 alaşımının mikroyapısı (a) Optik mikrograf (100X), (b) Tane boyutu dağılımı



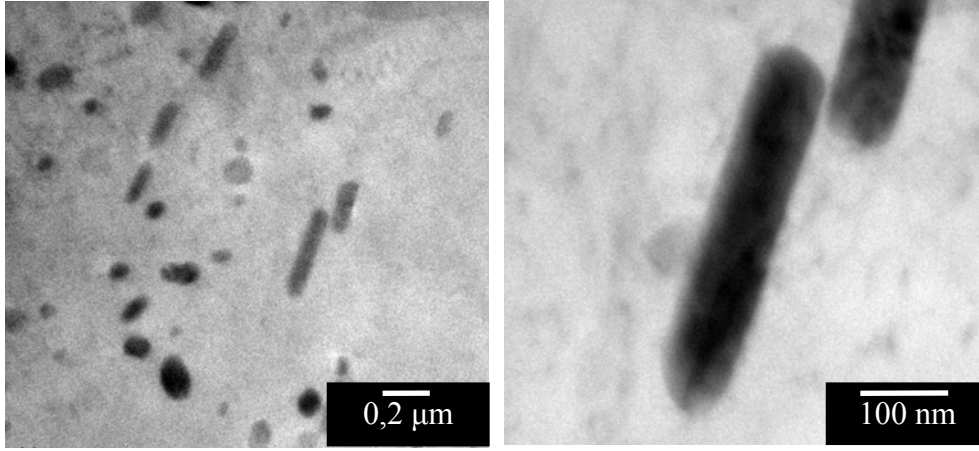
Şekil 4.30 Çözeltiye alınmış Al-2024 alaşımının SEM altındaki görünümü

#### 4.2.2.2.2. Geçirim Elektron Mikroskobu İncelemeleri

TEM çalışmaları başlangıç durumu, çözeltiye alınmış, ECAP uygulanmış, ECAP sonrası tavllanmış ve yaşlandırılmış olmak üzere 5 başlık altında toplanmıştır. Karanlık Alan (DF), Parlak Alan (BF), Seçilmiş Alan Elektron Kırınımı (SAED) ve EDS teknikleriyle inklüzyon ve çökelti tayini, dislokasyon durumu ve tane/hücre boyutu saptanmaya çalışılmıştır.

- Başlangıç Durumundaki Örnekler

Al-2024 alaşımının başlangıç durumu (Şekil 4.31), mikroyapıda çubuk şeklinde fazların varlığını göstermektedir. Bu faz, EDS analiziyle incelenerek Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Cheng vd. (2007) Al-2024 alaşımlarında yeniden-kristalleşme ve tane boyutu kontrolü için  $Al_{20}Cu_2Mn_3$  çubuksu T-fazının kullanıldığını belirtmektedir. EDS analiz sonuçları bunu doğrulamaktadır. Şekildeki siyah çizgilerin dislokasyonları gösterdiği saptanmıştır. Soğuk deformasyondan ötürü belirgin tane/hücre duvarları oluşmamıştır.



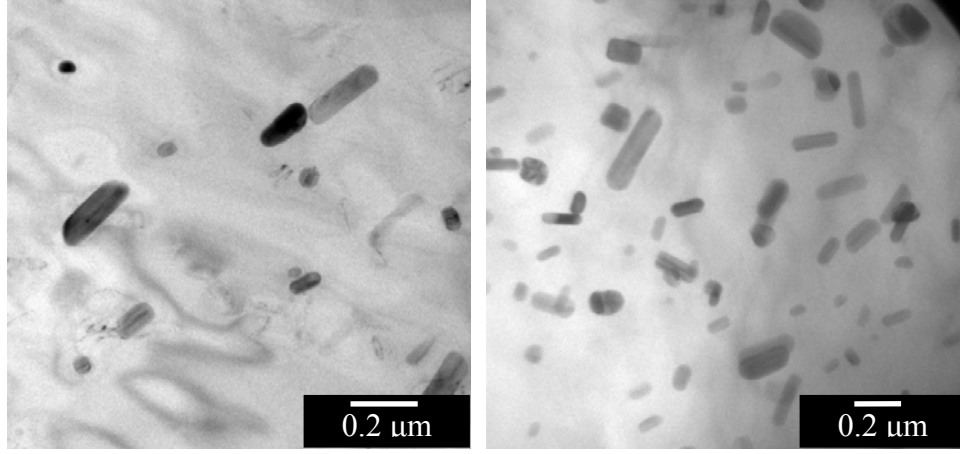
Şekil 4.31 Başlangıç konumundaki Al-2024 alaşımının TEM görüntüsü

Çizelge 4.2 Çubuksu fazların kimyasal analizi (EDS)

Element	Ağırlıkça %	Atomik %
<b>Al</b>	86,81	93,15
<b>Cu</b>	4,70	2,48
<b>Mg</b>	0,69	0,82
<b>Mn</b>	7,79	3,55

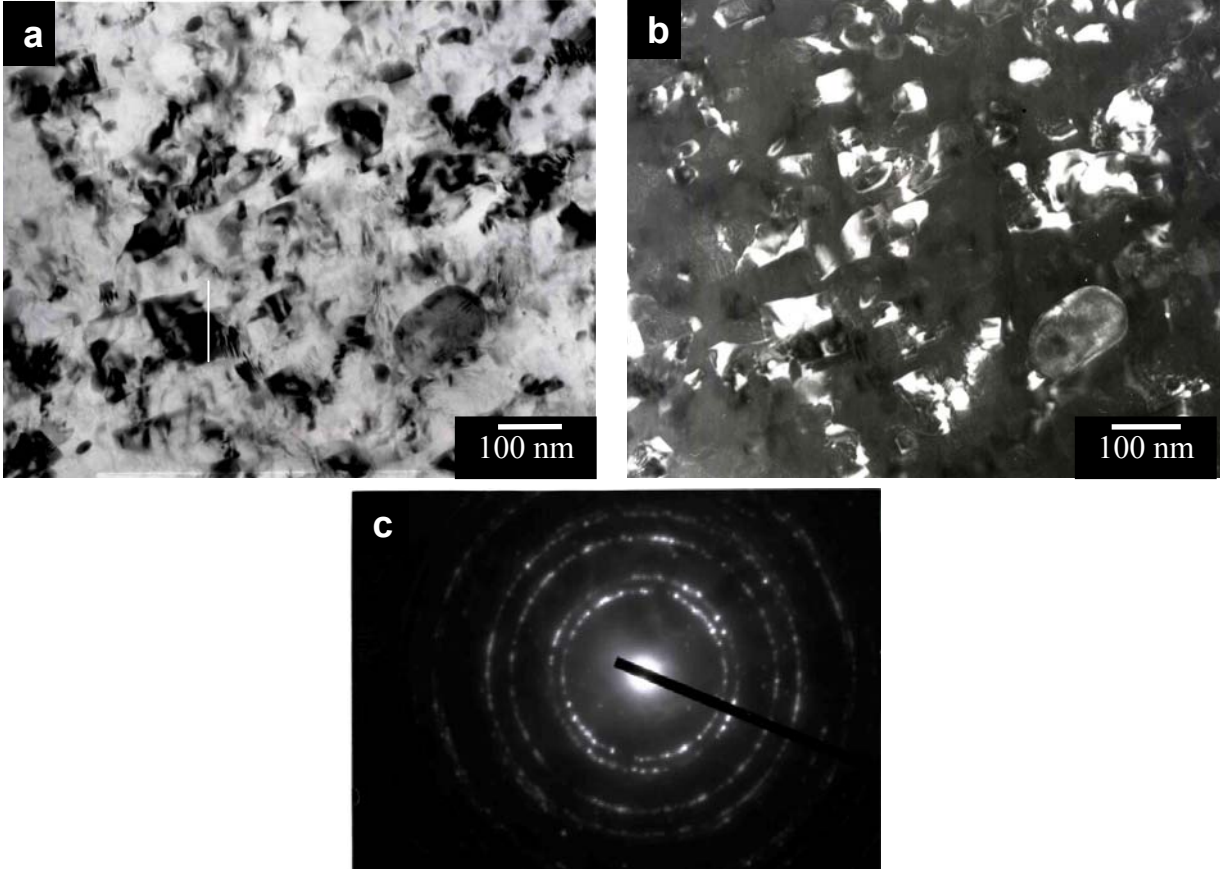
- Çözeltiye Alınmış Örnekler

Şekil 4.32 ECAP öncesi çözeltiye alınmış numunelerin TEM görüntüsünü göstermektedir. Çözeltiye alınma sonrasında bile T-fazının mevcudiyetini koruduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.32 Çözeltiye alınmış Al-2024 alaşımının TEM microyapısı

- ECAP Uygulanmış Örnekler



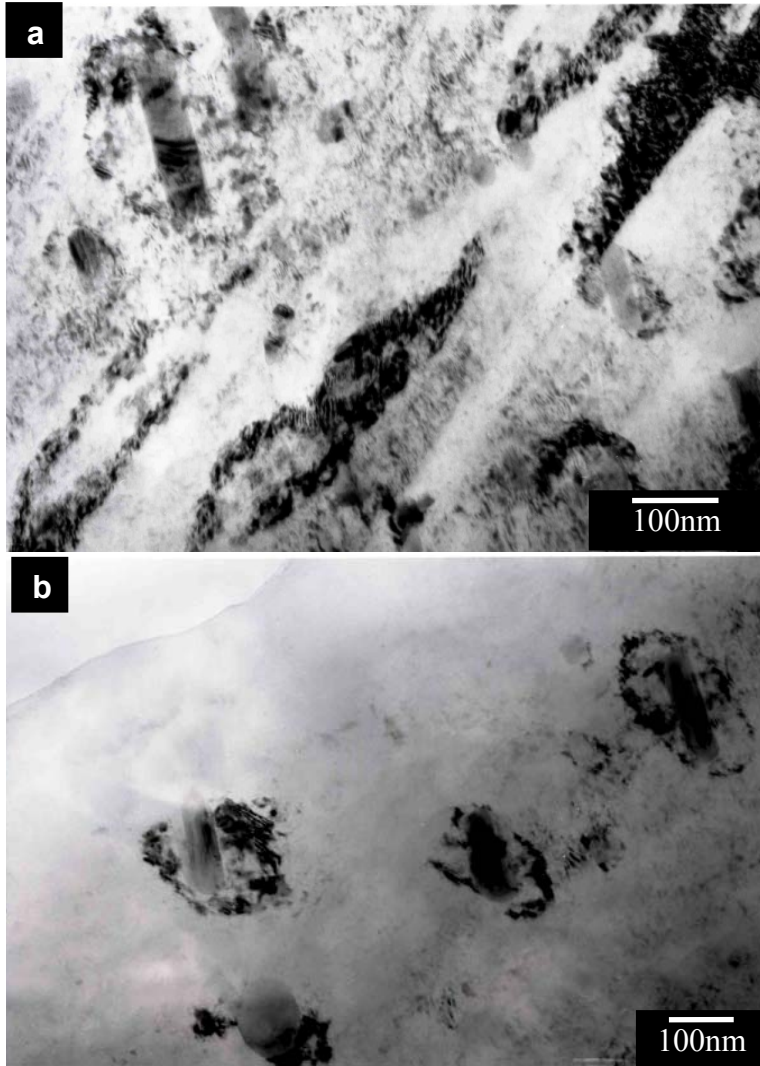
Şekil 4.33 ECAP uygulanmış Al-2024 alaşımının TEM görüntüleri  
(a) Parlak alan (BF), (b) Karanlık alan (DF), (c) Seçilmiş alan elektron kırınımı (SAED)

Alaşımın ECAP yöntemiyle deforme edildikten sonraki iç yapı durumu Şekil 4.33'de sunulmuştur. Karanlık alan (DF) yöntemiyle elde edilen fotoğrafta (Şekil 4.33b) beyaz tanemsi yapılar saptanmıştır. Bu yapıların boyutlarının X-ışınları yöntemiyle elde edilen hücre boyutu ile



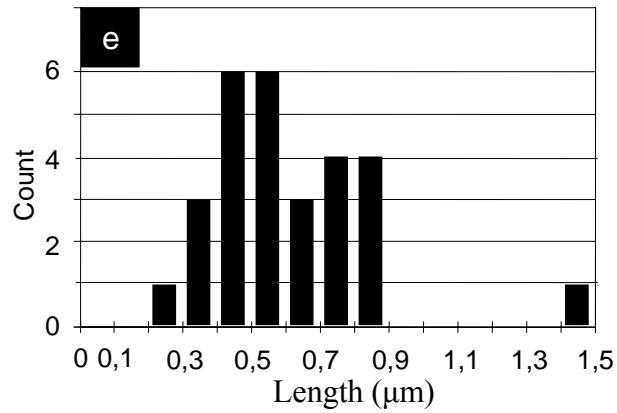
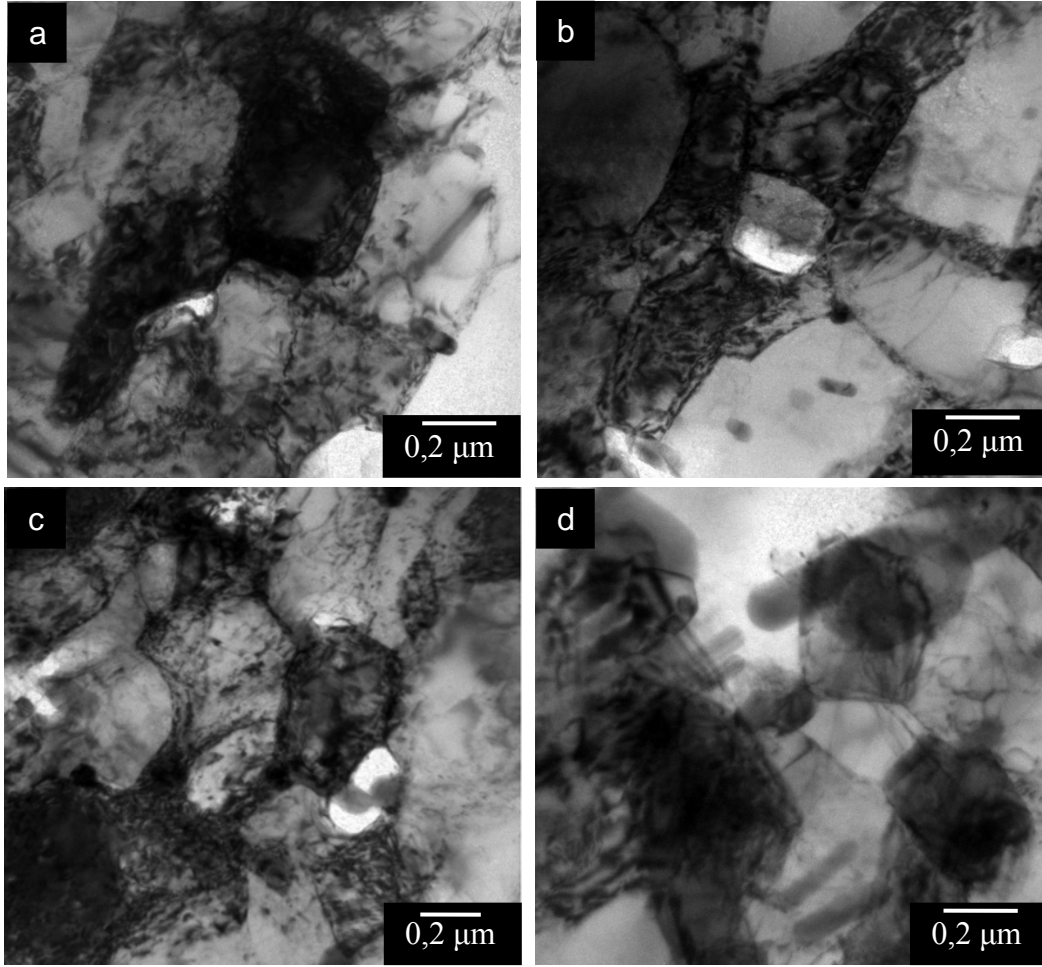
tutarlı olduğu görülmüştür. Şekillerde yüksek dislokasyon yoğunluğunun yarattığı gerilme alanlarından (strain field) dolayı tane sınırları net olarak seçilememektedir. Şekil 4.33c’de sunulan seçili alan elektron kırınımı halka paternine sahiptir. Halka paterni ECAP deformasyonu sonrası farklı oryantasyondaki tanelerin varlığına işaret etmektedir.

Şekil 4.34a’da gözükten siyah bölgeler dislokasyon bantlarını, beyaz bölgeler ise dislokasyonsuz taneleri göstermektedir. Şekillerde T-fazı etrafına dolanmış dislokasyonlar da dikkat çekmektedir. Şekil 4.34b’de sunulan T-fazı etrafındaki yüksek dislokasyon yoğunluğu heterojen deformasyona işaret etmektedir. Bu ve benzeri mikroyapıdaki T-fazının dislokasyon hareketine engel teşkil edeceği aşikardır. Zaten, ECAP gibi aşırı deformasyonlu yapılarda, kuvvetlendirme mekanizması olarak dislokasyon-dislokasyon kenetlenmesinin tane boyutu etkisine göre daha etkili olacağı düşünülmektedir.



Şekil 4.34 ECAP uygulanmış Al-2024 alaşımında dislokasyon yapısı

- ECAP Sonrası Tavlanmış Örnekler



**Şekil 4.35** ECAP sonrası tavlanmış Al-2024 alaşımı (a-d) TEM mikroyapıları, (e) Hücre boyutu dağılımı

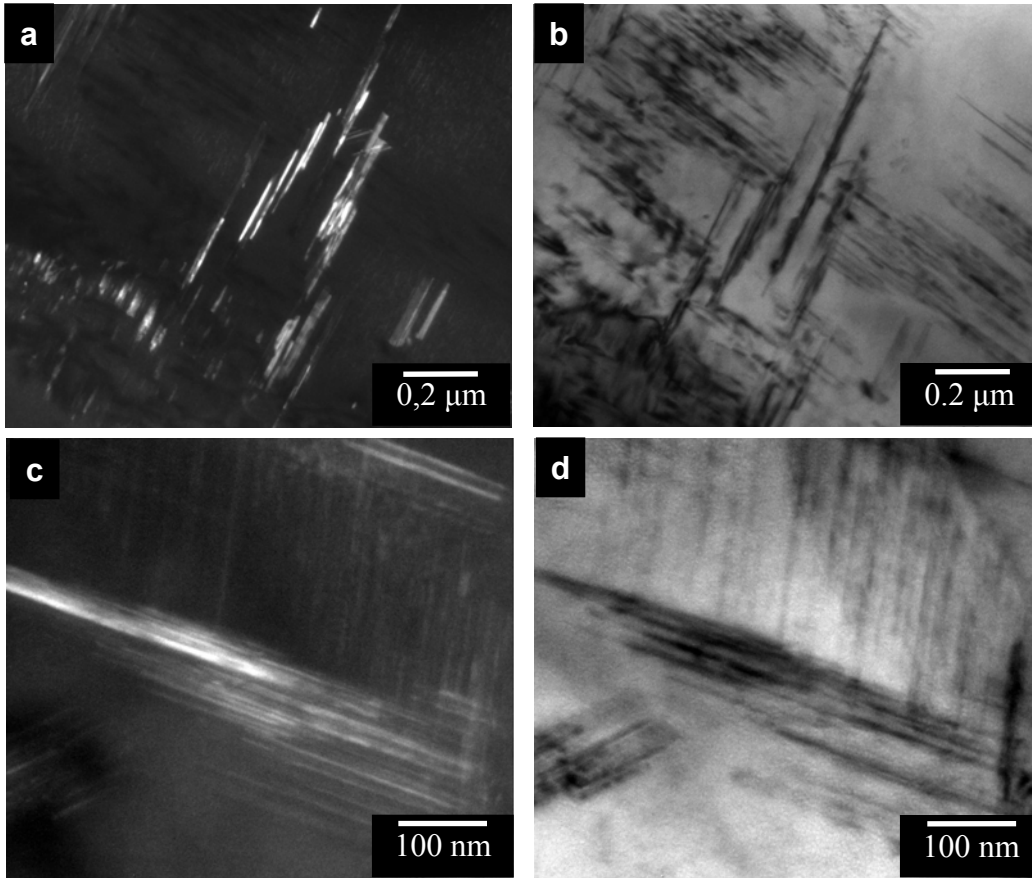
Yüksek dislokasyon yoğunluğunun yarattığı gerinim alanları üst üste binmesinden ötürü; elde edilen TEM görüntülerinin hiçbirinde tane sınırı seçilememektedir. Bunun önüne geçilmek için numuneler 400°C 'de 1 saat tavlanarak tane-altı/hücre yapı sınırlarının gözükmesine olanak



tanınmıştır. Şekil 4.35(a-d)'de tavlama sonrası oluşan yapılara örnekler sunulmuştur. Görüntü analizi yöntemiyle (Şekil 4.35e) ortalama hücre boyutu  $0,4\mu\text{m}$  mertebesinde tespit edilmiştir. Yukarıdaki bölümlerde bahsedildiği üzere; ECAP sonrası oluşan hücre boyutu, hem X-ışınları çizgi genişlemesi yöntemi hem de TEM görüntülerinden  $0,05\mu\text{m}$  olarak saptanmıştır. Dolayısıyla; tavlama süresince işleyen toparlanma ve yeniden-kristalleşme mekanizmaları; dislokasyon düzenlenmesi ve tane-altı yapının büyümesiyle sonuçlanmıştır. Görüntülerde tane-altı/hücre yapıları içlerinde dislokasyonlara rastlanmaktadır. Bu çalışma 1 saatlik sürenin yeniden-kristalleşme için yeterli olmadığını göstermektedir. Bu durum ECAP yönteminin ısıl kararlılık açısından bir diğer avantajı olarak gözükmektedir.

- Yaşlandırma İşlemi Uygulanmış Örnekler

Yaşlandırma işlemi hem deforme edilmemiş hem de ECAP uygulanmış numunelere uygulanmıştır. Şekil 4.36'da  $190^{\circ}\text{C}$  'de 12 saat yaşlandırılmış alaşımın karanlık alan (DF) ve parlak alan (BF) TEM görüntüleri verilmektedir. Görüntülerde belirli bir doğrultuda hizalanmış çökeltiler bulunmaktadır. Yapılan EDS analizleri çökeltilerin S' ve/veya S'' ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) olduğunu göstermektedir. EDS analizi sonuçları Çizelge 4.3'te sunulmuştur. Çizelgede Cu ve Mg atomik oranlarının birbirine yakın olduğu; fazla miktardaki Al ise matristen geldiği düşünülmektedir.

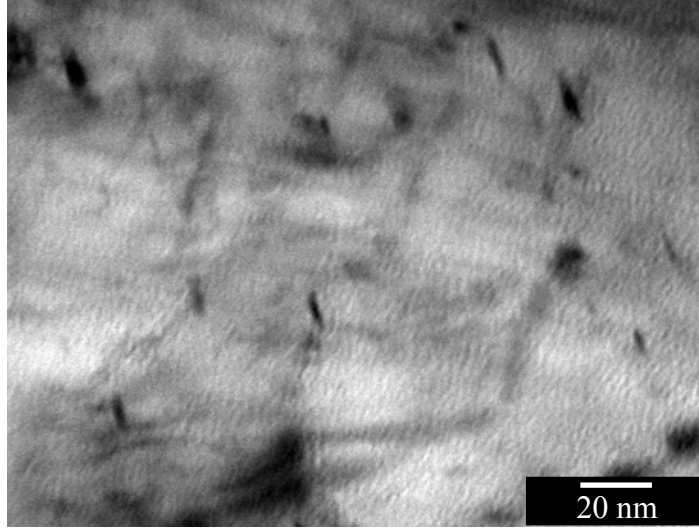


**Şekil 4.36** Çözeltiye alma sonrası deforme edilmeden yaşlandırılan Al-2024 (a), (c) Karanlık alan (DF) görüntüsü, (b), (d) Aydınlik alan (BF) görüntüsü

**Çizelge 4.3** Yaşlandırılmış Al-2024 alaşımı çökeltisinin kimyasal analizi (EDS)

Element	Ağırlıkça %	Atomik %
<b>Al</b>	86,47	91,55
<b>Cu</b>	10,27	4,62
<b>Mg</b>	3,26	3,83

ECAP sonrası 190°C 'de 2 saat yaşlandırmanın etkisi Şekil 4.37'de sunulmuştur. Yüksek dislokasyon yoğunluğu, net bir kontrast farkını engellese de ufak çökelti seçilebilmektedir.



**Şekil 4.37** Çözeltiye alma sonrası ECAP uygulanmış ve yaşlandırılan Al-2024 TEM mikroyapısı

#### 4.2.2.3. Malzeme Sertliğindeki Değişim

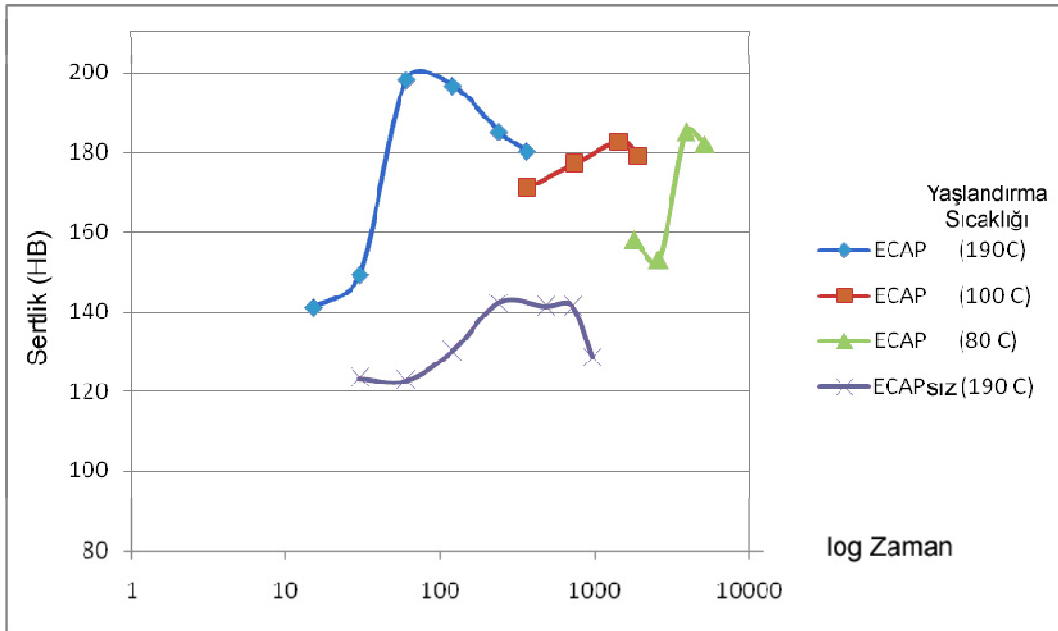
Al-2024 alaşımına uygulanan çeşitli işlemler sonucu malzemenin kazandığı Brinell sertlik sonuçları Çizelge 4.4'de sunulmuştur. Tek paso ECAP sonrası çözeltiye alınmış numunenin sertliğinde gözle görülür bir artış meydana gelmiştir. Sertlik 82HB'den 160HB'ye yükselmiştir. Alüminyum alaşımının yüksek yığılma hatası enerjisi (stacking fault energy) ve yüksek dislokasyon yoğunluğu sertlik artışına sebebi olarak düşünülebilir bu sayede dislokasyonlar çapraz-kayma (cross-slip) yaparak düğümlere yoğunlaşmış dislokasyonsuz ince tane-altı yapı oluşturabilmektedir. Böylelikle ECAP sonucunda elde edilen çok küçük taneli yapı, Hall-Patch denklemi ile ifade edilen sertlik artışına neden olmaktadır.

**Çizelge 4.4** Al-2024 alaşımının farklı koşullardaki sertlik değerleri

	<b>Sertlik (HB)</b>
Başlangıç Durumu	141 ± 6
Çözeltiye Alınmış (495°C / 1saat)	82 ± 1
Tavlanmış (420°C / 3saat)	64 ± 1
Çözeltiye Alınmış + ECAP	160 ± 11
Çözeltiye Alınmış + ECAP + Tavlanmış (400°C / 1saat)	72 ± 1
Çözeltiye Alınmış + Tavlanmış (400°C / 1saat)	69 ± 3
Çözeltiye Alınmış + ECAP + Yaşlandırılmış (190°C / 1saat)	189 ± 8
Çözeltiye Alınmış + Yaşlandırılmış (190°C / 24saat)	142 ± 6

ECAP sonrası tavlama işlemiyle sertlik 72HB'ye düşmektedir. Tavlama ile beraber yumuşama, alüminyum gibi yüksek yığılma hatası enerjisine sahip metallere beklenen bir olgudur. Sertliğin dislokasyon miktarına ve dağılımına bağlı olduğu düşünüldüğünde; tavlama sırasında aktive olan toparlanma mekanizmasının dislokasyonları yeniden dizilerek tane-altı/hücre yapıları oluşturmasını ve sertlik düşüşünü açıklamaktadır.

Tek paso ECAP sonrası uygulanan yaşlandırmanın malzemenin özellikleri üzerine etkileri incelenirken, ilk olarak deforme edilmemiş 2024 Al-alaşımının yaşlanma sertleşmesi takip edilmiş, 190°C'de yaşlandırılan örneklerde maksimum sertliğe (141 HB) 24 saat yaşlanma sonucunda ulaşılmıştır. Daha sonra çözeltiye alınmış numuneler ECAP sisteminde tek paso deforme edilerek yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. 80°C, 100°C, 190°C'de yapılan yaşlandırmaların malzemenin sertliğine etkisi Şekil 4.38'de sunulmuştur.



Şekil 4.38 2024 Al-alaşımı numunelerinde ECAP sonrası yaşlandırma süresine bağlı sertlik değişimi

ECAP sonrası yaşlandırılan numunelerde, doğrudan yaşlandırılmış numunedeki daha yüksek sertliğe ulaşılmıştır. Yaşlandırmada sıcaklığının azaltılması azami sertlik değerinde azalmaya sebep olsa dahi sertliklerin ECAP uygulanmadığı duruma göre daha yüksekte olduğu gözlemlenmiştir. 190°C'de yaşlandırılmış iki set karşılaştırıldığında, ECAP uygulanan numune hem daha yüksek sertliğe ulaşmakta hem de maksimum sertliğe daha kısa zamanda erişmektedir. Standard yöntemle yaşlandırılan 2024 Al-alaşımı 190°C'de 24 saat sonunda yaklaşık 141 HB sertliğe ulaşırken; çözeltiye alma ve yaşlandırma arası ECAP yöntemiyle tek paso deforme edilen numunedeki aynı sertlik mertebesine 1 saat sonunda ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, ECAP yönteminin yaşlanma kinetiğini hızlandırdığını göstermektedir. ECAP sırasında artan dislokasyon miktarının, çökelti oluşumu sırasında çekirdeklenme mevkisi olarak davranıp heterojen çekirdeklenmeye neden olduğu düşünülmektedir. Bu sayede çökelti oluşma hızı artmakta ve doruk sertliğe ulaşma süresi kısalmaktadır. Elde edilen bu bulgular "aşırı plastik deformasyon" yönteminin bir avantajı olarak yorumlanmaktadır.

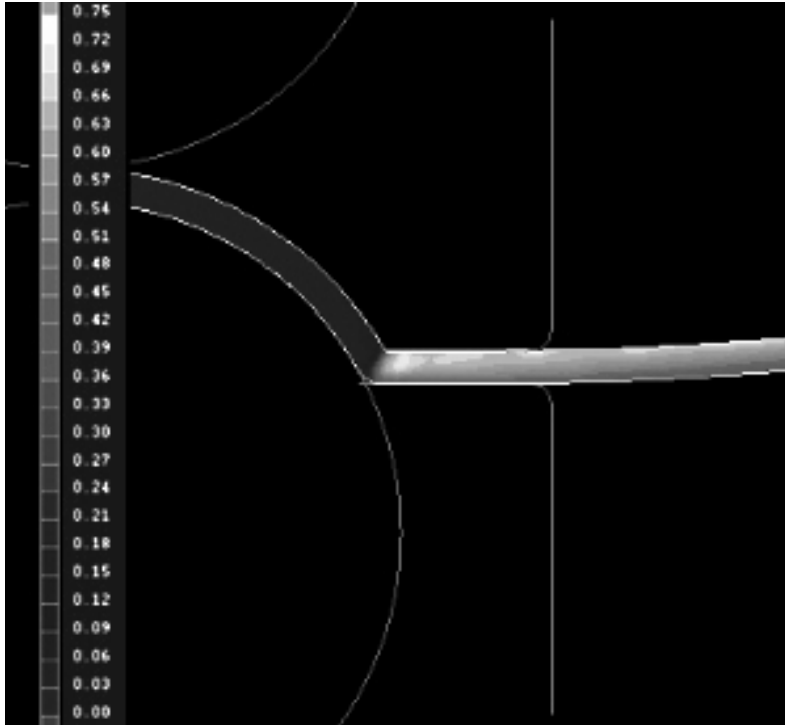
### 4.3. Kesintisiz Tezgah (DCAP) Bulguları

Raporun bu kısmı, kesintisiz tezgah (DCAP) sisteminin modelleme çalışmaları ve Al-alışımalarının mekanik özelliklerine etkisinin araştırma bulgularını içermektedir.

#### 4.3.1. Modelleme

Sonlu eleman analizi (FEM) yöntemiyle yapılan araştırmalarda kesintisiz plaka deformasyonu için en uygun yöntem olarak DCAP saptanmış ve giriş-çıkış kanalları arasında olması gereken deformasyon miktarının önemi vurgulanmıştı. Ardarda yinelenen simulasyonlar aracılığı ile merdaneler tarafından verilen deformasyonun %8'den az olduğu durumlarda malzemenin çıkış kanalının doldurulduğu ve işlemin problemsiz gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir.

DCAP sisteminin en önemli özelliği kayma deformasyonu sayesinde tek pasoda dahi malzemeye çok yüksek gerinimler verilebilmesidir. Şekil 4.39, FEM analizi ile DCAP işlemi sırasında malzemeye uygulanan gerinimleri göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi DCAP sırasında malzemeye uygulanan gerinim tek paso da 0,3 ile 0,6 arasında değişmektedir. Bu gerinim değerlerine ancak aşırı haddeleme ile ulaşılabilir. DCAP yönteminde boyut değişmediği için, deformasyon sırasında oluşan enerjinin tamamı dislokasyon oluşumu için harcandığı ve bunun da malzemeye daha iyi mekanik özellikler kazandırdığı düşünülmektedir.



Şekil 4.39 DCAP prosesinde malzeme yüzeyindeki gerinim değişiminin FEM analizi

### 4.3.2. DCAP İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisi

Kesintisiz tezgahın amacı ECAP sisteminde yapılamayan çok pasolu levha deformasyonunun gerçekleştirilebilmesidir. Mekanik test yapılabilirliği de göz önüne alarak farklı merdane yüzeyleri denenmiş ve DCAP işleminin sertlik-akma dayanıcı üzerine etkileri tartışılmıştır.

#### 4.3.2.1. Kanallı Merdane

DCAP sisteminin çalışırılığını test etmek için saf alüminyum ve 2xxx Al-alaşımı deforme edilerek malzeme sertliğindeki değişim gözlenmiştir. Deformasyon sonrası elde edilen sertlikler Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

Çizelge 4.5 DCAP tezgahından geçirilmiş numunelerde sertlik değişimi

Numune	Deformasyon Öncesi Ortalama Sertlik (HB)			Deformasyon Sonrası Ortalama Sertlik (HB)		
Saf alüminyum	25	±	0	30	±	0,28
2xxx serisi Al alaşımı	58	±	2,25	66	±	0,57

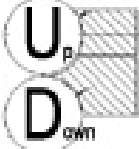
Çalışmaların devamında, farklı başlangıç konumlarındaki Al-6061 levhalar kullanılmıştır. 170mmx27,5mmx2mm boyutlarındaki numunelerde 4 farklı durum (6061-T6 haddeme, 6061-T6 DCAP, Çözeltiliye alınmış 6061 DCAP, Tavlanmış 6061 DCAP) için sertlik incelemesi yapılmıştır (Çizelge 4.6). ECAP uygulanan numunelerdeki alt ve üst yüzeyler arasındaki sertlik farkı, DCAP uygulamasında da göz önünde bulundurulmuştur.

Referans olarak 6061-T6 alüminyum numunenin sertlik değeri ölçülmüştür (109 HB). İlk olarak, alüminyum şerit numune öndeki kalıp seti çıkarılarak 1,95 mm hadde aralığındaki sistemden geçirilmiştir. Bunun amacı, DCAP ile haddeme arasındaki farkı gözlemlemektir. Daha sonra 6061-T6 numunesinin DCAP pasosundan geçtikten sonraki sertlik değeri ölçülmüştür. 2 paso geçen numunede her pasoda sertliğin arttığı görülmektedir. Sistem, numunenin ancak 2 paso geçmesine olanak sağlamıştır; sonraki pasoda aşırı sertlik ve gerinmeden kaynaklanan kırılmalar gözlenmiştir.

Diğer inceleme, çözeltiliye alınmış ve su verilmiş numunelerde yapılmıştır. Çözeltiliye alma işlemi 530°C'de yapılmış ve oda sıcaklığına hızla soğutulmuştur. Numunenin sertliğinde beklendiği gibi azalma görülmekte ve bu durum numunenin daha fazla pasodan geçmesine izin vermektedir. 4 paso geçirilen numunede sertlik artışı yine beklenildiği şekilde gözlenmektedir. 5 paso geçen numunede ise beklenenin üzerinde sertlik artışı vardır. Bunun nedeni numunenin 5. pasodan önce 8 gün oda sıcaklığında beklemesi ve buna bağlı olarak yaşlanmaya maruz kalmış olması olarak tahmin edilmektedir. Numunelerin derin dondurucuda saklanarak doğal yaşlanmanın önüne geçilebileceği tespit edilmiştir.

Son inceleme 450°C'de 16 saat tavlanmış ve fırında soğutulmuş numunelerde yapılmıştır. Tavlama ve fırında soğutma işlemiyle numunenin sertliğinde daha fazla azalma olmuştur. Bu numunelere normal koşullarda 4 paso DCAP, zımpara destekli ise en fazla 6 paso uygulanabilmiştir. Kuvvetli patinaj nedeniyle daha fazla paso geçirilememesi, merdane yüzeyinde revizyon ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Sertlik artışının ilk pasoda olup diğer pasolarda olmaması, "alt kalıp-üst kalıp" ölçülerinin ayarsız olmasına dayandırılmıştır. Dokulu merdane yüzeyi ve kalıbın çerçeve ile sabitlenmesiyle istenilen sertlik değerlerine ulaşılabileceği anlaşılmıştır.

**Çizelge 4.6** DCAP deformasyonu sonucu Al-6061 levhanın sertliğindeki gelişim

#	Malzeme Durumu	U/D	HB		Standart Sapma
-	Alındığı gibi (T6) (AG)	-	109	±	0,00
1	AG + Haddeleme	-	110	±	0,00
2	AG + DCAP-1	-	116	±	0,00
	AG + DCAP-2	-	119	±	0,00
3	Çözeltiyeye Alınmış (ÇÖ)	-	42	±	1,16
	ÇÖ + DCAP-1	U	59	±	0,98
	ÇÖ + DCAP-1	D	62	±	0,75
	ÇÖ + DCAP-2	U	69	±	0,00
	ÇÖ + DCAP-3	U	71	±	0,00
	ÇÖ + DCAP-3	D	70	±	0,58
	ÇÖ + DCAP-4	U	74	±	0,50
	ÇÖ + DCAP-4	D	72	±	0,29
	ÇÖ + DCAP-5	U	88	±	1,00
4	Tavlanmış (16saat) (T)	-	39	±	0,00
	T + DCAP-1	U	45	±	0,00
	T + DCAP-1	D	42	±	0,50
	T + DCAP-2	U	45	±	1,63
	T + DCAP-2	D	44	±	0,58
	T + DCAP-3	U	45	±	0,50
	T + DCAP-3	D	45	±	0,00
	T + DCAP-4	-	Patinaj		
	T + DCAP-5	-	Patinaj Yüzey elverişsiz		
	T + DCAP-6	-	Patinaj Yüzey elverişsiz		
					

Metal şekillendirmede mekanik özelliklerdeki değişimleri etkin gerinime bağlı olarak analiz etmek daha doğrudur. Segal vd.nin de (1995) bahsettiği gibi DCAP sonucunda elde edilecek etkin gerinim, paso sayısı (N), kalınlık oranı (K) ve oblik açısı ( $\Phi$ ) ile ilişkilendirilebilir.

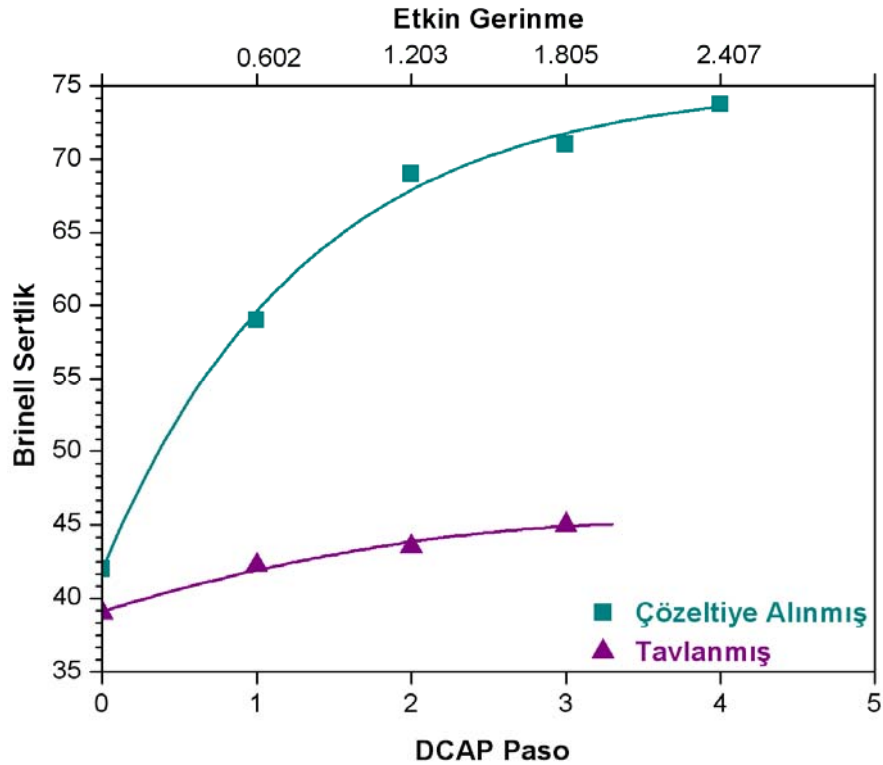
Çizelge 4.7,  $120^\circ$ 'de her paso için  $K = 0.950$  değerine sahip malzemenin gerinim değerlerini göstermektedir.

$$\varepsilon = \frac{2N}{\sqrt{3}} K^2 \cot\left(\frac{\Phi}{2}\right) \quad (4.1)$$

**Çizelge 4.7** Her paso için uygulanan gerinim değerleri

N	1	2	3	4
$\varepsilon$	0.602	1.203	1.805	2.407

Kanallı merdane sisteminde deforme edilen farklı başlangıç koşullarındaki Al-6061T6 alaşımı pekleşme davranışı Şekil 4.40 'ta sunulmuştur. Çözeltiye alınmış ve hızlı soğutulmuş numunelerin sertlikleri 4 paso sonucunda 42 HB'den 74 HB'ye çıkmıştır. Sadece ikinci pasodan sonra %60'lık bir iyileşme gözlenmektedir. Tavlanmış numunelerde de benzer davranış gözlenmekle birlikte, sertlik artışı çözeltiye alınıp hızlı soğutulanlara göre çok belirgin değildir.

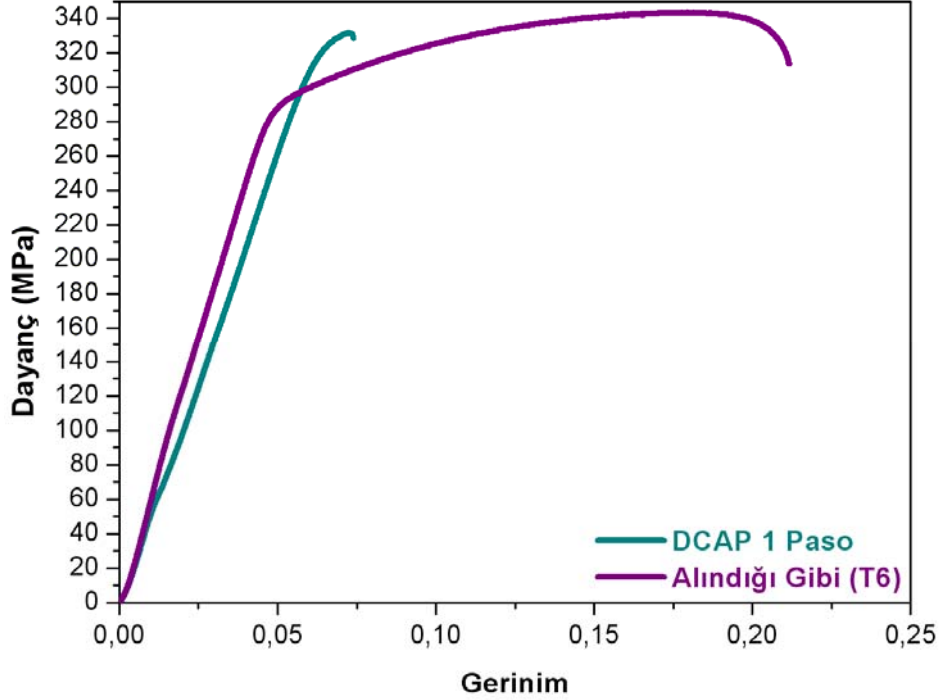


**Şekil 4.40** DCAP paso sayısına göre Al-6061 levha sertliğindeki değişim

#### 4.3.2.2. Dokulu Merdane

Ayrıntıları tasarım kısmında verilen dokulu merdane sayesinde, kanallı merdanede karşılaşılan sürtünme, numunenin kalıp içerisine sürülmesi, patinaj gibi sorunlar ortadan kalkmıştır. Yeni merdane yüzeyi numunenin istenilen paso sayısında geçirilmesini sağlamıştır. Bu durum projenin amacı doğrultusunda daha fazla aşırı plastik deformasyona uğramış numune elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak dokulu merdane yüzeyi ile üretilmiş numuneler üzerinde sertlik alınabilecek alanlar azaldığından sağlıklı sertlik ölçümleri yapılamamıştır. Şekil 4.41'de deforme

edilmemiş ve 2 paso deforme edilmiş 6061-T6 numunenin çekme deneyi sonuçları sunulmuştur. Akma dayanıcı iki paso deformasyonla 275 MPa'dan 305 MPa'a yükselmiştir. Bu durum Hall-Petch denkleminde göre tane boyutu incelmesine işaret etmektedir. Ancak malzemenin kırılma davranışı dokunun çentik etkisi yaptığı izlenimini vermektedir.



Şekil 4.41 Al-6061-T6 numune için DCAP öncesi ve sonrası çekme deneyi sonuçları

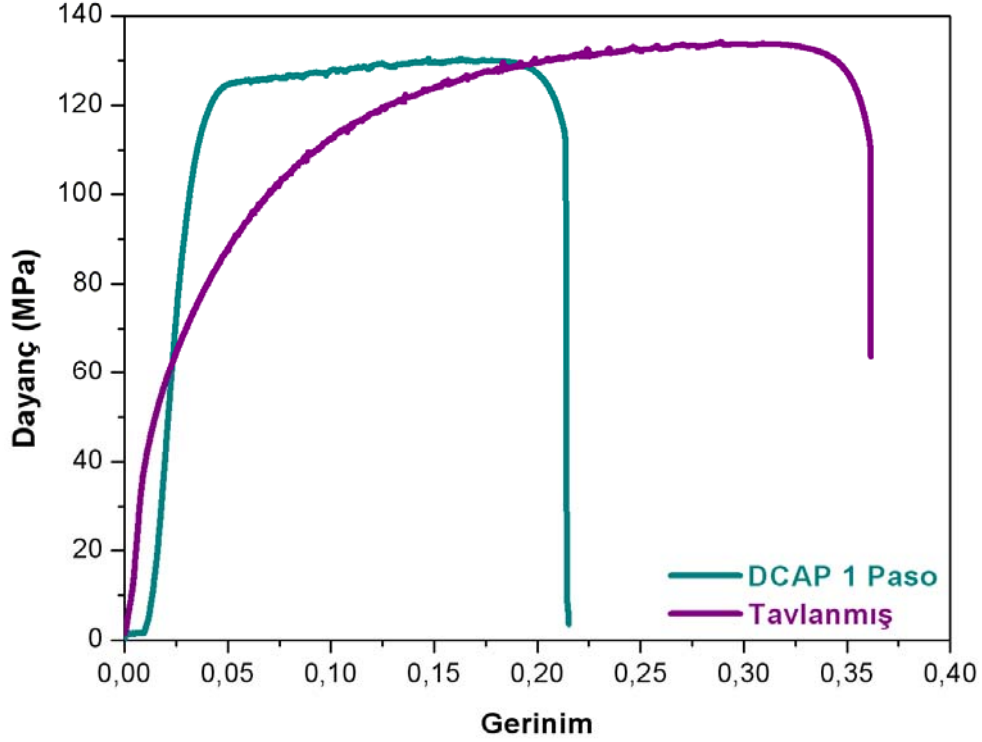
#### 4.3.2.3. Kısmi Dokulu Merdane

Dokulu merdanenin getirmiş çok paso deformasyon imkanı ve düz merdanenin getireceği test yapılabilirlik birleştirilerek tasarlanan merdane sistemi sayesinde tavllanmış konumdaki Al-6061 levhalar 2 pasoya kadar deforme edilmiştir. Deformasyon sonucunda elde edilen sertlik gelişimi ve çekme testi davranışı sırasıyla Çizelge 4.8 ve Şekil 4.42'de sunulmuştur.

Çizelge 4.8 Kısmi dokulu merdaneli DCAP deformatsyonu sonucu Al-6061 levhanın sertliğindeki gelişim

Malzeme Durumu	U/D	HV		Standart Sapma
Tavllanmış (415°C-2saat) (T)	-	37	±	0,58
T + DCAP-1	U/D	53	±	1,51
T + DCAP-2	U	55	±	0,58
T + DCAP-2	D	58	±	1,05





**Şekil 4.42** Tavlanmış konumdaki Al-6061 numune için DCAP öncesi ve sonrası çekme deneyi sonuçları

Mekanik özelliklerdeki gelişim irdelendiğinde, ilk paso deformasyonda sertliğin %40 mertebesinde arttığı; ikinci pasoda ise artışın sürdüğü tespit edilmiştir. Tavlanmış durumda 50MPa akma dayanıcına sahip alaşım bir paso deformasyon sonunda yaklaşık 100 MPa akma dayanıcına ulaşmaktadır. Mukavemette %100'e varan bu artışa rağmen süneklikte ciddi bir düşme saptanmamıştır. Bu durum dokulu merdanede öngörülen çentik etkisini doğrulamakta ve DCAP deformasyonunun bu tasarımda başarı ile uygulandığını göstermektedir.

## 5. SONUÇLAR

### 5.1. Modelleme

#### Kalıp Geometrisi ve Sürtünmenin Etkileri

1. Dış kalıp açısını arttırmak, bir pasoda malzemeye verilen azami plastik gerinme miktarını azaltmaktadır. İç kalıp açısının, sadece dik açılı kalıplar için dikkate değer bir etkisi vardır.
2. Bütün kalıplar için, sürtünmesiz durumda, kalıp açısından bağımsız olarak alt kısımlar daha düşük plastik gerinmelere maruz kalmaktadır. Bu durum köşe boşluğu oluşumu yüzündendir.
3. Sürtünme katsayısının artması, köşe boşluğu oluşumunu azaltmakta veya yok etmektedir.
4. Sürtünmeli durumlarda, az miktarlarda sürtünme gerinme homojenliğini arttırırken, belirli bir miktarı aşan sürtünme çok olumsuz etki yaratmaktadır. Bunun nedeni, yüzeydeki aşırı sürtünme nedeniyle gerçekleşen kayma plastik deformasyonudur.

#### Üç Boyutlu Analizler

5. Parçanın x-z ve y-z düzlemlerindeki eşdeğer plastik gerinme miktarı oldukça homojendir.
6. Parçanın derinlik yönünün ortasından alınan bir kesitteki plastik gerinme miktarları 2 boyutlu modellerde oldukça yakın sonuçlar vermektedir.
7. Üç boyutlu simülasyon süresi, iki boyutlu gerçekleştirilenlerden 16-20 kat daha uzundur. Sonuç benzerliğinden dolayı simülasyon çalışmalarının düzlem gerinme varsayımı ile yapılabilir.

#### Malzeme Özellikleri ve Köşe Boşluğu Oluşumu Etkileri

8. ECAP işlemi sırasında deformasyon düzlem üzerinde basit kayma ile gerçekleşmektedir. Fakat malzemenin gerçek davranışının malzemenin gerinme pekleşmesi özellikleri nedeniyle köşe boşluğu oluşmaktadır. Deformasyon bölgesi, yaklaşık elips şeklinde bir bölgedir.
9. Kalıbın alt tarafına temas ederek akan kısmın üst tarafına temas eden kısımdan daha hızlı aktığı ve bunun sonucunda köşe boşluğu oluştuğu görülmektedir.
10. Gerinme pekleşmesi köşe boşluğu oluşturmada heterojen gerinme dağılımına sebep olmaktadır ( $\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n$ ). Malzeme gerinme pekleşmesi çarpanı (K) ve pekleşme üssünün (n) köşe boşluğuna etkisi 2. derece yüzey olarak belirlenmiştir. Buna göre, köşe boşluğu açısının K ile değişimi doğrusal, n ile değişimi parabolik kabul edilebilir.

## Malzeme Sertleşme Mekanizmaları ve Hasar Oluşumu Etkileri

11. İzotropik ve kombine sertleşen malzemeleri 2 kanallı ECAP kalıbından geçirebilmek için 500MPa civarı bir basınç uygulanması gerekirken, kinematik sertleşme durumunda 400MPa yeterli olmaktadır.
12. Sertleşme mekanizması, deformasyon bölgesini ve gerinme dağılımını etkilemekle birlikte baskın değildir.
13. Cockcroft-Latham hasar indeksinin dağılımına göre, sertleşme mekanizmasının hasar birikime etkisi zayıftır, kinematik ve kombine sertleşen malzemelerde burun bölgesinde fazladan küçük bir hasar bölgesinin oluşması dışında belirgin bir fark yoktur.
14. Kinematik ve kombine sertleşen malzemelerde hasar birikimi belli noktalarda daha yoğundur. Kinematik sertleşen malzemelerin ECAP işlemi sırasında hasar birikimi oluşturmaya daha eğilimli olduğu söylenebilir.

## **5.2. Laboratuvar Ölçekli Tezgah (ECAP)**

### Ön Çalışma

1. 6066 ve 5083 Al-alaşımları tek paso ECAP ile deforme edilmiş; sertlik miktarındaki değişim gözlenmiştir. Yan yüzeyden alınan ortalama sertlik değerleri, fırında yumuşatılmış 6066 alaşımında 52 HB'den 85 HB'ye, yumuşatılmış 5083 alaşımında ise 72 HB'den 116 HB'ye yükselmiştir.
2. Kesit alandan alınan mikro-sertlik değerleri, yatay ekseninde sertliğin değişmediğini, dikey ekseninde ise sertliğin malzemenin ortasında plato oluşturduğunu alt ve üst kenarlara yaklaşırlarken sertlikte azalma olduğunu göstermektedir.
3. ECAP öncesi yüzeyde oluşturulan kare desenler, alt ve üst yüzeylerde değişmezken, yan yüzeyde paralel-kenara dönüşmektedir. Orta kısımdaki kayma açısının değişen malzemeyle dahi kabaca 58° civarında sabit kalmış, alt yüzeye yakın kısımlardaki açı ise malzemenin malzemeye değişen pekleşme katsayısı ve boşluk oluşumu nedeniyle değişiklik göstermiştir. Sonuçlar sonlu eleman analiz yöntemleriyle uyumluluk göstermektedir.

### Sistemik Deneyler

4. Yenilenen kalıp sistemi sayesinde çatlaksız 2024 Al-alaşımı numuneler (18 mm çap, 30 mm uzunluk) elde edilebilmiştir. Numunelerin önüne konan bakır bloklar sayesinde geri tepme basıncı ayarlanarak kalıp sökme takma işlemi olmadan ardışık numune geçirilmesi mümkün olmaktadır.
5. Tek paso ECAP deformasyonu ile sertlik değeri, ortalama 82 HB'den 160 HB'ye çıkmaktadır.

6. Deformasyon ve yaşlanmaya bağlı olarak malzemenin iç yapısı değişmekte ve x-ışını kırınım tepesinde genişleme ve kayma meydana getirmektedir. Kırınım çizgisi genişlemesi yöntemiyle ECAP sonrası ortalama hücre boyutu 50nm olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, TEM incelemeleriyle tutarlılık göstermektedir.
7. TEM görüntülerinden, Al-2024 alaşımının çözeltiliye alınmış durumda çubuksu T-fazına sahip olduğu anlaşılmaktadır. ECAP sonrası dislokasyonlar T-fazı etrafında yumaklanmış ve sertleşmeye katkı sağlamıştır. Artan dislokasyon yoğunluğu nedeniyle tane sınırlarının saptanmasında güçlük çekildiğinden, ECAP sonrasında tavlama işlemi uygulanmıştır. Tavlama sonucunda, iç yapıda toparlanma ve yeniden-kristalleşme mekanizmaları devreye girmiş ve ortalama hücre boyutu 0,4 µm mertebesine ulaşmıştır. ECAP sonrası yaşlandırılan örneklerde ise S' ve S'' çökeltilerine rastlanmıştır.
8. 2024 Al-alaşımları tek paso ECAP sonrası yaşlandırılmış; deformasyonsuz yaşlandırmaya göre sertlik miktarındaki değişim incelenmiştir. Kesit alandan alınan ortalama sertliklerde 190°C'de yaşlandırılmış örneklerde 24 saatte 141HB 'ye ulaşılabilirken, yaşlandırılma öncesi ECAP uygulanan örneklerde aynı sertliğe 1 saat sonunda ulaşılmaktadır. ECAP işleminin, yaşlanma kinetiğini heterojen çekirdeklenme mekanizması sayesinde arttırdığı düşünülmektedir.

### 5.3. Kesintisiz Tezgaah (DCAP)

1. Sonlu eleman analizi (FEM) yöntemiyle yapılan araştırmalarda DCAP giriş – çıkış kanalları arasında olması gereken deformasyon miktarı %8'den az olduğu durumlarda malzemenin çıkış kanalının doldurulduğu ve işlemin problemsiz gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir.
2. Merdaneler arası mesafenin 1,95 cm ve çıkış kalıp boşluğunun 2,00 cm olduğu DCAP sistemi için yapılan simulasyonda, malzemeye uygulanan gerinim tek pasoda 0,3 ile 0,6 arasında değişmektedir. Böylelikle, kayma deformasyonu sayesinde tek pasoda dahi malzemeye çok yüksek gerinimler verilebildiği saptanmıştır.
3. Deformasyon öncesi 6061-T6 alaşımının 109 HB olan ilk sertliği sadece haddelemeye 110 HB'ye, bir paso DCAP ile 116 HB'ye ve iki paso DCAP ile 119 HB'ye çıkmaktadır.
4. Çözeltiliye alınmış 6061 alaşımında ise sertlik 42 HB'den birinci paso sonunda 60 HB'ye, dördüncü pasodan sonra ise 73 HB'ye çıkmaktadır. Sertlik 4 paso sonucunda 1,7 kat oranında artış göstermiştir. Gerinimin 2'den düşük olduğu aralıkta hızlı sertlik artışı gözlenmiş; fakat 2'den büyük olan değerlerde sertlik artış hızı düşmüş ve azalma eğilimine geçmiştir.
5. Kısmi dokulu merdane yüzeyine sahip son tasarım uygulamalarında; DCAP öncesi tavlanan numunenin sertliği tek paso deformasyon sonrasında 1,4 katına çıkarken; akma dayancında %100'e varan artış tespit edilmiştir. Bu durumda dahi malzeme sünekliğini korunmuştur.

## 6. PROJE ÖZDEĞERLENDİRMESİ

Proje bütünlüğü içerisinde incelenip özdeğerlendirme yapıldığında projenin büyük ölçüde başarılı olduğu ve ciddi kazanımlar elde edildiği düşünülmektedir.

Proje dört ay uzatma ile yirmi sekiz aylık sürede tamamlanmıştır.

Proje süresince üç adet gelişme raporu, zamanında TÜBİTAK 'a gönderilmiştir.

Bazı alanlarda, proje önerisinde yer alandan daha fazla iş gerçekleştirilmiştir. Proje önerisinde sadece tek sistem üzerine çalışma bulunmasına rağmen, deneysel çalışmalar iki koldan yürütülmüştür. Hem çubuk numuneler için ECAP tezgahı (B planı) hem de yassı mamul deformasyonu yapabilen DCAP sistemi ile çalışılmıştır. Ayrıca, projenin ilk aşamasında yapılması öngörülen cihaz tasarımına yönelik modelleme çalışmaları, proje boyunca geliştirilerek sürdürülmüştür. Projede eksik kalan kısım ise sıcak deformasyon uygulamasıdır.

Projenin gidişatını olumsuz yönde etkileyen hususlar aşağıda sıralanmıştır:

- Proje önerisinde talep edilen yardımcı personel sayısının azaltılması ve proje süresinin kısaltılması nedeniyle hedef kaybı olmuştur.
- Çok pasolu deformasyonla numune üretebilecek kesintisiz tezgah tasarımı, yapımı ve deneme-yanılma ile modernizasyonu tahminden daha uzun zaman almıştır. Öncelik sistemin oturtulmasına verildiğinden sıcaklık parametresi devre dışı bırakılmak zorunda kalmıştır.
- TEM incelemeleri için ilave donanım alımı, ODTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde yeni TEM alımındaki aksamalar nedeniyle gecikmiştir. Bu durum, TEM incelemelerinin sarkmasına neden olmuş ve projenin uzatılmasını gerekli kılmıştır.
- 2008 yılında iki yardımcı personelin ardarda ayrılması ve yeni eleman istihdamı, son dönemdeki çalışma temposunu düşürmüştür.

Proje kapsamında, uluslararası hakemli dergilerde 2 adet makale yayınlanmış, 2 adet makale de değerlendirme/yayın aşamasındadır.

Elde edilen sonuçlar, 2007'de Ufa-Rusya, 2008'de Gosslar-Almanya, Krakow-Polonya ve İstanbul-Türkiye'de yapılan uluslararası kongrelerde sözlü/poster olarak sunularak literatüre katkı sağlanmıştır.

Uluslararası kongrelerde, özellikle Rusya ve Güney Kore 'deki uzmanlarla temas sağlanmış, yeni uluslararası projelerin başlatılması için altyapı oluşturulmuştur.

Modelleme, tasarım ve uygulama sürecinde elde edilen tecrübeler ve uluslararası bağlantıların oluşturulması bu projenin ciddi kazanımları olarak görülmektedir.

Proje ile bağlantılı olarak 1 yüksek lisans çalışması bitirilmiş (E. Saraloğlu) olup, bir yüksek lisans (G.E. Uzunçakmak) ve iki doktora çalışması (E. Tan, P. Karpuz) devam etmektedir. Bu durum, proje kazanımlarının kullanılmaya devam edeceğinin ve yeni gelişmelerin sağlanacağına göstergesidir.

## KAYNAKLAR

BAIK S.C., Estrin Y., Kim H.S., Hellmig R.J., Dislocation Density-Based Modeling of Deformation Behavior of Aluminium Under Equal Channel Angular Pressing, *Materials Science and Engineering*, A351, 86–97, (2003).

CAI M., Field D.P., Lorimer G.W., A Systematic Comparison of Static and Dynamic Ageing of Two Al–Mg–Si Alloys, *Materials Science and Engineering*, A373, 65–71, (2004).

CHANG J.Y., Shan A., Microstructure and Mechanical Properties of AlMgSi Alloys After Equal Channel Angular Pressing at Room Temperature, *Materials Science and Engineering*, A347, 165–70, (2003).

CHANG S.Y., Lee K.S., Choi S.H., Shin D.H., Effect of ECAP on Microstructure and Mechanical Properties of a Commercial 6061 Al Alloy Produced by Powder Metallurgy, *Journal of Alloys and Compounds*, 354, 216–20, (2003).

CHENG S., Zhao Y.H., Zhu Y.T., Ma E., Optimizing the Strength and Ductility of Fine Structured 2024 Al Alloy by Nano-precipitation, *Acta Materialia*, 55, 5822-32, (2007).

CHUNG C.S., Kim J.K., Kim H.K., Kim W.J., Improvement of high-cycle fatigue life in a 6061 Al alloy produced by equal channel angular pressing, *Materials Science and Engineering*, A337, 39–44, (2002).

FURUKAWA M., Horita Z., Nemoto M., Langdon T.G., The Use of Severe Plastic Deformation for Microstructural Control, *Materials Science and Engineering*, A324, 82–9, (2002).

FURUKAWA M., Iwahashi Y., Horita Z., Nemoto M., Langdon T.G., The Shearing Characteristics Associated with Equal-Channel Angular Pressing, *Materials Science and Engineering*, A257, 328–32, (1998).

HAN J.H., Suh J.Y., Jee K.K., Lee J.C., Evaluation of Formability and Planar Anisotropy Based on Textures in Aluminum Alloys Processed by a Shear Deforming Process, *Materials Science and Engineering*, A477, 107–20, (2008).

HAN J.H., Yoon J.K., Park J.W., Oh K.H., Lee J.C., A Comparative Study of Two Shear Deforming Processes in Texture Evolution, *Materials Transactions*, 46, 1064–9, (2005a).

HAN J.H., Huh M.Y., Suh J.Y., Lee J.C., Controlling the Textures of the Al Alloy Sheet via Dissimilar Channel Angular Pressing, *Materials Science and Engineering*, A394, 60–5, (2005b).

HAN J.H., Suh J.Y., Oh K.H., Lee J.C., Orientation Rotation Behavior in Aluminum Alloys During Dissimilar Channel Angular Pressing, *Materials Transactions*, 45, 1, 125–30, (2004a).

HAN J.H., Suh J.Y., Oh K.H., Lee J.C., Effects of the Deformation History and the Initial Textures on the Texture Evolution in an Al Alloy Strip During the Shear Deforming Process, *Acta Materialia*, 52, 4907–18, (2004b).

HAN J.H., Oh K.H., Lee J.C., Effect of Accumulative Strain on Texture Evolution in 1050 Al Alloys Processed by Continuous Confined Strip Shearing, *Materials Science and Engineering*, A387–389 240–3, (2004c).

HORITA Z., Fujinami T., Nemoto M., Langdon T.G., Improvement of Mechanical Properties for Al Alloys Using Equal-Channel Angular Pressing, *Journal of Materials Processing Technology*, 117, 288–92, (2001).

IWAHASHI Y., Wang J., Horita Z., Nemoto M., Langdon T.G., Principle of Equal-Channel Angular Pressing for the Processing of Ultra-Fine Grained Materials, *Scripta Materialia*, 35, 143–6, (1996).

JINING Q., Han J.H., Guoding Z., Lee J.C., Characteristic of Textures Evolution Induced by Equal Channel Angular Pressing in 6061 Aluminum Sheets, *Scripta Materialia*, 51, 185–9, (2004).

KIM J.K., Kim H.K., Park J.W., Kim J.W., Large Enhancement in Mechanical Properties of the 6061 Al Alloys After a Single Pressing by ECAP, *Scripta Materialia*, 53, 1207–11, (2005).

KIM W.J., Chung C.S., Ma D.S., Hong S.I., Kim H.K., Optimization of Strength and Ductility of 2024 Al by Equal Channel Angular Pressing (ECAP) and Post-ECAP Aging, *Scripta Materialia*, 49, 333–8, (2003).

KIM W.J., Kim J.K., Park T.Y., Hong S.I., Kim D.I., Kim Y.S., Lee J.D., Enhancement of Strength and Superplasticity in a 6061 Al Alloy Processed by Equal-Channel-Angular-Pressing, *Metallurgical and Materials Transactions*, A33, 3155–64, (2002).

KIM J.K., Jeong H.G., Hong S.I., Kim Y.S., Kim W.J., Effect of Aging Treatment on Heavily Deformed Microstructure of a 6061 Aluminum Alloy After Equal Channel Angular Pressing, *Scripta Materialia*, 45, 901–7, (2001).

LEE S., Furukawa M., Horita Z., Langdon T.G., Developing a Superplastic Forming Capability in a Commercial Aluminum Alloy Without Scandium or Zirconium Additions, *Materials Science and Engineering*, A342, 294–301, (2003a).

LEE J.C., Suh J.Y., Ahn J.P., Work-Softening Behavior of the Ultrafine-Grained Al Alloy Processed by High-Strain-Rate, Dissimilar-Channel Angular Pressing, *Metallurgical and Materials Transactions*, A34, 625–32, (2003b).

LEE J.C., Seok H.K., Suh J.Y., Microstructural Evolutions of the Al Strip Prepared by Cold Rolling and Continuous Equal Channel Angular Pressing, *Acta Materialia*, 50, 4005–19, (2002a).

LEE J.C., Seok H.K., Suh J.Y., Han J.H., Chung Y.H., Structural Evolution of a Strip-Cast Al Alloy Sheet Processed by Continuous Equal-Channel Angular Pressing, *Metallurgical and Materials Transactions*, A33, 665–73, (2002b).

Lee J.C., Seok H.K., Han J.H., Chung Y.H., “Controlling the Textures of the Metal Strips via the Continuous Confined Strip Shearing (C2S2) Process”, *Materials Research Bulletin*, 36, 997–1004, (2001).

MAO J., Kang S.B., Park J.O., Grain Refinement, Thermal Stability and Tensile Properties of 2024 Aluminum Alloy After Equal-Channel Angular Pressing, *Journal of Materials Processing Technology*, 159, 314–20, (2005).

MATSUKI K., Aida T., Takeuchi T., Kusui J., Yokoe K., Microstructural Characteristics and Superplastic-Like Behavior in Aluminum Powder Alloy Consolidated by Equal-Channel Angular Pressing, *Acta Materialia*, 48, 2625–32, (2000).

MOON B.S., Kim H.S., Hong S.I., Plastic Flow and Deformation Homogeneity of 6061 Al During Equal Channel Angular Pressing, *Scripta Materialia*, 46, 131–6, (2002).

NAKASHIMA K., Horita Z., Nemoto M., Langdon T.G., Influence of Channel Angle on the Development of Ultrafine Grains in Equal-Channel Angular Pressing, *Acta Materialia*, 46, 1589–99, (1998).

NAKASHIMA K., Horita Z., Nemoto M., Langdon T.G., Development of a Multi-Pass Facility for Equal-Channel Angular Pressing to High Total Strains, *Materials Science and Engineering*, A281, 82–7, (2000).

NAM C.Y., Han J.H., Chung Y.H., Shin M.C., Effect of Precipitates on Microstructural Evolution of 7050 Al Alloy Sheet During Equal Channel Angular Rolling, *Materials Science and Engineering*, A347, 253–7, (2003).

OH S.J., Kang S.B., Analysis of the Billet Deformation During Equal Channel Angular Pressing, *Materials Science and Engineering*, A343, 107–15, (2003).

PEI Q.X., Hu B.H., Lu C., Wang Y.Y., A Finite Element Study of the Temperature Rise During Equal Channel Angular Pressing, *Scripta Materialia*, 49, 303–8, (2003).

PITHAN C., Hashimoto T., Kawazoe M., Nagahora J., Higashi K., Microstructure and Texture Evolution in ECAE Processed A5056, *Materials Science and Engineering*, A280, 62–8, (2000).

RAAB G.J., Valiev R.Z., Lowe T.C., Zhue Y.T., Development of a Multi-Pass Facility for Equal-Channel Angular Pressing to High Total Strains, *Materials Science and Engineering*, A382, 30–4, (2004).

SAITO Y., Utsunomiya H., Suzuki H., Sakai H., Improvement in the R-Value of Aluminum Strip by a Continuous Shear Deformation Process, *Scripta Materialia*, 42, 1139–44, (2000).



SEGAL V.M., Materials Processing by Simple Shear, *Materials Science and Engineering*, A197, 157–64, (1995).

SUH J.Y., Han J.H., Oh K.H., Lee J.C., Effect of Deformation Histories on Texture Evolution During Equal- and Dissimilar-Channel Angular Pressing, *Scripta Materialia*, 49, 185–90, (2003).

XU C., Furukawa M., Horita Z., Langdon T.G., Influence of ECAP on Precipitate Distributions in a Spray-Cast Aluminum Alloy, *Acta Materialia*, 53, 749–58, (2005).

XU C., Furukawa M., Horita Z., Langdon T.G., Using ECAP to Achieve Grain Refinement, Precipitate Fragmentation and High Strain Rate Superplasticity in a Spray-Cast Aluminum Alloy, *Acta Materialia*, 51, 6139–49, (2003).

YAMASHITA A., Yamaguchi D., Horita Z., Langdon T.G., Influence of Pressing Temperature on Microstructural Development in Equal-Channel Angular Pressing, *Materials Science and Engineering*, A287, 100–6, (2000).

ZAO Y.H., Liao X.Z., Jin Z., Valiev R.Z., Zhu Y.T., Microstructures and Mechanical Properties of Ultrafine Grained 7075 Al Alloy Processed by ECAP and Their Evolutions During Annealing, *Acta Materialia*, 52, 4589–99, (2004).

ZHENG L.J., Chen C.Q., Zhou T.T., Liu P.Y., Zheng M.G., 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, 455–61, (2003).