

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**EŞ KANALLI AÇISAL EKSTRÜZYON YÖNTEMİ İLE YÜKSEK DAYANIMLI**  
**IF-ÇELİĞİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE YÖNTEMİN BU ÇELİKTE ÜRETİLEN**  
**SACLARA UYGULANMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**Mak. Yük. Müh. Onur SARAY**

**TEMMUZ 2013**  
**TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**EŞ KANALLI AÇISAL EKSTRÜZYON YÖNTEMİ İLE YÜKSEK DAYANIMLI**  
**IF-ÇELİĞİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE YÖNTEMİN BU ÇELİKTEN ÜRETİLEN**  
**SACLARA UYGULANMASI**

**Mak. Yük. Müh. Onur SARAY**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**"DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)"**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10.06.2013**  
**Tezin Savunma Tarihi : 08.07.2013**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Gençğa PÜRÇEK**

**Trabzon 2013**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**Makine Mühendisliği Anabilim Dalında**  
**Onur SARAY tarafından Hazırlanan**

**EŞ KANALLI AÇISAL EKSTRÜZYON YÖNTEMİ İLE YÜKSEK DAYANIMLI**  
**IF-ÇELİĞİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE YÖNTEMİN BU ÇELİKTE ÜRETİLEN**  
**SACLARA UYGULANMASI**

**Başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 18/06/2013 gün ve 1510/02 sayılı**  
**kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

**DOKTORA TEZİ**  
**olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN** .....

**Üye : Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI** .....

**Üye : Prof. Dr. Fazlı ARSLAN** .....

**Üye : Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU** .....

**Üye : Prof. Dr. Gençğa PÜRÇEK** .....

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**  
**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

IF-çeliğinin sahip olduğu düşük arayer atomu oranı, üstün süneklik ve şekillendirilebilirlik sergilemesini sağlamaktadır. IF-çeliğinin bu özelliği, karmaşık geometriye sahip yapıların derin çekme gibi plastik deformasyon yöntemleri ile üretilmesinde üstün performans sergilemesini sağlamaktadır. Öte yandan, bu çeliklerin yapısındaki düşük arayer atomu oranının neden olduğu yetersiz mukavemet değerlerinin artırılmasında kullanılabilecek en uygun yöntem, tane incilmesi ve dislokasyon sertleşmesidir. Son yıllarda geliştirilen eş kanallı açısız ekstrüzyon/basma (EKAE/B), malzemelerin tane boyutunu mikron altı mertebelere kadar inceltirilerek ultra-ince yapıya hale getirilmesinde kullanılan etkin bir yöntemdir. Bu yöntemin uygulandığı malzemelerde iri taneli duruma göre önemli oranda mukavemet artışı elde edilebildiği anlaşılmıştır.

Bu çalışmada, kütleli ve sac formlarındaki IF-çeliğine farklı rota ve paso sayılarında EKAE/B işlemi uygulandı. İşlem sonrasında, IF-çeliğinin içyapısal özelliklerinde ortaya çıkan değişimlerin mukavemet, süneklik, yeniden kristalleşme davranışı, şekillendirilebilirlik, tokluk ve sünek-gevrek geçiş davranışına etkileri sistematik bir şekilde incelenerek “işlem-yapı-özellik ilişkileri” ortaya konuldu. Elde edilen sonuçlar, söz konusu özelliklerde önemli iyileşmelerin elde edildiği gösterdi. Ayrıca, EKAE/B sonrasında uygulanan tavlama ile söz konusu özelliklerin farklı mühendislik uygulamaları için optimize edilebileceği anlaşıldı.

Tez danışmanlığını üstlenerek çalışmalarımın yönlendirilmesindeki katkılarından dolayı hocam Prof. Dr. Genççağ PÜRÇEK'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmalarına sağladığı katkılardan dolayı, Prof. Dr. İbrahim KARAMAN ve Prof. Dr. Hans J. MAIER'e teşekkür ederim. Bu tez çalışması, 107M618 kod numaralı proje ile TÜBİTAK, 2008.112.003.6 kod numaralı proje ile KTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi ve Yurtdışı Araştırma Bursu ile YÖK tarafından desteklenmiştir. Çalışmada kullanılan deney malzemesi, ERDEMİR tarafından sağlanmıştır. Desteklerinden dolayı sözü geçen kurum yetkililerine teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca, desteklerini esirgemeyen annem, babam, kardeşim ve sevgili eşime çok teşekkür ederim.

Onur SARAY

Trabzon, 2013

## **TEZ BEYANNAMESİ**

Doktora tezi olarak sunduğum “Eş Kanallı Açısal Ekstrüzyon Yöntemi ile Yüksek Dayanımlı IF-Çeliğinin Geliştirilmesi ve Yöntemin bu Çelikten Üretilen Saclara Uygulanması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Gençğa PÜRÇEK’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma süresinde bilimsel araştırma etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 10/06/2013

Onur SARAY

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIX
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Eş Kanallı Açısal Ekstrüzyon/Basma (EKAE/B) Yöntemi .....	5
1.2.1. Uygulama Prensipleri.....	5
1.2.2. EKAE İşlem Parametreleri.....	7
1.2.2.1. Uygulama Rotası.....	7
1.2.2.2. İşlem Sıcaklığı .....	9
1.2.2.3. Ters Basınç.....	10
1.2.3. EKAE İşleminin İçyapısal Özellikler Üzerine Etkisi .....	11
1.2.4. EKAE İşleminin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi.....	15
1.2.4.1. Mukavemet ve Süneklik .....	15
1.2.4.2. Yorulma .....	17
1.2.4.3. Tokluk .....	18
1.2.4.4. Şekillendirilebilirlik .....	19
1.2.4.5. Süperplastik Etki .....	20
1.2.5. EKAE Yönteminin Endüstriyel Uygulanabilirliği .....	21
1.3. IF-çeliği.....	23
1.3.1. IF-Çeliğine Uygulanan EKAE İşlemleri.....	24
1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı .....	26
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	31
2.1. Deney Malzemesi.....	31
2.2. EKAE İşlemleri.....	31

2.2.1.	Kütlesel Formdaki IF-Çeliğine Uygulanan EKAE Deneyleleri .....	31
2.2.1.	Sac Formdaki IF-Çeliğine Uygulanan EKASE Deneyleleri.....	34
2.3.	İçyapı İncelemeleri.....	37
2.4.	Mekanik Özellik İncelemeleri.....	38
2.5.	Termal Kararlılık ve Yeniden Kristalleşme Davranışı .....	39
2.6.	Çentik Darbe Tokluğu ve Sünek-Gevrek Geçiş Davranışı .....	40
2.7.	Şekillendirilebilirlik Davranışı.....	41
3.	BULGULAR.....	44
3.1.	İçyapı.....	44
3.1.1.	İşlem Öncesi Durum .....	44
3.1.2.	İşlem Sonrası Durum .....	45
3.1.2.1.	Kütlesel Formdaki IF-Çeliği .....	45
3.1.3.	Sac Formdaki IF-Çeliği.....	58
3.1.4.	Kristalografik Yönelim (Tekstür/Doku Oluşumu).....	66
3.2.	Mekanik Özellikler .....	70
3.2.1.	Çekme Özellikleri .....	70
3.2.1.1.	Kütlesel Formdaki IF-Çeliği .....	70
3.2.1.2.	Sac Formdaki IF-Çeliği.....	77
3.3.	Isıl İşlem.....	83
3.3.1.	Termal Kararlılık.....	83
3.3.2.	Yeniden Kristalleşme Kinetiği.....	93
3.3.3.	Isıl İşlem-Mekanik Özellik İlişkisi .....	105
3.4.	Şekillendirilebilirlik .....	114
3.5.	Tokluk ve Sünek-Gevrek Geçiş Davranışı .....	146
3.5.1.	Oda Sıcaklığındaki Çentik Darbe Tokluğu.....	146
3.5.2.	Oda Sıcaklığındaki Kırılma Davranışı .....	147
3.5.3.	Sünek-Gevrek Geçiş Davranışı.....	151
4.	İRDELEME .....	161
4.1.	İçyapı.....	161
4.2.	Çekme Özellikleri .....	165
4.3.	Isıl İşlem.....	168
4.4.	Şekillendirilebilirlik .....	171
4.5.	Tokluk ve Sünek-Gevrek Geçiş Davranışı .....	178

5.	SONUÇLAR .....	184
6.	ÖNERİLER.....	188
7.	KAYNAKLAR .....	189

ÖZGEÇMİŞ



Doktora Tezi

ÖZET

EŞ KANALLI AÇISAL EKSTRÜZYON YÖNTEMİ İLE YÜKSEK DAYANIMLI  
IF-ÇELİĞİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE YÖNTEMİN BU ÇELİKTE ÜRETİLEN  
SACLARA UYGULANMASI

Onur SARAY

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Genççağ PÜRÇEK  
2013, 201 sayfa

Bu çalışmada, kütleli ve sac formlarındaki IF-çeliğine farklı rota ve paso sayılarında eş-kanallı açısall ekstrüzyon/basma (EKAE/B) işlemleri uygulandı. Bu işlemler sırasında, IF-çeliğinin içyapısal özelliklerinde ortaya çıkan değişimlerin mukavemet, süneklik, yeniden kristalleşme davranışı, şekillendirilebilirlik, tokluk ve sünek-gevrek geçiş davranışına etkileri sistematik bir şekilde incelenerek söz konusu malzeme için “işlem-yapı-özellik ilişkileri” ortaya konuldu. Genel olarak, EKAE işlemi çeliğin başlangıçta iri olan tane yapısını önemli oranda incelterek 420 nm-820 nm aralığında boyutlara sahip ultra-ince taneli (UİT) içyapıya dönüştürdü. İşlemler sonrasında UİT içyapıda basit kayma deformasyonu ile oluşmuş karakteristik bir kristalografik yönelim ortaya çıktı. İçyapıda ortaya çıkan aşırı incelmeye ve yüksek dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak çeliğin akma mukavemeti uygulanan işleme bağlı olarak 6-7 kat artarken, sünekliği ise azaldı. Mukavemet ve süneklik özelliklerinin dengelenmesi amacıyla uygulanan ısı işlemler sonrasında iri taneli duruma göre yüksek mukavemete ve aynı zamanda yeterli sünekliğe sahip IF-çeliği üretildi. UİT yapıları çeliğin şekillendirilebilirlik özelliği ise uygulanan EKAE rotasına da bağlı olarak belli oranda azaldı. Ancak, mukavemet-süneklik dengesinin elde edildiği ısı işlem şartlarında şekillendirilebilirlikte tekrar artışlar elde edildi. Ayrıca, iri taneli örneklerin şekillendirilmesi sırasında yüzeyinde ortaya çıkan portakal kabuğu etkisi de UİT yapısının oluşumuyla önemli oranda azaldı. UİT yapının oluşumu IF-çeliğinin sünek-gevrek geçiş sıcaklığının -40°C’den -90°C’ye düşmesine neden oldu. Ayrıca, UİT yapının oluşumuyla geçiş bölgesi yatıklaşarak, sünek-gevrek geçişi daha geniş bir sıcaklık aralığında gerçekleşti.

**Anahtar Kelimeler:** Aşırı plastik deformasyon, EKAE, IF-çeliği, Yeniden kristalleşme, Şekillendirilebilirlik, Darbe tokluğu.

PhD. Thesis

SUMMARY

DEVELOPMENT OF HIGH STRENGTH IF-STEEL BY EQUAL CHANNEL ANGULAR EXTRUSION AND APPLICATION OF THE METHOD TO IF-STEEL SHEETS

Onur SARAY

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Applied Sciences  
Mechanical Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Gençağa PÜRÇEK  
2013, 201 Pages

In this study, an IF-steel in bulk and sheet forms was successfully processed by equal-channel angular extrusion/pressing (ECAE/P) following different routes and pass numbers. After these processes, the effect of microstructural alterations on the strength, ductility, recrystallization behavior, formability, toughness and ductile-to-brittle transition behavior was investigated, and the “process-structure-property relationship” was established. In general, the ECAE processing refined the microstructure of coarse-grained (CG) steel and transformed it into ultra-fine grained (UFG) structure consisting of grains in the range of 420 nm-820 nm. A characteristic crystallographic orientation formed by a simple shear emerged in the UFG microstructure. The UFG formation along with high dislocation density brought about 6-7 times higher yield strength than that of CG steel. But, the ductility decreased after the processes. A microstructure having higher strength with moderate ductility was produced by appropriate heat treatments aiming to establish a balance between strength and ductility. The formability of CG IF-steel was affected depending on applied strain paths and, in general, a slight decrease in formability was observed after UFG formation. However, this behavior was improved again by appropriate heat treatment following the conditions that gave a good balance between strength and ductility. Furthermore, orange peel effect appeared on the surface of deformed CG steel diminished considerably after both UFG formation and appropriate annealing. Ductile-to-brittle transition temperature of the CG IF-steel decreased from  $-40^{\circ}\text{C}$  to about  $-90^{\circ}\text{C}$  by the formation of UFG structure. Also, the UFG formation flattened the transition curve, and caused the ductile-to-brittle transition to occur in a wider temperature range compared to that of CG counterpart.

**Key Words:** Severe plastic deformation, ECAE, IF-steel, Recrystallization, Formability, Brittle to ductile transition.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

- Şekil 1. Başlıca aşırı plastik deformasyon yöntemleri: (a) Eş kanallı açısal ekstrüzyon/basma (EKAE/B), (b) tekrarlı ekstrüzyon ve basma, (c) yüksek basınç altında burma, (d) kapalı kalıpta dövme, (e) birikimli bağ haddesi, (f) tekrarlı bükme-doğrultma ve (g) sürtünme-karıştırma işlemi (SKİ) [10, 11]. .....4
- Şekil 2. (a) Keskin köşe geçişine sahip ve (b) dış köşesi yuvarlatılmış EKAE kalıplarının şematik resimleri .....6
- Şekil 3. EKAE işleminde kullanılan temel rotalar ve bunların uygulanış biçimlerini gösteren şematik resimler [15]. .....8
- Şekil 4. EKAE işleminde kübik bir elemanın çeşitli rota ve paso sayılarında geçirdiği deformasyon evrelerini gösteren şematik gösterim [22]. .....9
- Şekil 5. EKAE işleminde ters basınç uygulamasını gösteren şematik resim ..... 11
- Şekil 6. YMK yapıli bakıra uygulanan EKAE işlemi sırasında ortaya çıkan tane incelleme mekanizmasını gösteren şematik resim: (a) EKAE öncesindeki nispeten eş-eksenli ve iri taneli içyapı, (b) tanelerin deformasyon bölgesine girişinde tane içi bölgelerde oluşan dislokasyon ağı, (c) dislokasyon ağının tanenin birincil kayma sistemine göre yönlenmesi ve (d) ikincil kayma sistemlerinin aktive olması [41]. ..... 14
- Şekil 7. SDH yapıli Mg'un EKAE işlemi ile tane boyutunun nasıl incelendiğini gösteren model: (a) EKAE uygulanmamış ilk durum, (b) içyapıda düzensiz dislokasyon oluşumu ve iç enerjinin artması, (c) yüksek EKAE sıcaklığı nedeniyle ve artan iç enerji ile birlikte dislokasyonların alt tane oluşturacak biçimde yeniden düzenlenmesi ve dislokasyon içermeyen yeni tanelerin çekirdeklenmesi, (d) belli oranda yeniden kristalleşme ile yeni çekirdeklenmiş tanelerin irileşmesi ile oluşan eş-eksenli taneler [44]..... 15
- Şekil 8. Geliştirilen başlıca sürekli EKAE yöntemleri: (a) İkili merdane düzeni ile sac besleme, (b) planet tipi merdaneler ile sac besleme, (c) bir merdane ve destek bloğu arasında oluşan sürtünme kuvveti kullanılarak sac besleme ve (d) çubuk tipi ürünler için geliştirilmiş sürekli EKAE sistemi .....22
- Şekil 9. Çalışmada kullanılan EKAE kalıp sisteminin şematik gösterimi.....33
- Şekil 10. EKAE rotalarının uygulanışını gösteren şematik resim .....33
- Şekil 11. Eş kanallı açısal sac ekstrüzyon (EKASE) sisteminin şematik gösterimi.....35
- Şekil 12. (a) Geliştirilen EKASE sisteminin genel görünümü ve (b) kullanılan sac numunelerin işlem öncesi ve bir pasoluk işlem sonrası görünümleri.....35
- Şekil 13. EKASE işlemi sırasında kullanılan işlem rotalarını gösteren şematik resim .....36
- Şekil 14. (a) EKAE işlemi uygulanmış kütleli numune içerisinde metalografi, çekme, çentik darbe ve Erichsen örneklerinin konumu, (b) EKASE işlemi uygulanmış

	sac numune içerisinde metalografi, çekme ve Erichsen örneklerinin konumu, (c) Kütlesel formda IF-çeliğinden çıkarılan çekme örneğinin boyutları, (d) Sac formundaki IF çeliğinden çıkarılan çekme örneğinin boyutları, (e) Kütlesel formda IF-çeliğinden çıkarılan çentik-darbe örneğinin boyutları.....	42
Şekil 15.	(a) Şekillendirilebilirlik deneylerinin yapıldığı Erichsen deney kalıbının şematik gösterimi, (b) kütlesel formda IF-çeliğinden çıkarılan Erichsen örneğinin boyutları .....	43
Şekil 16.	IF-çeliğinin EKAE işlemi öncesi içyapılarını gösteren optik resimler: (a) Kütlesel form, (b) sac form .....	44
Şekil 17.	Kütlesel formdaki IF-çeliğine uygulanan bir pasoluk EKAE işlemi sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri: a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) ilgili içyapıya ait difraksiyon deseni .....	48
Şekil 18.	Kütlesel formdaki IF-çeliğine rota-A'da uygulanan 2 pasoluk EKAE işlemi sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri: (a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) ilgili difraksiyon deseni.....	49
Şekil 19.	Kütlesel formdaki IF-çeliğine rota-C'de uygulanan 2 pasoluk EKAE işlemi sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri (a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) ilgili difraksiyon deseni.....	50
Şekil 20.	Kütlesel formdaki IF-çeliğine rota-A'da uygulanan 4 pasoluk EKAE işlemi sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri: (a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) ilgili difraksiyon deseni.....	51
Şekil 21.	Kütlesel formdaki IF-çeliğine rota-C'de uygulanan 4 pasoluk EKAE işlemi sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri: (a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) ilgili difraksiyon deseni.....	52
Şekil 22.	Kütlesel formdaki IF-çeliğine rota-Bc'de uygulanan 4 pasoluk EKAE işlemi sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri ve ilgili difraksiyon deseni: (a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) ilgili difraksiyon deseni.....	53
Şekil 23.	Kütlesel formdaki IF-çeliğine rota-A'da uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri: (a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) ilgili difraksiyon deseni.....	54
Şekil 24.	Kütlesel formdaki IF-çeliğine rota-C'de uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri: (a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) ilgili difraksiyon deseni.....	55
Şekil 25.	Kütlesel formdaki IF-çeliğine rota-Bc'de uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri: (a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) difraksiyon deseni .....	56
Şekil 26.	Kütlesel formdaki IF-çeliğine rota-E'de uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri: (a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) ilgili difraksiyon deseni.....	57
Şekil 27.	Sac formundaki IF-çeliğine uygulanan bir pasoluk EKASE işlemi sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri: (a) düşük büyültme ve (b) yüksek büyültme .....	59

Şekil 28.	Sac formundaki IF-çeliğine uygulanan 4 pasoluk EKASE işlemi sonrası oluşan içyapıları gösteren TEM resimleri: (a)-(b) rota-A, 4 paso ve (c)-(d) rota-C, 4 paso.....	60
Şekil 29.	Sac formundaki IF-çeliğine uygulanan 8 pasoluk EKASE işlemi sonrası oluşan içyapıları gösteren TEM resimleri: (a)-(b) rota-A, 8 paso ve (c)-(d) rota-C, 8 paso.....	61
Şekil 30.	Sac formdaki IF-çeliğine rota-A’da uygulanan 8 pasluk EKASE işlemi sonrası sac kesiti boyunca ortaya çıkan içyapısal durum: (a) Kesit boyunca içyapı ve tane dağılımını gösteren EBSD haritası ve seçilen bölgelerden alınan yüksek büyültmeli EBSD resimleri, (b) kesit boyunca farklı bölgelerde tane boyutu dağılımını gösteren grafikler ve (c) kesit boyunca farklı bölgelerde doku oluşumunu gösteren kutup şekilleri.....	63
Şekil 31.	Sac formundaki IF-çeliğine rota-C’da uygulanan 8 pasluk EKASE işlemi sonrası sac kesiti boyunca ortaya çıkan yapısal durum: (a) Kesit boyunca içyapı ve tane boyutunu gösteren EBSD haritası ve seçilen bölgelerden alınan yüksek büyültmeli EBSD resimleri, (b) kesit boyunca farklı bölgelerde tane boyutu dağılımını gösteren grafikler ve (c) kesit boyunca farklı bölgelerde doku oluşumunu gösteren kutup şekilleri.....	64
Şekil 32.	Rota-A ve rota-C’de uygulanan 8 pasoluk EKASE işlemi sonrası sac malzemenin içyapısını oluşturan taneler arasındaki açısal farkın dağılımını gösteren grafik.....	65
Şekil 33.	Rota-A ve rota-C’de uygulanan 8 pasoluk EKASE işlemi sonrası sac malzemenin içyapısında mikro-kayma bantlarının oluşumunu gösteren SEM-BSE resimleri. (a) rota-A, 8 paso ve (b) rota-C, 8 paso .....	66
Şekil 34.	Kütlesel formdaki IF-çeliğinin EKAE öncesi durumda (sıcak işlem görmüş iri taneli içyapı) elde edilen kutup şekilleri.....	68
Şekil 35.	Kütlesel formdaki IF-çeliğine bir paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen kutup şekilleri.....	68
Şekil 36.	Kütlesel formdaki IF-çeliğine rota-A’da 8 paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen kutup şekilleri.....	69
Şekil 37.	Kütlesel formdaki IF-çeliğine rota-C’de 8 paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen kutup şekilleri.....	69
Şekil 38.	Kütlesel formdaki IF-çeliğine rota-Bc’de 8 paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen kutup şekilleri.....	70
Şekil 39.	Kütlesel formdaki IF-çeliğine rota-E’de 8 paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen kutup şekilleri.....	70
Şekil 40.	Rota-A’da 1, 2, 4 ve 8 paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrası kütlesel formdaki IF-çeliği örneklerinden elde edilen gerilme-uzama eğrileri.....	72
Şekil 41.	Rota-C’de 1, 2, 4 ve 8 paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrası kütlesel formdaki IF-çeliği örneklerinden elde edilen gerilme-uzama eğrileri.....	72
Şekil 42.	Rota-Bc’de 1, 4 ve 8 paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrası kütlesel formdaki IF-çeliği örneklerinden elde edilen gerilme-uzama eğrileri.....	73

- Şekil 43. Rota-E’de 1 ve 8 paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrası kütleli formdaki IF-çeliği örneklerinden elde edilen gerilme-uzama eğrileri..... 73
- Şekil 44. Kütleli formdaki IF-çeliğinin akma ve çekme dayanımının farklı rotalarda uygulanan çok pasolu EKAE işlemi ile değişimi ..... 76
- Şekil 45. Kütleli formdaki IF-çeliğinin üniform uzama ve kopma uzaması değerlerinin farklı rotalarda uygulanan çok pasolu EKAE işlemi ile değişimi ..... 76
- Şekil 46. IF-çeliğinin EKASE öncesi ve sonrası farklı doğrultularda sergilediği gerilme-uzama diyagramları: Rota-A (a) 0°, (b) 45°, (c) 90° ve rota-C (d) 0°, (e) 45°, (f) 90° ..... 80
- Şekil 47. Sac formundaki IF-çeliğine uygulanan EKASE işlemi sonrası elde edilen akma mukavemeti değerinin örneklerin çıkarıldığı yön, paso sayısı ve uygulanan rotaya göre değişimini gösteren diyagram (EÖ: EKASE öncesi) ..... 82
- Şekil 48. Sac formundaki IF-çeliğine uygulanan EKASE işlemi sonrası elde edilen çekme dayanımı değerinin örneklerin çıkarıldığı yön, paso sayısı ve uygulanan rotaya göre değişimini gösteren diyagram (EÖ: EKASE öncesi) ..... 82
- Şekil 49. Sac formundaki IF-çeliğine uygulanan EKASE işlemi sonrası elde edilen kopma uzaması değerinin örneklerin çıkarıldığı yön, paso sayısı ve uygulanan rotaya göre değişimini gösteren diyagram (EÖ: EKASE öncesi) ..... 83
- Şekil 50. EKAE işlemi sonrası UİT yapıli hale getirilen kütleli formdaki IF-çeliğinin yeniden kristalleşme eğrileri: (a) Bir paso, (b) rota-A’da 2 ve 4 paso, (c) rota-C’de 2 ve 4 paso ve (d) rota-Bc’de 4 paso ..... 85
- Şekil 51. (a) Rota-A’da 8 pasoluk EKAE işlemi uygulanmış UİT yapıli IF-çeliğinin yeniden kristalleşme eğrisi, (b)-(g) seçilen sıcaklık değerlerinde bir saat süreyle uygulanan ısıli işlem sonrası ortaya çıkan içyapıları gösteren optik resimler ..... 89
- Şekil 52. (a) Rota-C’de 8 pasoluk EKAE işlemi uygulanmış UİT yapıli IF-çeliğinin yeniden kristalleşme eğrisi, (b)-(g) seçilen sıcaklık değerlerinde bir saat süreyle uygulanan ısıli işlem sonrası ortaya çıkan içyapıları gösteren optik resimler ..... 90
- Şekil 53. (a) Rota-Bc’de 8 pasoluk EKAE işlemi uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin yeniden kristalleşme eğrisi, (b)-(g) seçilen sıcaklık değerlerinde bir saat süreyle uygulanan ısıli işlem sonrası ortaya çıkan içyapıları gösteren optik resimler ..... 91
- Şekil 54. (a) Rota-E’de 8 pasoluk EKAE işlemi uygulanmış UİT yapıli çeliğinin yeniden kristalleşme eğrisi, (b)-(g) seçilen sıcaklık değerlerinde bir saat süreyle uygulanan ısıli işlem sonrası ortaya çıkan içyapıları gösteren optik resimler ..... 92
- Şekil 55. (a) Rota-A’da uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası elde edilen UİT yapıli IF-çeliğinin sertliğinin ve yeniden kristalleşme oranının 600°C’de uygulanan ısıli işlem zamanına göre değişimini gösteren eğriler. (b)-(m) Aynı malzemeye 600 °C’de ve farklı sürelerde uygulanan ısıli işlemler sonrası elde edilen içyapıları gösteren optik resimler ..... 96
- Şekil 56. (a) Rota-C’de uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası elde edilen UİT yapıli IF-çeliğinin sertliğinin ve yeniden kristalleşme oranının 600°C’de

- uygulanan ısıt işlem zamanına göre değişimini gösteren eğriler. (b)-(m) Aynı malzemeye 600 °C’de ve farklı sürelerde uygulanan ısıt işlemler sonrası elde edilen içyapıları gösteren optik resimler ..... 97
- Şekil 57. (a) Rota-Bc’de uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası elde edilen UİT yapılı IF-çeliğinin sertliğinin ve yeniden kristalleşme oranının 600°C’de uygulanan ısıt işlem zamanına göre değişimini gösteren eğriler. (b)-(m) Aynı malzemeye 600 °C’de farklı sürelerde uygulanan ısıt işlemler sonrası elde edilen içyapıları gösteren optik resimler ..... 98
- Şekil 58. (a) Rota-E’de uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası elde edilen UİT yapılı IF-çeliğinin sertliğinin ve yeniden kristalleşme oranının 600°C’de uygulanan ısıt işlem zamanına göre değişimini gösteren eğriler. (b)-(m) Aynı malzemeye 600 °C’de farklı sürelerde uygulanan ısıt işlemler sonrası elde edilen içyapıları gösteren optik resimler ..... 99
- Şekil 59. Farklı rotalarda uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrasında 600°C’de uygulanan ısıt işlem zamanının yeniden kristalleşme oranına etkisini gösteren eğriler..... 100
- Şekil 60. (a) Rota-E’de 8 paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrası IF-çeliğinde ortaya çıkan içyapıya ait EBSD resmi, (b) tane boyutunun içyapıda oransal dağılımı ve (c) tane sınırı açısall yöneliminin oransal dağılımı ..... 102
- Şekil 61. (a) Rota-E’de 8 paso sayısında EKAE işlemine tabi tutulan IF-çeliğinin 500°C’de 60 dk tavllanması sonrasında elde edilen EBSD resimleri, (b) tane boyutunun içyapıda oransal dağılımı ve (c) tane sınırı açısall yöneliminin oransal dağılımı ..... 103
- Şekil 62. (a) Rota-E’de 8 paso sayısında EKAE işlemine tabi tutulan IF-çeliğinin 600°C’de 11,5 dk. tavllanması sonrasında elde edilen EBSD resimleri, (b) tane boyutunun içyapıda oransal dağılımı ve (c) tane sınırı açısall yöneliminin oransal dağılımı ..... 103
- Şekil 63. (a) Rota-E’de 8 paso sayısında EKAE işlemine tabi tutulan IF-çeliğinin 600°C’de 30 dk. tavllanması sonrasında elde edilen EBSD resimleri, (b) tane boyutunun içyapıda oransal dağılımı ve (c) tane sınırı açısall yöneliminin oransal dağılımı ..... 104
- Şekil 64. (a) Rota-E’de 8 paso sayısında EKAE işlemine tabi tutulan IF-çeliğinin 600°C’de 60 dk. tavllanması sonrasında elde edilen EBSD resimleri, (b) tane boyutunun içyapıda oransal dağılımı ve (c) tane sınırı açısall yöneliminin oransal dağılımı ..... 104
- Şekil 65. Farklı rotalarda 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası farklı sıcaklıklarda 1 saat süreyle uygulanan ısıt işlemlerin kütlelel formdaki IF-çeliğinin gerilme-uzama davranışına etkisini gösteren diyagramlar: (a) Rota-A, (b) rota-C, (c) rota-Bc ve (d) rota-E..... 107
- Şekil 66. 600°C’de uygulanan ısıt işlem zamanının rota-E’de 8 pasoluk EKAE işlemi uygulanmış (8E) UİT yapılı IF-çeliğinin gerilme-uzama diyagramına etkisini gösteren eğriler ..... 109

- Şekil 67. 600°C’de uygulanan ısıt işlem zamanının rota-E’de 8 pasoluk EKAE işlemi uygulanmış (8E) UİT yapılı IF-çeliğinin gerilme-uzama diyagramının homojen deformasyon bölgesine etkisini gösteren eğriler ..... 109
- Şekil 68. Kütleli formda IF-çeliğinin haddelenmiş ve haddeme sonrası 600°C sıcaklıkta farklı sürelerde tavllanmış durumdaki gerilme-uzama eğrileri ..... 112
- Şekil 69. 600°C sıcaklıkta farklı sürelerde uygulanan tavlamanın haddelenmiş ve rota-E’de 8 paso sayısında EKAE uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin mekanik özellikleri ..... 113
- Şekil 70. (a) Rota-A’da ve farklı paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrası gerçekleştirilen Erichsen testlerinden elde edilen kuvvet (F)-çökme miktarı (X) eğrileri ve (b) bunlardan türetilen ve farklı deformasyon bölgelerini yansıtan dF/dX-X değişim grafikleri ..... 117
- Şekil 71. (a) Rota-C’de ve farklı paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrası gerçekleştirilen Erichsen testlerinden elde edilen kuvvet (F)-çökme miktarı (X) eğrileri ve bunlardan türetilen ve (b) farklı deformasyon bölgelerini yansıtan dF/dX-X değişim grafikleri ..... 118
- Şekil 72. (a) Rota-Bc’de ve farklı paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrası gerçekleştirilen Erichsen testlerinden elde edilen kuvvet (F)-çökme miktarı (X) eğrileri ve bunlardan türetilen ve (b) farklı deformasyon bölgelerini yansıtan dF/dX-X değişim grafikleri ..... 119
- Şekil 73. (a) Rota-E’de ve farklı paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrası gerçekleştirilen Erichsen testlerinden elde edilen kuvvet (F)-çökme miktarı (X) eğrileri ve bunlardan türetilen ve (b) farklı deformasyon bölgelerini yansıtan dF/dX-X değişim grafikleri ..... 120
- Şekil 74. (a) Farklı rotalarda uygulanan 8 paso sayısında EKAE işlemi sonrası gerçekleştirilen Erichsen testlerinden elde edilen kuvvet (F)-çökme miktarı (X) eğrileri ve bu eğrilerden türetilen ve (b) farklı deformasyon bölgelerini yansıtan dF/dX-X değişim grafikleri ..... 121
- Şekil 75. EKAE öncesi durumdaki örneklerin Erichsen testi sonrası sergiledikleri yüzey morfolojisini gösteren farklı büyültmelerdeki SEM resimleri: (a) Portakal kabuğu oluşumunu da gösteren genel görünüm, (b) yırtılma bölgesinin görünümü, (c)-(d) taneler arasındaki kristalografik yönelim farklarına bağlı olarak ortaya çıkan yüzey çatlakları görünüm ve (e) çatlak ilerleme bölgesinin görünümü ..... 127
- Şekil 76. Bir paso sayısında EKAE uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin Erichsen testi sonrasında sergilediği yüzey görünümü: (a) Düşük büyütmede genel görünüm, (b) lokalize deformasyon bantları ve çatlaklar ..... 127
- Şekil 77. Rota-A’da 4 pasoluk EKAE uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin Erichsen testi sonrası sergilediği yüzey görünümü: (a) Düşük büyütmede genel görünüm, (b) kırılmaya neden olan çatlaklar ve çatlak ilerleme yönlerinin görünümü ..... 128
- Şekil 78. Rota-A’da 8 pasoluk EKAE uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin Erichsen testi sonrası sergilediği yüzey görünümü: (a) Düşük büyütmede genel görünüm, (b) kırılmaya neden olan çatlaklar ve çatlak ilerleme yönlerinin görünümü ..... 128



Şekil 79.	Rota-C’de 4 pasoluk EKAE uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin Erichsen testi sonrasında sergilediği yüzey görünümüleri: (a) Genel görünüm, (b) lokalize deformasyon bantları ve çatlaklar .....	129
Şekil 80.	Rota-C’de 8 paso EKAE uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin Erichsen testi sonrasında sergilediği yüzey görünümüleri: (a)-(b) Genel görünüm, (c) lokalize deformasyon bölgesinin görünümü (d) lokalize deformasyon bölgesi ve flanş bölgesinin görünümü .....	129
Şekil 81.	Rota-Bc’de 4 pasoluk EKAE uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin Erichsen testi sonrasında sergilediği yüzey görünümüleri: (a)-(b) Genel görünüm ve (c)-(d) yırtılma bölgesinin yakından görünümü .....	130
Şekil 82.	Rota-Bc’de 8 pasoluk EKAE uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin Erichsen testi sonrasında sergilediği yüzey görünümüleri: (a)-(b) Genel görünüm, (c) lokalize deformasyon bölgesinin görünümü (d) lokalize deformasyon bölgesi ve flanş bölgesinin görünümü .....	130
Şekil 83.	Rota-E’de 8 pasoluk EKAE uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin Erichsen testi sonrasında sergilediği yüzey görünümüleri: (a)-(b) Genel görünüm, (c) lokalize deformasyon bölgesinin görünümü (d) lokalize deformasyon bölgesi ve flanş bölgesinin görünümü .....	131
Şekil 84.	(a) EKAE öncesi, (b) 8A, (c) 8C, (d) 8Bc ve (e) 8E şartlarındaki numenlerin Erichsen testi sonrasındaki kesit görünümüleri .....	132
Şekil 85.	8E şartlarındaki örneklerin 450°C, 500°C, 550°C, 600°C ve 650°C’de 1 saat süreyle tavlama sonrası uygulanan Erichsen testinden elde edilen; (a) kuvvet-çökme (F-X) eğrileri ve (b) bu eğrilerin eğimlerinin çökme miktarına göre değişimini (dF/dX-X) gösteren diyagramlar .....	136
Şekil 86.	8E şartlarındaki UİT yapılı örneklere 600°C’de 11,5 dk, 30 dk, 60dk ve 120dk süre ile uygulanan tavlama işleminin Erichsen testinden elde edilen kuvvet-çökme eğrisine olan etkisini gösteren diyagram .....	137
Şekil 87.	8E şartlarındaki UİT yapılı çelik örneğine 450°C’de 1 saat tavlandıktan sonra uygulanan Erichsen testi ile ortaya çıkan yüzeye ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) lokalize deformasyon bölgesinin yakından görünümü.....	139
Şekil 88.	8E şartlarındaki UİT yapılı çelik örneğinin 500°C’de 1 saat tavlandıktan sonra uygulanan Erichsen testi ile ortaya çıkan yüzeye ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) lokalize deformasyon bölgesinin yakından görünümü.....	140
Şekil 89.	8E şartlarındaki UİT yapılı çelik örneğinin 550°C’de 1 saat tavlandıktan sonra uygulanan Erichsen testi ile ortaya çıkan yüzeye ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) lokalize deformasyon bölgesinin yakından görünümü.....	140
Şekil 90.	8E şartlarındaki UİT yapılı çelik örneğinin 600°C’de 1 saat tavlandıktan sonra uygulanan Erichsen testi ile ortaya çıkan yüzeye ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) çatlak bölgesinin yakından görünümü.....	141
Şekil 91.	8E şartlarındaki UİT yapılı çelik örneğinin 650°C’de 1 saat tavlandıktan sonra uygulanan Erichsen testi ile ortaya çıkan yüzeye ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) çatlak bölgesinin yakından görünümü.....	141

- Şekil 92. 600°C’de 11,5 dk süreyle tavlanan 8E şartındaki UİT yapılı örneklerle uygulanan Erichsen testi sonrası ortaya çıkan yüzey görünümleri: (a) Genel görünüm ve (b) lokalize deformasyon bölgesinin yakından görünümü ..... 142
- Şekil 93. 600°C’de 30 dk süreyle tavlanan 8E şartındaki UİT yapılı örneklerle uygulanan Erichsen testi sonrası ortaya çıkan yüzey görünümleri: (a) Genel görünüm ve (b) çatlak bölgesinin yakından görünümü ..... 143
- Şekil 94. 600°C’de 120 dk süreyle tavlanan 8E şartındaki UİT yapılı örneklerle uygulanan Erichsen testi sonrası ortaya çıkan yüzey görünümleri: (a) Genel görünüm ve (b) çatlak bölgesinin yakından görünümü ..... 143
- Şekil 95. 8E şartındaki UİT yapılı örneklerin tavlınması sonrasında elde edilen kesit resimleri: (a) 450°C’de 60dk, 600°C’de (b) 11,5 dk, (c) 30 dk, (d) 60 dk, (e) 120 dk ve (f) 650°C’de 60 dk ..... 145
- Şekil 96. Farklı rota ve paso sayısında uygulanana EKAE işleminin IF-çeliğinin çentik darbe tokluğuna etkisini gösteren diyagram ..... 147
- Şekil 97. EKAE öncesi durumdaki iri taneli IF-çeliği örneklerin çentik darbe deneyi sonrasında ortaya çıkan kırılma yüzeylerine ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) deformasyon bölgesinin yakından görünümü ..... 149
- Şekil 98. Bir pasoluk EKAE işlemi uygulanmış çentik darbe örneklerinin kırılma yüzeylerine ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) kırılma yüzeyinin yakından görünümü ..... 149
- Şekil 99. 8A şartlarındaki çentik darbe örneklerinin kırılma yüzeylerine ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) kırılma doğrultusuna dik yırtıkların yakından görünümü ..... 150
- Şekil 100. 8C şartlarındaki çentik darbe örneklerinin kırılma yüzeylerine ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) kırılma yüzeyinin yüksek büyültmedeki görünümü ..... 150
- Şekil 101. 8Bc şartlarındaki çentik darbe örneklerinin kırılma yüzeylerine SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) kırılma yüzeyinin yakından görünümü ..... 151
- Şekil 102. 8E şartlarındaki çentik darbe örneklerinin kırılma yüzeylerine ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) kırılma yüzeyinin yakından görünümü ..... 151
- Şekil 103. EKAE öncesi iri tane yapı ve 8E şartlarında uygulanan EKAE işlemi sonrası UİT yapılı IF-çeliğin sergilediği sünek-gevrek geçişi eğrileri ..... 153
- Şekil 104. EKAE öncesi durumdaki iri taneli IF-çeliği örneklerinin -10°C ile -170°C arasındaki farklı sıcaklıklarda çentik darbe deneyi sonrası kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri ..... 155
- Şekil 105. EKAE öncesi durumdaki iri taneli IF-çeliği örneklerinin sünek-gevrek geçiş eğrisinin farklı noktalarına karşılık gelen sıcaklıklarda gerçekleştirilen çentik darbe deneyi sonrası ortaya çıkan kırılma yüzeyine ait SEM görüntüleri: (a)-(c) -30°C, (b)-(f) -40°C, (g)-(i) -50°C, (j)-(l) -100°C ve (m)-(o)-170°C ..... 156
- Şekil 106. Rota-E’de 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası UİT yapılı hale getirilen IF-çeliği örneklerinin -20°C ile -170°C arasındaki sıcaklıklarda çentik darbe deneyine tabi tutulması sonrası elde edilen kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri ..... 158

- Şekil 107. 8E şartlarında UİT yapılı hale getirilen çelik örneğın -70°C sıcaklıkta yapılan çentik darbe deneyi sonrası ortaya çıkan kırılma yüzeyine ait detay resimleri .... 159
- Şekil 108. 8E şartlarında UİT yapılı hale getirilen çelik örneğın -90°C sıcaklıkta yapılan çentik darbe deneyi sonrası ortaya çıkan kırılma yüzeyine ait detay resimleri .... 159
- Şekil 109. 8E şartlarında UİT yapılı hale getirilen çelik örneğın -100°C sıcaklıkta yapılan çentik darbe deneyi sonrası ortaya çıkan kırılma yüzeyine ait detay resimleri .... 160
- Şekil 110. 8E şartlarında UİT yapılı hale getirilen çelik örneğın -120°C sıcaklıkta yapılan çentik darbe deneyi sonrası ortaya çıkan kırılma yüzeyine ait detay resimleri .... 160
- Şekil 111. 8E şartlarında UİT yapılı hale getirilen çelik örneğın -170°C sıcaklıkta yapılan çentik darbe deneyi sonrası ortaya çıkan kırılma yüzeyine ait detay resimleri .... 160

## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1.	Deneylerde kullanılan kütleli ve sac formundaki IF-çeliğinin kimyasal bileşimi .....	31
Tablo 2.	Kütleli formadaki IF-çeliğine uygulanan EKAE işlemlerinde kullanılan deney parametreleri. ....	34
Tablo 3.	Sac formundaki IF-çeliğine uygulanan EKASE işlemlerinde kullanılan deney parametreleri .....	37
Tablo 4.	UİT yapıli IF-çeliğine uygulanan tavlama parametreleri .....	40
Tablo 5.	Kütleli formda IF-çeliğine değişik rota ve paso sayılarında uygulanan EKAE işlemleri sonrası ölçülen ortalama tane boyutu değerleri .....	58
Tablo 6.	Kütleli formda IF-çeliğine değişik rota ve paso sayılarında uygulanan EKAE işlemleri sonrası söz konusu malzemede ölçülen temel mukavemet ve süneklik değerleri. ....	75
Tablo 7.	Sac formundaki IF-çeliğinin işlem öncesi durum ile farklı rotalarda (rota-A ve rota-C) ve farklı pasolarda uygulanan EKASE işlemleri sonrası sahip olduğu mukavemet ve süneklik değerleri .....	81
Tablo 8.	Farklı rota ve paso sayılarında EKAE işlemleri uygulanarak UİT yapıli hale getirilen IF-çeliğinde; toparlanma, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi davranışlarının etkin olduğu sıcaklık aralıkları .....	93
Tablo 9.	Çeşitli EKAE rotalarında gerçekleştirilen 8 pasoluk işlem sonrası farklı sıcaklık ve farklı zaman adımlarında ısıl işleme tabi tutulmuş UİT yapıli IF-çeliğinin mukavemet ve süneklik değeri .....	110
Tablo 10.	Farklı rota ve paso sayılarında uygulanan EKAE işlemleri sonrasında gerçekleştirilen Erichsen testinden elde edilen <i>Erichsen İndeksi (Ei)</i> ve bu indekse karşılık gelen <i>yük (F<sub>Ei</sub>)</i> değerleri .....	123
Tablo 11.	8E şartlarındaki örneklere farklı sıcaklık ve sürelerde uygulanan tavlama sonrası gerçekleştirilen Erichsen testleri sonrası belirlene Erichsen indeksi (Ei) ve Erichsen indeksine karşılık gelen kuvvet (F <sub>Ei</sub> ) değerleri. ....	138
Tablo 12.	IF-çeliğine farklı rota ve paso sayılarında uygulanan EKAE işlemleri sonrasında elde edilen çentik darbe tokluğu değerleri.....	147
Tablo 13.	EKAE öncesi iri tane yapıli ve 8E şartlarında uygulanan EKAE işlemleri sonrası UİT yapıli IF-çeliğinin sünek-gevrek geçiş davranışına ait bazı değerler.....	153

# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

Geleneksel mühendislik malzemeleri çoğu zaman gelişen teknolojinin ihtiyaçlarına cevap verememektedir. Bu nedenle artan taleplere paralel olarak mevcut malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesi ve/veya yeni malzemelerin geliştirilmesi ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Özellikle hafifliğin ön planda olduğu otomotiv, havacılık, biyomekanik ve savunma sanayi gibi mühendislik uygulamalarının verimliliği bu uygulamalarda kullanılacak malzemelerin mekanik özellikleriyle yakından ilgilidir.

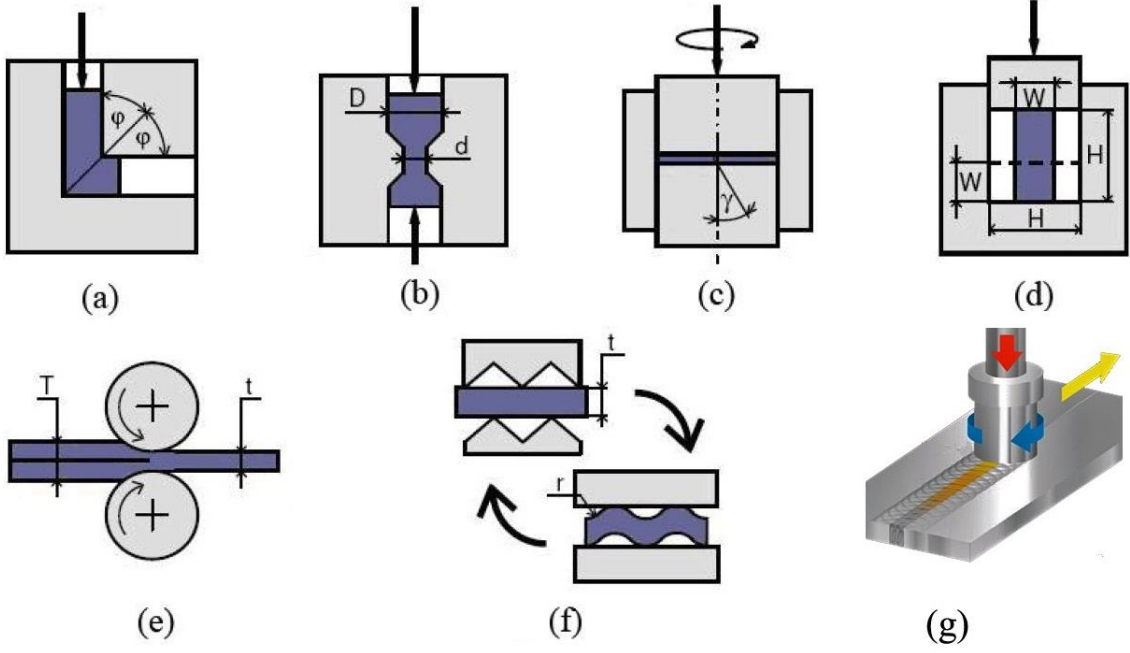
Diğer sektörler arasında otomotiv sektörü dünya ekonomisinde önemli yer tutan ve yoğun rekabetin yaşandığı bir sektör haline gelmiştir. Genel olarak otomobillerin neden olduğu çevre kirliliği ve yüksek yakıt tüketimi göz önünde bulundurulduğunda, daha hafif ve daha az yakıt tüketen araçların üretilmesi önemli hale gelmiştir. Bu amaçla söz konusu sektörde kullanılacak malzemelerin geliştirilmesi ve üstün şekillendirilebilirliğe ve aynı zamanda yüksek mekanik özelliklere sahip hale getirilmesi ile ilgili çalışmalar son yıllarda artarak sürmektedir [1]. Bu kapsamda yürütülen çalışmalar iki ana gruba ayrılabilir. Bunlardan birincisi, otomotiv endüstrisi için alternatif yeni malzemeler geliştirmek, diğeri ise mevcut kullanılan malzemelerin özelliklerini iyileştirmektir. Yeni geliştirilen malzemelerden birisi de arayer elementlerini eser miktarda içeren IF (Interstitial-Free) çelikleridir. Söz konusu çelikler, üretim sonrası içyapılarında bulunan C, N ve O gibi ara yer atomlarının oranlarının özel teknikler ile (yapıya Ti, Nb gibi stabilize edici elementler katarak) azaltılması ile elde edilmektedir [2]. Bu açıdan bakıldığında, IF-çeliği yeni bir çelik türü olarak değerlendirilebilir. IF-çeliğinin içyapısında arayer elementlerinin çok düşük oranlarda olması söz konusu çeliğin şekillendirilebilirlik ve süneklik özelliklerinin önemli ölçüde iyileşmesine neden olmaktadır [2, 3]. Dolayısıyla bu çeliklerin geliştirilmesindeki temel itici güç yüksek oranda şekillendirilebilirlik ihtiyacı olmuştur. Bu sayede özellikle otomobil ve beyaz eşya sektöründe kullanılan karmaşık şekilli parçalar oda sıcaklığında ve daha yüksek deformasyon oranlarında kolaylıkla şekillendirilebilir hale gelmiştir [4]. Ancak, içyapısındaki arayer atomlarının stabilize edilerek çok düşük oranlara indirilmesi, IF-çeliklerinin mukavemet ve yorulma gibi temel mekanik özelliklerinin de yetersiz mertebelerde kalmasına neden olmaktadır [5]. Çünkü alaşımsız

çeliğe dayanım sağlayan arayer sertleşmesi ve sementit oluşum mekanizmaları söz konusu çelik türünde etkin olarak çalışmamaktadır. Bu durum ise otomotiv sektörü başta olmak üzere bu çelik türünün kullanılabilmesi için de önemli bir problem olarak değerlendirilmektedir. Çünkü otomobil gövdelerinin çarpışmalar esnasında can kaybının önlenmesi açısından yeterli mukavemet ve darbe sönümleme özelliklerine sahip olması gerekmektedir. Bunun sağlanabilmesi için ise otomobil gövde tasarımının ve şekillendirilebilirliğinin yanında gövde malzemelerinin mekanik özellikleri de büyük önem taşımaktadır. Genel olarak yeterli darbe sönümleme özelliğinin elde edilebilmesi için ise üretimde kullanılan malzemelerin hem yüksek mukavemet hem de yeterli sünekliğe sahip olması (yüksek tokluk) gerekmektedir. IF-çeliğinin mükemmel şekillendirilebilirlik ve süneklik özelliklerinin yanında mukavemet değerlerinin yetersiz oluşu, söz konusu malzemeden üretilen otomobillerin yeterli çarpışma direnci sergileyebilmesi için daha kalın IF-çeliği sacların kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu durum ağırlığın artmasına neden olduğu için yakıt tüketimi konusunda da olumsuz bir etki oluşturmaktadır. Bu nedenle IF-çeliğinin mukavemet değerlerinin artırılması söz konusu çeliğin uygulamadaki performansının iyileştirilmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, artan mukavemet değerleri söz konusu çeliklerin mukavemetin ön planda olduğu diğer yapısal parçalar gibi farklı uygulamalarda da kullanılabilirliğini artıracaktır.

IF-çeliğinin tek fazlı ferritik içyapısı göz önünde bulundurulduğunda, bu tür çeliklere uygulanabilecek mukavemet artırma yöntemlerinin de sınırlı olduğu görülmektedir. Nitekim, karbon çelikleri ve/veya alaşımlı çelikler için önemli bir mukavemet artırma yöntemi olan ısıtma işlem teknikleriyle bu çeliklerde mukavemetin artırılma ihtimali yoktur. Ayrıca, boyama esnasında uygulanan ısıtma işlemi ise (bake hardening) bu çeliklerde sınırlı bir mukavemet artışı (%10–15 civarında) sağlamaktadır. Bu nedenle, IF-çeliğine uygulanabilecek başlıca mukavemet artırma yöntemleri olarak tane boyutu ve dislokasyon mukavemetlenmesi yöntemleri ön plana çıkmaktadır [6]. Başka bir deyişle, eğer bu çeliklerde aynı anda hem tane incilmesi hem de aşırı oranda deformasyon birikimi sağlanabilirse istenilen mukavemet artışlarına ulaşılabileceği düşünülmektedir. Bu amaçla uygulanabilecek haddeleme, ekstrüzyon ve dövme gibi geleneksel metal şekillendirme yöntemleri ile malzemelerde sınırlı oranda iyileşmeler elde edilebilmektedir. Ayrıca, bu yöntemlerin uygulanması sonrasında elde edilen ürünlerin boyutlarında ortaya çıkan değişim uygulanabilecek deformasyon oranının da sınırlı kalmasına neden olmaktadır. Bunun yanında, klasik metal şekillendirme yöntemlerinin uygulanması sonrasında

sünekliğin radikal bir şekilde azaldığı da bilinmektedir [1]. Bu durum IF-çeliğinin kullanımında şekillendirilebilirlik özelliklerinin de azalmasına neden olacağı için istenmeyen bir durumdur.

Son yıllarda özellikle metalik malzemelerin tane boyutunu mikron altı mertebelere kadar inceltilecek mekanik özelliklerinin iyileştirilmesini amaçlayan yeni nesil yöntemler geliştirilmiştir. Bunların en önemlilerinden biri ise “aşırı plastik deformasyon (APD)” yöntemleridir. [7-9]. Bu yöntemler, kütleli ve sac formdaki malzemelerin kesit alanlarında önemli bir değişime neden olmadan içyapılarında aşırı oranda plastik deformasyon oluşturularak tane yapısının inceltilmesi esasına göre çalışmaktadırlar [7-9]. Genel olarak, uygulanan yöntem sonrasında malzeme veya parçanın kesit alanında önemli bir azalmanın ortaya çıkmaması nedeniyle bu yöntemler aynı malzemede istenilen deformasyon oranı elde edilinceye kadar ardı ardına uygulanabilmektedir [7-9]. Böylece deformasyona bağlı olarak ortaya çıkan tane incelmesinin devamlılığı sağlanarak, tane boyutu mikron altı mertebelerde olan ultra ince tane (UİT) yapıları kütleli ve sac formda malzemeler üretilmektedir [7-9]. Günümüze kadar geliştirilen aşırı plastik deformasyon yöntemleri arasında; eş kanallı açısız ekstrüzyon/basma (EKAE/B), tekrarlı ekstrüzyon ve basma, yüksek basınç altında burma, kapalı kalıpta tekrarlı dövme, açık kalıpta çoklu izotermal dövme, birikimli bağ haddesi, tekrarlı bükme-doğrultma ve sürtünme-karıştırma işlemleri sayılabilir [10]. Bu yöntemleri gösteren şematik resimler Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Başlıca aşırı plastik deformasyon yöntemleri: (a) Eş kanallı açısız ekstrüzyon/basma (EKAE/B), (b) tekrarlı ekstrüzyon ve basma, (c) yüksek basınç altında burma, (d) kapalı kalıpta dövme, (e) birikimli bağ haddesi, (f) tekrarlı bükme-doğrultma ve (g) sürtünme-karıştırma işlemi (SKİ) [10, 11].

Geliştirilen APD yöntemlerinin uygulama alanı ve getirdiği özellikler açısından her birinin kendine özgü avantaj ve dezavantajları vardır. Ancak, bu yöntemler arasında ilk defa Segal ve arkadaşları [12] tarafından 80'li yıllarda geliştirilen EKAE yöntemi günümüze kadar en çok çalışılan ve diğerlerine göre önemli üstünlükleri bulunan bir yöntem olarak dikkat çekmektedir. Bu üstünlükler arasında, yöntemin basit ve ekonomik oluşu, yöntem ile elde edilen tane boyutu, tane morfolojisi ve kristalografik yönelim gibi içyapısal özelliklerin kolaylıkla kontrol edilebilir olması, mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek boyutta ürünler elde edilebilir olması sayılabilir [13]. Söz konusu yöntemle işlem parametrelerine ve malzemeye bağlı olarak ortalama tane boyutu 200-500nm aralığında olan malzemeler üretilebilmektedir [7-10]. Tane yapısında ortaya çıkan bu incelmeye bağlı olarak malzemenin mekanik özelliklerinde de önemli iyileşmeler gerçekleşmektedir [7-10]. Genel olarak UİT yapıları malzemelerin mukavemeti iri taneli eşlerine kıyasla birkaç kat daha yüksek değerler almaktadır [14, 15]. Elde edilen bu mukavemet artışı süneklik özelliklerinde belli oranda azalmaya neden olmaktadır. Ancak APD yöntemleri ile üretilen UİT yapıları malzemelerin süneklikleri klasik plastik şekil verme yöntemleri sonrasında elde edilen süneklik değerlerine kıyasla oldukça yüksek



olduğu bilinmektedir [15]. Bunun yanında, teknolojik öneme sahip diğer mekanik özelliklerden yorulma dayanımı ve yorulma ömrü, çentik darbe tokluğu ve sünek gevrek geçiş sıcaklığı, şekillendirilebilirlik, aşınma direnci, yüzey modifikasyonu gibi alanlarda da işlem sonrası önemli iyileştirmelerin elde edilebilmektedir. [7-10, 13-15]. UİT yapıları malzemelerin mekanik özelliklerinde görülen bu iyileşmeler göz önünde bulundurulduğunda, IF-çeliğinin mukavemetinin artırılmasında APD yöntemlerinin kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

## **1.2. Eş Kanallı Açısal Ekstrüzyon/Basma (EKAE/B) Yöntemi**

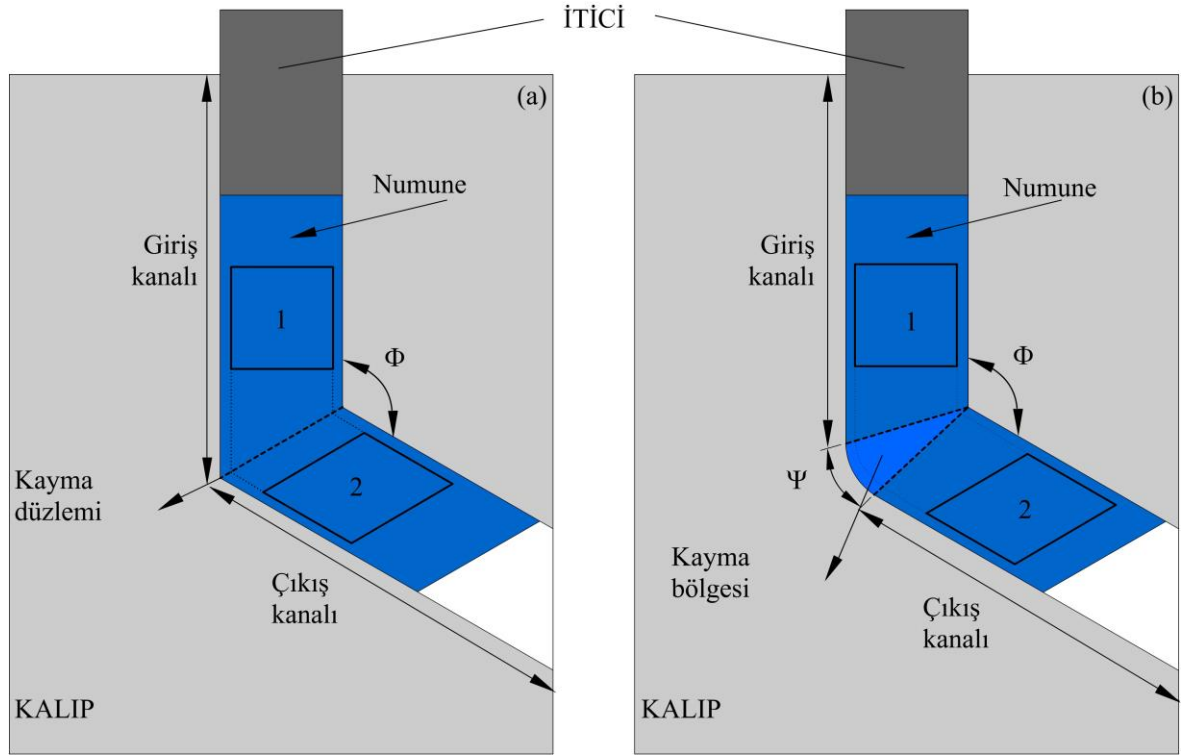
### **1.2.1. Uygulama Prensipleri**

Eş kanallı açısal ekstrüzyon/basma (EKAE/B) yöntemin uygulanışını gösteren şematik resim Şekil 2’de verilmiştir. Bu yöntemde, eşit kesit geometrisine sahip doğrusal iki kanalın aralarında  $\Phi$  kalıp açısı oluşacak biçimde kesişmesinden meydana gelen “L” şekilli kanalın açılması ile elde edilmiş bir kalıp kullanılır [12]. İşlem sırasında kanal ile yaklaşık aynı kesit geometrisine sahip çubuk biçimli numune (bilet) giriş kanalına yerleştirilmektedir. Söz konusu numune, hidrolik bir presin pistonuna bağlı olan ve sabit hızda hareket eden bir itici ile giriş kanalından çıkış kanalına doğru itilmektedir. Bu sırada giriş ve çıkış kanallarının kesiştiği ve kayma düzlemi olarak adlandırılan kritik düzlemde numune basit kayma mekanizması ile plastik deformasyona uğramaktadır. Bu deformasyon sırasında 1 numaralı kübik eleman kayma düzleminde geçerken çıkış kanalında gösterilen 2 numaralı elemana dönüşecek biçimde şekil değiştirmektedir (Şekil 2).

Uygulanan EKAE yönteminde kanal yüzeylerinde sürtünme etkilerinin ihmal edilmesi durumunda numuneye uygulanan deformasyonun kesit boyunca homojen olarak dağıldığı kabul edilmektedir [16]. Ancak uygulamada sürtünme etkisinin göz ardı edilemeyecek kadar yüksek olması numune kesitinde homojen deformasyonun gerçekleşmesini belli oranda engellemektedir [17]. Özellikle numune yüzeyinde oluşan aşırı sürtünme etkisi, yüzey ve yüzeye yakın bölgelerde içyapısal değişimlere ve buna bağlı olarak mekanik özellik değişimlerine neden olabilmektedir [17]. Bu nedenle, EKAE işleminde kullanılan kalıp ve örnek yüzeyleri uygun yağlayıcılar ile yağlanarak oluşabilecek sürtünme etkisi en aza indirilmeye çalışılmaktadır. Öte yandan, son yıllarda

yapılan çalışmalarda gerek numune yüzeyindeki sürtünme etkilerini azaltmak, gerekse EKAE basıncını düşürmek amacıyla hareketli yüzeylere sahip kalıpların kullanılması ön plana çıkmıştır [18].

Deformasyon sertleşmesi davranışı gösteren malzemelere uygulanan EKAE işlemi sırasında keskin köşe geçişine sahip kalıplarda “ölü metal bölgesinin” oluştuğu görülmüştür (Şekil 2(a)) [19]. Bu durum, numunenin kanal yüzeyi ile temasının kesilmesine ve uygulanan şekil değişiminin numunenin kesiti boyunca homojen dağılmamasına neden olmaktadır [19]. Bu problemin görüldüğü durumlarda, kalıbın dış köşesi uygun bir açıda yuvarlatılarak numunenin kanal yüzeyine tam teması sağlanmaktadır. Bu tip bir yuvarlatmanın uygulandığı kalıbının şematik resmi Şekil 2(b)'de gösterilmiştir.



Şekil 2. (a) Keskin köşe geçişine sahip ve (b) dış köşesi yuvarlatılmış EKAE kalıplarının şematik resimleri

EKAE işleminde örneğe uygulanan şekil değişiminin büyüklüğü giriş ve çıkış kanalının kesiştiği bölgenin geometrik parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Kalıp iç köşe açısı ( $\Phi$ ) ve kalıp dış köşe yuvarlatma açısı ( $\Psi$ ) olarak bilinen bu değerlerinin büyüklüğü numuneye her pasoda uygulanan deformasyonun da büyüklüğünü belirlemektedir. Buna göre bir pasoluk EKAE işlemi sırasında numuneye uygulanan açısız

şekil değişimi miktarı aşağıda verilen (1) numaralı denklem ile ifade edilmektedir [20]. Çok pasolu EKAE işlemi sırasında örneğe uygulanan eş değer şekil değişimi miktarı ise (2) numaralı denklem ile belirlenmektedir [20]. Bu denklemde N, örneğe uygulanan toplam paso sayısını göstermektedir.

$$\gamma = 2 \cot\left(\frac{\theta}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \csc\left(\frac{\theta}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \quad (1)$$

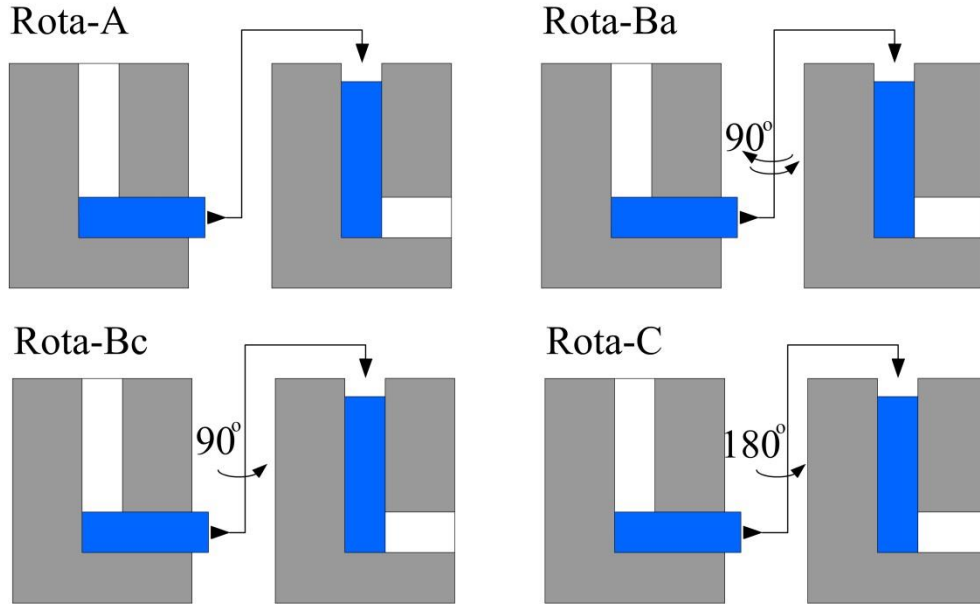
$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[ 2 \cot\left(\frac{\theta}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \csc\left(\frac{\theta}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \right] \quad (2)$$

### 1.2.2. EKAE İşlem Parametreleri

Malzemelere uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen içyapısal, fiziksel ve mekanik özellikler büyük ölçüde kullanılan işlem parametrelerine göre değişiklik göstermektedir. Bu parametreler, işlem sıcaklığı, işlem rotası, paso sayısı, karşı basınç etkisi, deformasyon hızı olarak sıralanabilir.

#### 1.2.2.1. Uygulama Rotası

EKAE rotaları, çok pasolu EKAE işleminde numunenin kalıba yerleştirilmesi sırasında numunenin kalıba giriş pozisyonunun bir öncekine göre değiştirilerek deformasyonun farklı kayma düzlemlerinde sürdürülmesi olarak tanımlanabilir. Numunenin kalıba yerleştirilmesi sırasında döndürülmesi, kalıba ait deformasyon düzleminin önceki pasoda uygulanan deformasyona göre farklı bir düzelmeye ve yönde etki etmesine neden olmaktadır. Bu nedenle elde edilen içyapısal özelliklerde de (tane boyutu, tane morfolojisi, doku oluşumu gibi) uygulanan rotaya bağlı olarak önemli değişiklikler ortaya çıkmaktadır [21]. EKAE işleminde uygulanan dört temel rota ve bu rotaların uygulanış biçimleri Şekil 3'de gösterilmiştir. Rota-A'da numune pasolar arasında sürekli aynı pozisyonda (döndürülmeden) EKAE kalıbına yerleştirilmektedir. Rota-Bc'de numune her paso arasında saat yönüne ters ve hep aynı yönde 90° döndürülerek kalıba yerleştirilmektedir. Rota-C'de numune pasolar arasında saat yönüne ters ve hep aynı yönde 180° döndürülerek kalıba yerleştirilmektedir. Rota-Ba'da ise numune, her paso arasında bir önceki döndürme konumuna ters yönde 90° döndürülerek kalıba yerleştirilmektedir.

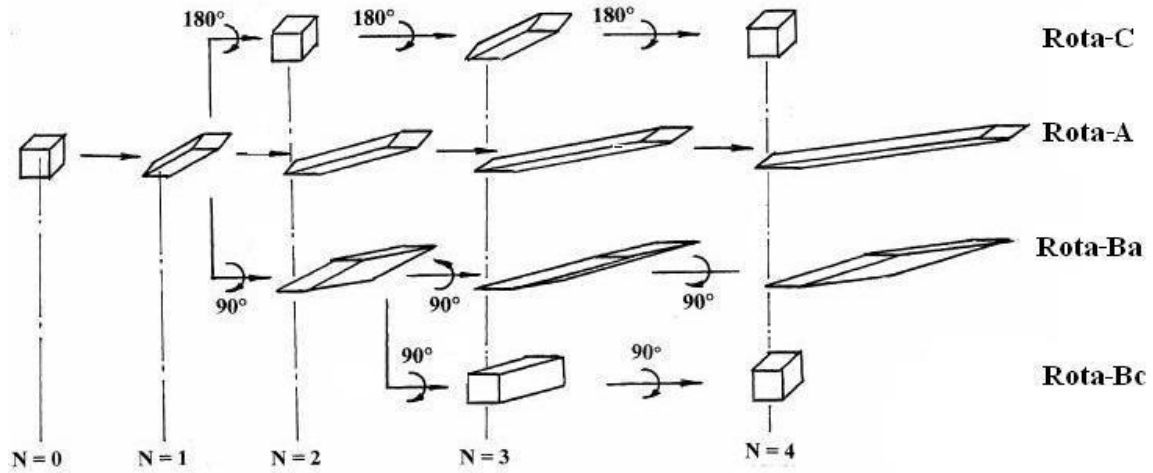


Şekil 3. EKAE işleminde kullanılan temel rotalar ve bunların uygulanış biçimlerini gösteren şematik resimler [15].

EKAE işlemi sonrası elde edilen tane boyutu ve tanelerin morfolojik özellikleri büyük oranda uygulanan rotaya bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle bu rotalarda gerçekleştirilmiş EKAE işlemi sonrasında elde edilen içyapısal değişimler deneysel ve teorik olarak incelenmiştir [22]. EKAE işlemi sonrasında elde edilen tane morfolojisi de işlem sırasında uygulanan EKAE rotasına göre önemli farklılıklar göstermektedir. Şekil 4'de kübik bir elemanın çeşitli rota ve farklı paso sayılarında EKAE işlemi uygulanması sırasında geçirdiği deformasyon evreleri gösterilmiştir. Bu şekilden anlaşılacağı gibi, rota-A ve rota-B<sub>A</sub>'da yapılan EKAE işleminde kübik elemanın çarpılması paso sayısı arttıkça artmakta ve ekstrüzyon yönü ile belli bir açıda uzayarak yönlendirilmiş bir tane morfolojisi elde edilmektedir [23-25]. Rota-B<sub>C</sub> ve rota-C de ise sırasıyla, 2. ve 4. pasoda deformasyon yönü tersine dönmektedir. Bu nedenle kübik eleman belirtilen paso sayılarında deformasyon öncesi sahip olduğu geometriye tekrar dönmektedir [22-25].

Öte yandan, istenilen optimum özellik değişimlerini sağlamak için bu geleneksel rotaların farklı kombinasyonlarda uygulandığı değişik rotalar da mevcuttur. Bunlar içerisinde, sağladığı üstün deformasyon homojenliği ve ürettiği eş-eksenli tane morfolojisi bakımından en çok bilineni ise rota-E'dir. Bu rotada numune ilk pasonun ardından 180°, ikinci paso ile üçüncü paso arasında 90° ve üçüncü paso ile dördüncü paso arasında da 180° döndürülmektedir. Başka bir ifadeyle, söz konusu rotada, numuneler önce rota-C

kullanılarak iki pasoluk işleme tabi tutulmakta, ardından saat yönüne ters  $90^\circ$  döndürülüp tekrar rota-C kullanılarak iki paso sayısında işlem uygulanmaktadır. Bu çevrim istenilen paso sayısına kadar devam ettirilmektedir [23]. Bu bileşik rotasının en önemli avantajı, işlem sırasında uygulanan deformasyonun numune boyu ve kesitindeki dağılımının diğer rotalara göre daha homojen olarak gerçekleşmesidir. Ayrıca bu rotada gerçekleştirilen işlemler sonrasında elde edilen tane morfolojisi ve büyüklüğünün rota-Bc sonrası elde edilen özellikler ile benzerlikler taşıdığı da bilinmektedir.



Şekil 4. EKAE işleminde kübik bir elemanın çeşitli rota ve paso sayılarında geçirdiği deformasyon evrelerini gösteren şematik gösterim [22].

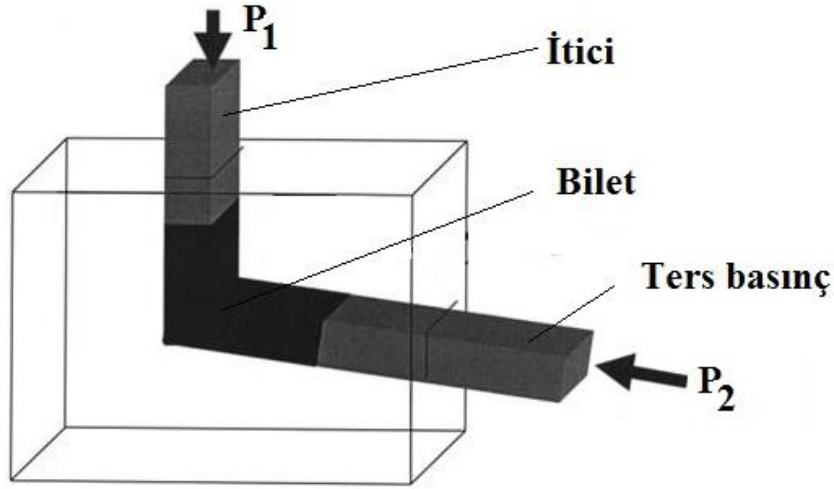
#### 1.2.2.2. İşlem Sıcaklığı

EKAE işleminin gerçekleştirileceği sıcaklığın belirlenmesinde en önemli faktör malzemenin süneklik (şekillendirilebilirlik) özelliğidir. EKAE sıcaklığının belirlenmesindeki temel kıstas ise numune veya parçada işlem sırasında çatlak veya kırılma olmayacak kadar yüksek ancak malzemede hedeflenen özellik değişimlerini etkilemeyecek kadar da düşük sıcaklık değerlerinin seçilmesidir. Bu nedenle, ekstrüzyon sıcaklığı belirlenirken deformasyon sırasında çatlak oluşturmayacak en düşük sıcaklık değeri esas alınmaktadır. Bu değer çok sünek malzemelerde oda sıcaklığı veya bazı özel uygulamalarda bu değer altında olurken, süneklik azaldıkça gerekli sıcaklık değeri de artmaktadır [24]. Öte yandan, EKAE işleminin sıcak deformasyon bölgesinde gerçekleştirilmesi, işlem sırasında malzemede toparlanma, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi gibi etkilerin de ortaya çıkmasına ve deformasyonla sağlanan iyileşmelerin

ortadan kalkmasına neden olmaktadır [25]. Nitekim saf Al ve alaşımlarının içyapı özelliklerine işlem sıcaklığının etkilerinin incelendiği bir çalışmada, artan deformasyon sıcaklığı ile birlikte tane boyutunda da büyüme ortaya çıktığı görülmüştür. [25, 26]. Bu durum ise özellikle aşırı plastik deformasyon sırasında dinamik yeniden kristalleşmenin daha etkin bir şekilde gerçekleştiğine işaret etmektedir [27-29]. Bununla birlikte, nispeten yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen işlem sonrası elde edilen tane morfolojisinin ise eş-eksenli karakterde ortaya çıktığı bilinmektedir. Ayrıca, sıcaklık artışıyla birlikte EKAE işlemi sırasında ortaya çıkan kristalografik yönelim gibi anizotropik etkilerin de azaldığı belirtilmektedir [25, 26, 30].

### 1.2.2.3. Ters Basınç

Sünekliği düşük veya gevrek karakterli malzemelerin EKAE işlemi sırasında, uygulanan aşırı oranda plastik deformasyon nedeniyle mikro ve/veya makro ölçekte çatlaklar oluşabilmektedir. Bu durumun önlenmesi için ise deformasyon sıcaklığının daha da artırılması gerekmektedir. Bu ise tane incelleme mekanizmasının etkinliğini de azaltmaktadır. Bu nedenle, EKAE işlemi sırasında oluşabilecek çatlakların önlenmesi veya azaltılması için kalıp çıkış kanalından numunenin hareketine ters yönde bir basınç uygulanması fikri geliştirilmiştir [31]. Bu sayede daha homojen, çatlaksız ve daha ince taneli içyapıların nispeten daha düşük sıcaklıklarda elde edilmesi hedeflenmiştir [32]. EKAE işleminde ters basıncın uygulanması Şekil 5’de şematik olarak gösterilmiştir. Ters basınç uygulayarak yapılan EKAE işlemlerinde, çatlak oluşumunun azaldığı ve bazı malzemelere daha düşük sıcaklıklarında bile EKAE işlemi uygulanabildiği gözlenmiştir. Örneğin Mg alaşımı (AZ31) üzerine yapılan bir çalışmada, çatlaksız numune üretimi için gerekli işlem sıcaklığı 200°C [33] olarak belirlenirken, ters basınç uygulamak suretiyle bu değer 100°C’ye kadar düşürülebilmştir [34]. Yapılan başka bir çalışmada ise AA 6016 alaşımına ters basınç uygulanarak gerçekleştirilen EKAE işlemi sonrasında yaklaşık 320 nm olarak elde edilen ortalama tane boyutunun, ters basınç uygulanması ile yaklaşık 200 nm değerine kadar düşürülebildiği görülmüştür [35].



Şekil 5. EKAE işleminde ters basınç uygulamasını gösteren şematik resim

### 1.2.3. EKAE İşleminin İyapısal Özellikler Üzerine Etkisi

İri tane yapısına sahip geleneksel bir mühendislik malzemesinin aşırı oranda deformasyona maruz bırakılması durumunda elde edilen iç iyapının genel olarak dislokasyonlar tarafından oluşturulan sınırlar içerdiği bilinmektedir [36-39]. Bu sınırlar, deformasyon sırasında ortaya çıkan dislokasyonların tane iç enerjisinin azaltılması için poligonal olarak sıralanmaları sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu sınırlar, ayırdığı bölgeler arasındaki kristalografik yönelimin farkına göre sınıflandırılmaktadır. Buna göre, söz konusu sınırların ayırdıkları bölgeler arasındaki kristalografik yönelim farkının  $15^\circ$ 'den büyük olması durumunda geniş açılı tane sınırı (GATS), daha küçük olması durumunda ise dar açılı tane sınırı (DATS) terimleri kullanılmaktadır [36]. Eş kanallı açılal ekstrüzyon yöntemi ile üretilen UİT yapıllı malzemelerin iyapısında her iki tipten sınırlarla ayrılmış taneler mevcuttur [40]. Ancak, bunların iyapıdaki oranlarının deformasyon rotasına ve uygulanan deformasyon miktarına göre değişim gösterdiği bilinmektedir [40].

Bir paso sayısında uygulanan EKAE işleminde ortaya çıkan tane incelme mekanizması saf bakır temel alınarak detaylı bir şekilde incelenmiştir [41]. Bu çalışmada, EKAE kalıbında deformasyon düzleminde geçen malzemenin iyapısal özelliklerinde meydana gelen değişiklikler geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ile incelenerek Şekil 6'da verilen tane incelme mekanizması ortaya konulmuştur. Buna göre, deformasyon öncesinde (Şekil 6(a)) iri taneli durumda olan başlangıç malzemesinin,

kalıbın deformasyon bölgesine girdiği sırada dislokasyon yoğunluğunda artış ortaya çıkmaktadır. Deformasyon sırasında üretilen dislokasyonlar iç enerjinin azaltılması amacıyla tercihli olarak sıralanarak alt taneleri oluşturmaktadırlar (Şekil 6(b)) [41]. Bu aşamada tane sınırlarında önemli bir çarpılma ya da yönelim farkı ortaya çıkmazken, numune veya numunenin dislokasyon düzleminden geçişi sırasında hem tane sınırlarında hem de dislokasyon hücrelerinde önemli oranda yönlenme gerçekleşmektedir. Tane sınırlarındaki yönlenme genel olarak kalıbın deformasyon düzleminden etkilenmektedir. Tane içerisindeki alt taneler ise buldukları tanelerin deformasyon öncesinde sahip olduğu kristalografik yönelim dahilinde aktif durumda olan kayma düzlemine göre yönlenmektedirler. Nitekim Şekil 6(c) de görülen tanelerden birindeki kayma sistemine ait kayma doğrultusu kalıp açısına daha yakınken, diğerinde önemli oranda farklılık göstermektedir. Öte yandan, her iki tanede de tane sınırları deformasyon düzlemine göre yönelim sergilerken, alt taneler kolay kayma doğrultusunda yönlenmektedir (Şekil 6(d)). Bununla beraber kolay kayma doğrultusu, deformasyon düzleminden farklı konumda bulunan tanelerin deformasyonu sırasında, ikincil kayma sistemlerinin de aktive olmasını sağlayacak mikro deformasyon bantlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Söz konusu mikro deformasyon bantlarının kayma düzlemi yönünde oluştuğu görülmektedir (Şekil 6(d)). Bu durum söz konusu tanelerin kayma düzlemine göre deformasyonu kolaylaşmaktadır. [41].

Uygulanan bir pasoluk EKAE işlemi sonrasında içyapıda oluşturulan alt tane sınırları arasındaki açılal fark düşük olup, oluşan alt taneler genellikle dar açılı tane sınırlarıyla (DATS) birbirinden ayrılmaktadır. Uygulanan paso sayısının ve dolayısıyla uygulanan deformasyon miktarının artırılmasıyla alt taneler arasındaki açılal yönelimde de artış olmaktadır. Böylece, içyapıdaki sınırlar büyük oranda geniş açılı tane sınırı (GATS) karakterine bürünmektedir [42, 43]. DATS-GATS dönüşüm hızına ve buna bağlı olarak elde edilen tane boyutuna iki önemli parametre etki etmektedir. Bunlardan birincisi EKAE işlemi uygulanan malzemenin sahip olduğu toplam kayma sistem sayısı, ikincisi ise uygulanan EKAE rotasıdır. EKAE işleminin uygulandığı malzemenin kayma sistem sayısının fazla olması, ilk paso sonrasında ikincil olarak aktive edilen kayma sistemlerinin de deformasyona katkı sağlamasını ve buna bağlı olarak da alt tane sınırları arasındaki açılal yönelim farkının artmasını sağlamaktadır [38, 44]. Ayrıca EKAE işlemi sırasında işlem rotalarına bağlı olarak elde edilen tane incelleme hızı da farklılık göstermektedir. Numunelerin pasolar arasında aynı yönde 90° döndürülmesi ile uygulanan rota-Bc, kalıba ait deformasyon düzleminin numunenin farklı düzlemlerine etki ettirmesi nedeniyle

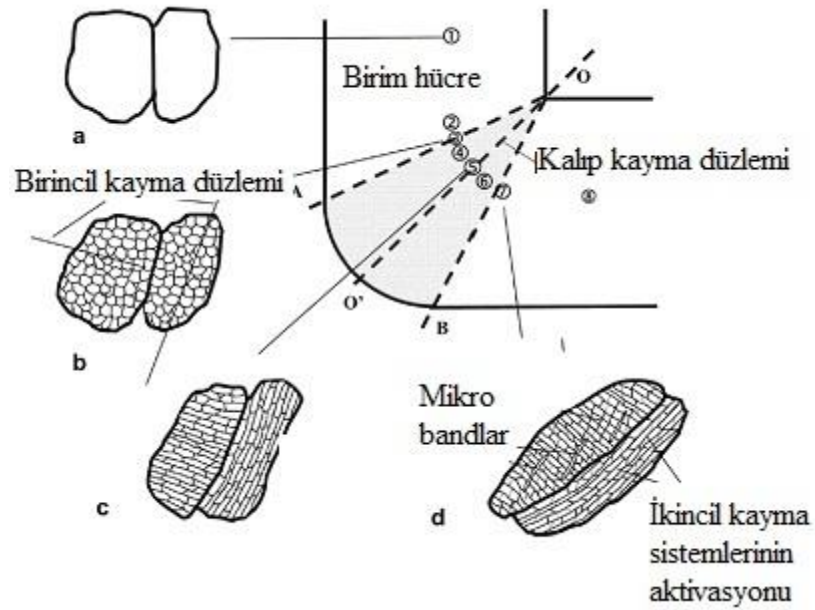


dislokasyon sınırları arasındaki açılmal yönelim farkını daha etkin bir şekilde arttırmaktadır (Şekil 4). Buna bağılı olarak, söz konusu uygulama rotasındaki tane incelleme hızı diğere uygulama rotalarına kıyasla daha yüksek olmaktadır. Ancak, rota-C'nin birbirini takip eden pasolar arasında deformasyon yönünü tersine çevirmesi nedeniyle tane incelleme hızı diğere rotalara göre nispeten daha düşüktür [38].

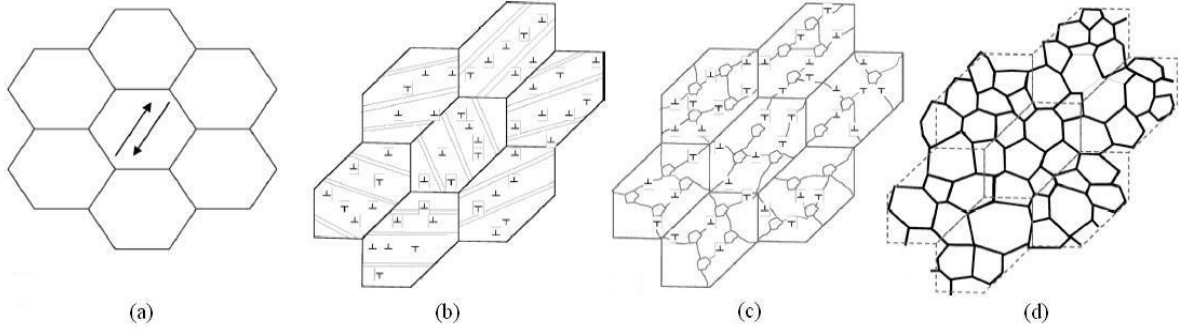
Çok pasolu EKAE işleminin sırasında tane incelleme mekanizmasını inceleyen araştırmacılar, kayma sistemi sayısının fazla olması nedeniyle yüzey merkezli kübik (YMK) kafes yapısına sahip Cu [41], Al [43] ve bunların alaşımlarının üzerinde daha çok durmuşlardır. Diğere kristal kafes yapılarına sahip malzemelere uygulanan EKAE işleminin sonrasında ortaya çıkan tane incelleme mekanizması hakkında ise sınırlı sayıda araştırma yapılmıştır. Bu araştırmaların birinde sıkı düzenli hegzagonal (SDH) yapılı magnezyum ele alınmıştır [44]. SDH yapıda deformasyonun gerçekleşebileceği sınırlı sayıda kayma sisteminin olması, EKAE işleminin yüksek sıcaklıklarda uygulanmasını gerekli kılmaktadır. Bu nedenle, dinamik toparlanma ve yeniden kristalleşme de tane incelleme mekanizması dahilinde değerlendirilmektedir. Bunun yanında SDH yapılı malzemelerin kayma sistemi sayısı sınırlı olduğundan, EKAE işleminin sırasında ikizlenme mekanizmasının da etkin rol oynadığı bilinmektedir. SDH yapılı magnezyuma uygulanan EKAE işleminin başlangıçta içyapıda düzensiz dislokasyon üretimine neden olmaktadır (Şekil 7(b)). Böylece hem alt tane oluşturmak için gerekli olan dislokasyonlar biriktirilmekte, hem de tane içi bölgenin enerjisi artmaktadır. Bu aşamada, artan iç enerjiye bağılı olarak deformasyona uğrayan tanelerin toparlanma ve yeniden kristalleşmesi için gereken itici kuvvet de oluşmaktadır. Deformasyonun yüksek sıcaklıklarda uygulanıyor olması ve toparlanma ile yeniden kristalleşme için gerekli sürücü kuvvetin içyapıda biriktirilmiş olması nedeniyle, hem dislokasyonların alt tane oluşturacak biçimde yeniden düzenlenmesi hem de dislokasyon içermeyen yeni tanelerin çekirdeklenmesi daha kolay gerçekleşmektedir (Şekil 7(c)). Bu aşamada dislokasyonların oluşturduğu sınırlar DATS karakterindedir. Ancak, EKAE işleminin uygulandığı yüksek sıcaklık bir taraftan da yeniden çekirdeklenmiş tanelerde irileşmeye neden olmaktadır. Bu irileşme sırasında DATS büyük oranda GATS karakterine dönüşmektedir. Bu dönüşüm, yapıdaki çekirdeklenmemiş kasımlarda bulunan dislokasyonların, çekirdeklenerek genişlemekte olan tane sınırlarına katılımı ile gerçekleşmektedir. Bu sayede, başlangıç duruma göre daha ince ve eş-eksenli tanelerden meydana gelen bir yapı ortaya çıkmaktadır (Şekil 7(d)).

Paso sayısının artırılması durumunda ise bu mekanizma yeniden işleyerek tanelerin daha da incelmeye neden olmaktadır [44].

İçyapıda ikincil fazların bulunması durumunda tane inceme mekanizmasının daha etkin olarak çalıştığı bilinmektedir [39]. İçyapıdaki ikincil fazların çevresinde oluşan deformasyon bölgeleri keskin yönelme farkına neden olmakta ve bu fark taneler arasındaki paralelliği bozup, yapının daha düşük deformasyon miktarlarında da incelmeye sağlamaktadır [39].



Şekil 6. YMK yapıları bakıra uygulanan EKAE işlemi sırasında ortaya çıkan tane inceme mekanizmasını gösteren şematik resim: (a) EKAE öncesindeki nispeten eş-eksenli ve iri taneli içyapı, (b) tanelerin deformasyon bölgesine girişinde tane içi bölgelerde oluşan dislokasyon ağı, (c) dislokasyon ağının tanenin birincil kayma sistemine göre yönelmesi ve (d) ikincil kayma sistemlerinin aktive olması [41].



Şekil 7. SDH yapılı Mg'un EKAE işlemi ile tane boyutunun nasıl incelendiğini gösteren model: (a) EKAE uygulanmamış ilk durum, (b) içyapıda düzensiz dislokasyon oluşumu ve iç enerjinin artması, (c) yüksek EKAE sıcaklığı nedeniyle ve artan iç enerji ile birlikte dislokasyonların alt tane oluşturacak biçimde yeniden düzenlenmesi ve dislokasyon içermeyen yeni tanelerin çekirdeklenmesi, (d) belli oranda yeniden kristalleşme ile yeni çekirdeklenmiş tanelerin irileşmesi ile oluşan eş-eksenli taneler [44].

#### 1.2.4. EKAE İşleminin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi

##### 1.2.4.1. Mukavemet ve Süneklik

Metallere klasik yöntemlerle uygulanan soğuk şekil verme işlemleri sırasında meydana gelen pekleşme mekanizmasıyla sertlik ve mukavemet değerleri artırılmaktadır [7-9]. Ancak bu artış, süneklik ve tokluk değerlerinde çok yüksek oranlarda düşmeyi de beraberinde getirmektedir [45]. Ayrıca, klasik yöntemlerde uygulanan deformasyon boyutsal değişim esasına dayanmakta ve bu yüzden elde edilebilecek mukavemet artışları da sınırlı kalmaktadır. Öte yandan, yapılan deneysel çalışmalar, EKAE işlemi sonrası bazı malzemelerde sertlik, mukavemet ve süneklik artışlarının boyutsal değişim olmadan beraber oluşturulabileceğini göstermiştir. Bu durum, özellikle gevrek yapılı dökülmüş durumdaki Mg-esaslı [33, 46] ve Zn-esaslı [47-52] alaşımlar içinde deneysel olarak gözlenmiştir. Mg esaslı alaşımlarda uygulanan EKAE işlemi sonrasında deformasyon düzleminde elde edilen kuvvetli kristalografik yönlenme nedeniyle süneklik özellikleri artmıştır [33, 53]. Ancak bu durum mekanik özelliklerin önemli oranda yöne bağımlılık göstermesine ve söz konusu yönlerin dışında yetersiz süneklik özelliği görülmesine neden olmuştur. [33, 53]. Ayrıca Zn-Al esaslı alaşımlara uygulanan EKAE işlemi sonrasında, mukavemet değerleri artırılarak veya fazla düşürülmeden süneklik özellikleri önemli oranda arttırılabilmektedir [47-52]. Söz konusu alaşımların nispeten yüksek sıcaklıklarda uygulanan EKAE işlemi sonrasında ise dendritik

döküm yapısı ve bu yapının neden olduğu mikro yapısal düzensizlikler deformasyon ile birlikte büyük oranda ortadan kalkmış ve daha ince taneli ve homojen bir içyapının oluşması sağlanmıştır. Böylece mukavemet artışıyla birlikte süneklik özellikleri de büyük oranda iyileştirilmiştir.

Öte yandan Al [54], Ni [55] ve Cu [56, 57] gibi YMK, Fe [58] ve Ta [59] gibi HMK ve Ti (GR-2) [60] gibi SDH yapıları saf metaller ile alaşımlarına uygulanan EKAE işleminin, bu malzemelerin mukavemet artışının süneklikteki azalma ile birlikte gerçekleştiği görülmüştür. Ancak EKAE işlemi sonrasında elde edilen süneklik değerlerinin, haddeleme, dövme ekstrüzyon gibi klasik metal şekillendirme yöntemleri sonrasında elde edilen değerlere kıyasla daha yüksek olduğu da tespit edilmiştir. Bu durum, klasik metal şekil verme yöntemleri ile karşılaştırıldığında EKAE sırasında yapıda biriktirilen dislokasyonların oluşturduğu alt tanelerin daha çok GATS karakterinde olmasından kaynaklanmaktadır [41, 42, 61-63].

EKAE işlemi sonrasında mukavemet değerlerinde görülen artış genel olarak, tane incelmeye ve yapıdaki dislokasyon yoğunluğunun artmasına dayandırılarak açıklanmaktadır [64, 65]. EKAE sonrasında elde edilen GATS ve DATS ile birbirinden ayrılan alt tanelerin bu artışa katkı sağladığı ortaya konulmuştur. Ayrıca bu çalışmalarda elde edilen bu etkinin aşağıda verilen geliştirilmiş Hall-Petch denklemi (3) ile ifade edilebileceği de gösterilmiştir.

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_{LAGBs} + \sigma_{HAGBs} = \sigma_0 + M\alpha Gb \left[ \sqrt{\frac{1.5S_V \theta}{b}} \right] + \left[ \frac{k_{HP}}{\sqrt{d}} \right] \quad (3)$$

Bu denklemde: M; Taylor faktörünü,  $\alpha$ ; bir sabiti, G; kayma modülünü, b; burgers vektörünü,  $S_V$ ; birim hacim başına düşen tane sınırı alanı oranını,  $\theta$ ; taneler arasındaki açısal yönelim farkını,  $k_{HP}$ ; Hall-Petch denklemindeki eğimi göstermektedir.

YMK ve HMK yapıları malzemelerin EKAE sonrasında süneklik özelliklerindeki azalma daha çok ikincil deformasyonlar sırasında oluşabilecek pekleşme kabiliyetinin azalmasına dayandırılmaktadır. Nitekim, ortalama tane boyutunun azalmasına bağlı olarak dislokasyonların hareket edebileceği serbest yolun azalması ve deformasyona bağlı olarak oluşturulan GATS'larının dislokasyonları yutan/nötrleştiren bir etki sergilemesi nedeniyle dislokasyon etkileşiminin azalması bu sonucu doğurmaktadır. Azalan pekleşme kabiliyeti nedeniyle EKAE uygulanmış malzemeler akma dayanımından sonra önemli bir uzama

göstermeden çekme dayanımı noktasına ulaştıkları gözlenmektedir. Ardından, deformasyon lokalizasyonu nedeniyle numuneler boyun vererek kırılmaktadır. Bu durum temelde hem üniform uzamayı hem de kopma uzamasını azaltmaktadır [8, 63, 66-69]. EKAE sonrasında pek çok malzeme grubunda ortaya çıkan yetersiz süneklik özellikleri, uygulama açısından bir dezavantaj olarak görülmektedir. Bu durumun ortadan kaldırılması için EKAE sonrası tavlama işlemleri uygulanarak mukavemet değerlerinin bir miktar düşürülüp süneklik özelliklerinin ise iyileştirilmesi fikri ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar, içyapıda nispeten iri ve ince tanelerin bir arada bulundurulmasının, arzu edilen yüksek mukavemet ve yeterli sünekliği ortaya çıkarabileceğini göstermiştir. Bunun için ise malzemeye göre uygun tavlama prosedürlerinin geliştirilmesi gerekmektedir [63, 66, 69].

#### **1.2.4.2. Yorulma**

Malzemelerin yorulma davranışları üzerinde EKAE işleminin etkileri son yıllarda yoğun bir şekilde araştırılmaktadır [70]. Malzemelerin EKAE işlemi sonrası geliştirilen mekanik özellikleri ile çatlak oluşturma ve ilerleme dirençleri, buna bağlı olarak da yorulma dayanımlarının da artması beklenmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar, EKAE işlemi sonrası malzemelerin yorulma davranışlarının, yorulma işleminin düşük çevrimli ya da yüksek çevrimli olma durumuna bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur [70]. Yüksek çevrimli yorulma deneylerinde, Ti [71], Cu [72] ve Ni-esaslı alaşımlar [73] ile Al-Mg [74] alaşımlarının EKAE işlemi sonrasında yorulma dayanımı ve yorulma ömrünün arttığı görülmüştür. Ancak, Cu [71] ve Al-Mg [74] alaşımının EKAE işlemi sonrasında düşük çevrimli yorulma deneylerinde yorulma ömrünün azaldığı tespit edilmiştir. Öte yandan, EKAE işlemi sonrasında tane büyümesine neden olmayacak sıcaklıklarda kısa süreli olarak uygulanan ısıtma işlemi ile düşük çevrimli yorulma ömrünün ısıtma işlemi uygulanmamış duruma göre arttığı görülmüştür. Bu davranış, uygulanan ısıtma işlemi ile dislokasyonların hareket serbestliklerinin artması ve böylece yapıdaki deformasyon lokalizasyonu davranışının azalmasına dayandırılarak açıklanmaktadır [70].

EKAE işleminin yorulma davranışlarına olan etkileri genellikle bakır model alınarak açıklanmaya çalışılmış, ancak EKAE sonrasında yorulma davranışını belirleyen içyapısal özellikler tam olarak ortaya konulamamıştır. Bu nedenle hem yorulma mekanizmasının daha iyi anlaşılması hem de diğer malzemelerin EKAE sonrası yorulma davranışının

belirlenebilmesine yönelik çalışmalar artarak devam etmektedir [70]. Bu çalışmaların birinde ise çeşitli şartlarda EKAE işlemi uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin yorulma özellikleri incelenmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar, EKAE işleminin IF-çeliğinin mekanik özelliklerine olan etkilerinin anlatıldığı bölümde ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

#### **1.2.4.3. Tokluk**

EKAE yönteminin malzemelerin darbe tokluğu üzerine etkisini inceleyen çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Yapılan sınırlı sayıda çalışmada; dökülmüş durumdaki Zn-Al ve Al-Si alaşımlarına uygulanan EKAE işleminin söz konusu alaşımların oda sıcaklığındaki çentik darbe dayanımına olan etkileri incelenmiştir. Bu çalışmalar, uygulanan çok-pasolu EKAE işleminin söz konusu alaşımların darbe tokluğunu işlem öncesi duruma göre önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Al-Si alaşımlarında görülen bu artış, alaşımın dendritik karakterli döküm yapısının EKAE sonrası kaybolmasına ve içyapıdaki iğnemsî Si parçacıklarının kırılıp incelenerek yapıda daha homojen dağılmasına dayandırılarak açıklanmıştır [47, 49, 50, 74, 75]. Benzer şekilde, Zn-Al esaslı döküm alaşımlarının çentik darbe tokluğu uygulanan EKAE işlemi sonrasında önemli oranda artış göstermiştir. Bu artış, dendritik yapının parçalanarak ortadan kalkması ve katılaşma sırasında ortaya çıkan faz dengesizliklerinin ılık deformasyon bölgesinde uygulanan EKAE sonrası ortadan kalkmasına dayandırılarak açıklanmıştır [47, 49, 50, 74, 75].

EKAE uygulanmış durumdaki alüminyum esaslı AA6060 alaşımına uygulanan çentik darbe deneyi sırasında elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin incelendiği bir çalışmada, UİT yapıları AA6060 alaşımının EKAE öncesi duruma göre mukavemetinde önemli oranda iyileşme elde edilmiştir [76]. Bu iyileşmeye paralel olarak söz konusu alaşımda çatlak oluşturmak için gerekli yük değerinin de arttığı ve dolayısıyla kırılma sırasında soğrulan enerji miktarının yükseldiği görülmüştür. Ancak bu durumun bütün malzeme gruplarında geçerli olduğu söylenemez. Nitekim, UİT yapıları durumdaki IF-çeliğinin homojen deformasyon bölgesinin çok dar olması nedeniyle çatlak ilerlemesi sırasında soğurduğu enerjinin EKAE öncesi duruma göre azaldığı tespit edilmiştir [76]

Stolyarov ve arkadaşları [77] tarafından ticari saflıktaki Ti üzerine yapılan bir çalışmada ise EKAE işlemi ile beraber uygulanan haddeme işleminin söz konusu malzemenin tokluk değerlerini EKAE işlemi öncesi duruma göre artırdığı belirlenmiştir.

Ayrıca, klasik malzemelerin aksine UİT yapıları titanyumun çentik darbe tokluğunun azalan sıcaklık değerleriyle arttığı gözlenmiştir.

%0,2 C içeren alaşımsız bir çeliğe uygulanan aşırı plastik deformasyon ve sonuçta meydana gelen ultra ince tane yapısının söz konusu çeliğin sünek-gevrek geçiş sıcaklığını düşürdüğü görülmüştür [78]. Öte yandan, bu işlem sonrası söz konusu çeliğin sünek ve gevrek kırılma bölgelerindeki kırılma enerjisi değerlerini büyük etkilediği de belirlenmiştir. Nitekim azalan tane boyutu ile birlikte sünek kırılma bölgesindeki kırılma tokluğunda genel olarak azaldığı, ancak gevrek kırılma bölgesinde ise arttığı ortaya konulmuştur [78].

#### 1.2.4.4. Şekillendirilebilirlik

EKAE işlemi sonrasında UİT yapıları hale getirilen malzemelerin mekanik özelliklerinde genel olarak elde edilen iyileşmeler pek çok uygulama için önemli avantajlar sağlamaktadır. Ancak UİT yapıları malzemelerin mühendislik uygulamalarında kullanılması için dövülebilirlik ve derin çekilebilirlik gibi şekillendirilebilirlik özelliklerinin de bilinmesi gerekmektedir. Literatürel birikime bakıldığında, bu kapsamda sınırlı sayıda çalışmanın yapıldığı göze çarpmaktadır. Yanagida ve arkadaşları [79] tarafından yapılan bir çalışmada, farklı oranlarda karbon içeren çeliklere uygulanan EKAE işlemi sonrasındaki dövülebilirlik özelliklerinin haddeleme gibi metal şekil verme yöntemlerine kıyasla daha iyi olduğu anlaşılmıştır. Son yıllarda klasik şekil verme yöntemlerinin daha küçük ölçeklerde uygulanması ile boyutları birkaç milimetreyi geçmeyen parçaların üretimine dönük olarak kullanılan mikro-şekil verme yöntemlerinde, UİT yapıları malzemelerin iri taneli olanlara göre daha iyi bir performans sergilediği anlaşılmıştır [80]. Özellikle EKAE sonrasında elde edilen UİT yapısı, mikro-şekil verme yöntemleri ile elde edilen parçaların boyutlarının daha hassas ve yüzey pürüzlülüğünün daha düşük seviyelerde kalmasına neden olmuştur [81].

Farklı türden aşırı plastik deformasyon yöntemleri ile üretilen UİT yapıları malzemelerin derin çekilebilirliğinin genel olarak iri taneli olanlarına göre daha düşük olduğu görülmüştür [82-86]. Bu durum temelde aşırı plastik deformasyon yöntemleri sonrasında süneklik özelliklerindeki azalmadan kaynaklanmaktadır. Nitekim EKAE işlemi uygulanmış durumdaki bakırın derin çekilebilirliğinin araştırıldığı bir çalışmada [85], genel olarak şekillendirilebilirliğin olumsuz yönde etkilendiği ve derin çekme kuvvetinin ise arttığı görülmüştür. Şekillendirme için gerekli kuvvetteki artışın ise EKAE sonrası artan

mukavemetten kaynaklandığı vurgulanmıştır. Benzer sonuçlar farklı aşırı plastik deformasyon yöntemleri ile UİT yapıya hale getirilen saf alüminyum [82] ve alüminyum alaşımları [82-84] ile az karbonlu çelikler [86] için de elde edilmiştir.

#### 1.2.4.5. Süperplastik Etki

EKAE yöntemiyle üretilen UİT yapıya malzemelerin süperplastik davranışlarının nasıl değiştiği konusunda yoğun çalışmalar devam etmektedir. Klasik bir malzemenin süperplastik deformasyon özelliği gösterebilmesi için temelde iki önemli şartın yerine gelmesi gerekmektedir. Bunlardan birincisi malzemenin tane boyutunun çok küçük olması (10 µm'nin altında), diğeri ise difüzyonun deformasyon sırasında etkin rol oynayabileceği düşük deformasyon hızı ve yüksek sıcaklık şartlarının sağlanmış olmasıdır. EKAE sonrası malzemelerin tane boyutunun küçülerek UİT yapısının oluşması malzemelerin süperplastik özelliklerini mevcut duruma göre daha da iyileştirmektedir [9]. Öte yandan, söz konusu malzemelerin aşırı plastik deformasyon uygulanmış durumdaki içyapıları kararlı durumda değildir. Bu nedenle, bu şartlardaki bir içyapıyla nispeten daha yüksek hızlarda da plastik deformasyon yeteneği korunabilmektedir [67]. Ayrıca, aşırı oranda incelmış tane boyutu sayesinde daha düşük sıcaklıklarda da süperplastik özellikler elde edilebilmektedir [9]. Bu durum, aşırı oranda incelen tane yapısının, normalde yüksek sıcaklıklarda etkin olan tane sınırı kayması ve tane dönmesi gibi deformasyon mekanizmalarının nispeten daha düşük sıcaklıklarda da etkinliğini korumasına dayandırılmaktadır [67]. Yapılan çalışmalar, klasik deformasyon hızlarında ( $10^{-3}$ – $10^{-2}$  s<sup>-1</sup>) 20-30 dk arasında süren bir süperplastik şekil verme işleminin EKAE işlemi ile üretilen UİT yapıya bir malzemede 1 dakikada tamamlanabileceğini göstermektedir [87]. Nitekim, EKAE işlemi sonrası  $3,3 \times 10^{-2}$  s<sup>-1</sup> deformasyon hızında ve 200°C sıcaklıkta çekme deneyine tabi tutulmuş Zn–22%Al süperplastik alaşımı % 1970'e ulaşan oranda bir uzama göstermiştir [88]. Bu alanda literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında, özellikle EKAE işlemi sonrası alüminyum alaşımı [89], magnezyum alaşımı [24, 90], bakır alaşımı [91, 92] ve nikel alaşımı [67] gibi pek çok malzemenin süperplastik davranışının incelendiği görülmektedir. Çalışılan tüm alaşımlarda, iri taneli yapıya olanlara göre genel olarak daha yüksek deformasyon hızlarında ve daha düşük sıcaklıklarda süperplastik davranışlar gözlemlenmiştir. Son yıllarda özellikle oda sıcaklığında ve yüksek deformasyon hızlarında



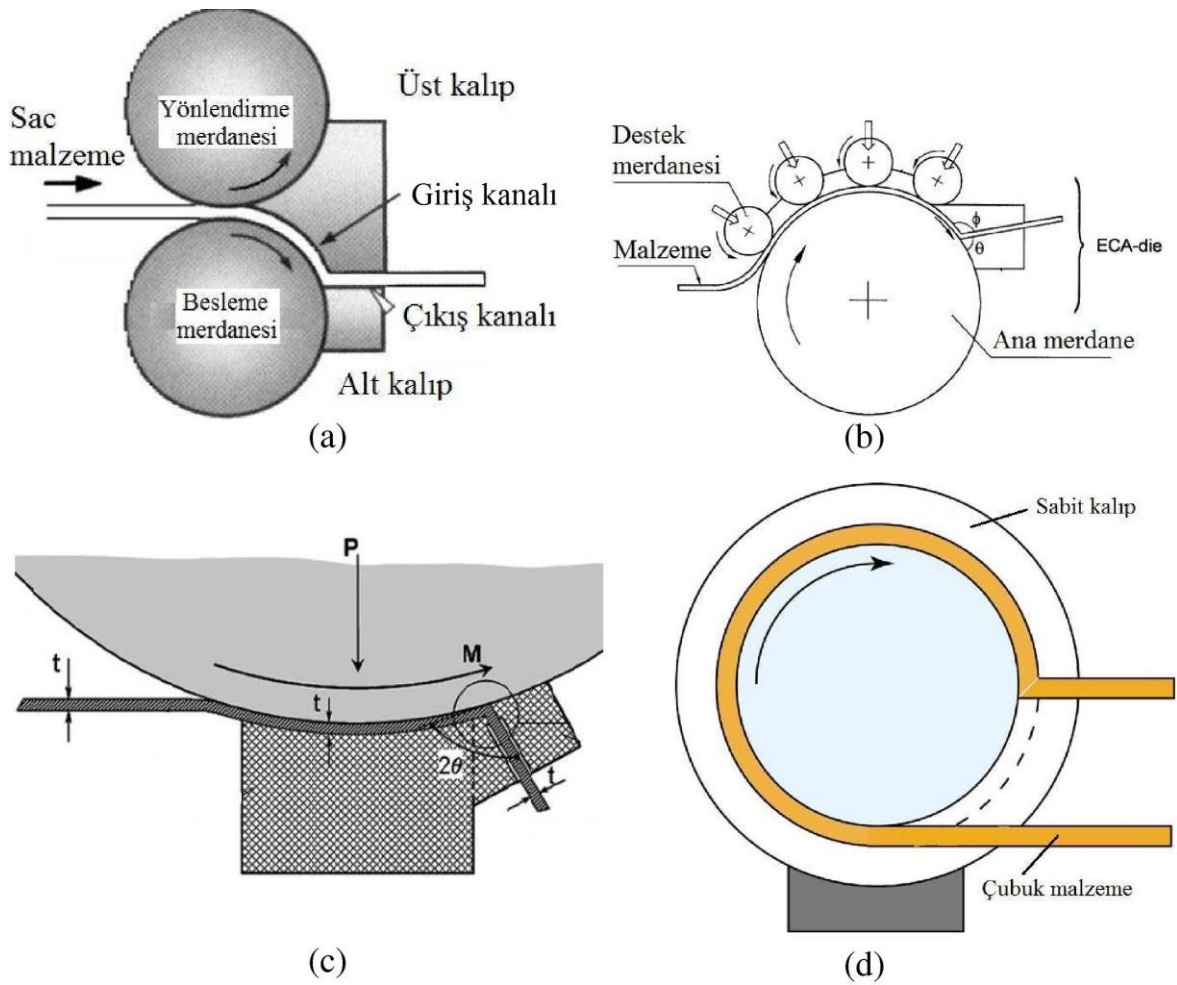
da belli oranda süperplastik davranışın elde edilebilmesi için aşırı plastik deformasyona dayalı oluşturulan UİT'li içyapılar üzerine yoğun çalışmalar yürütülmektedir.

### 1.2.5. EKAE Yönteminin Endüstriyel Uygulanabilirliği

EKAE yöntemi üzerine yapılan çalışmalar daha çok akademik çevreler tarafından araştırma laboratuvarlarında yürütülmektedir. Ancak son zamanlarda bu yöntem endüstriyel uygulayıcıların da dikkatini çekmiş ve bu alanda yatırımlar yapılmaya başlanmıştır. EKAE işlemine tabi tutulan malzemelerin kazandığı yüksek mukavemet ve nispeten yeterli süneklik özellikleri ile iyileşen yorulma davranışı, söz konusu malzemeleri başta biyomedikal uygulamalar olmak üzere otomotiv, havacılık, savunma ve uzay endüstrileri ile elektronik ve spor araç ve gereçlerini imalatında kullanılabilir konuma getirmiştir [14]. Klasik EKAE kalıp sistemlerinde pek çok endüstriyel uygulama için düşük boyutlarda dairesel veya kare kesitli yarı mamul numuneler/parçalar üretilmektedir. Bu nedenle, EKAE yönteminin endüstriyel ölçekte kullanılabilmesi için çözülmesi gereken iki önemli problem ortaya çıkmaktadır. Bunların birincisi, EKAE işlemi ile daha büyük kesitlerde parçaların üretilebilmesi, ikincisi ise yöntemin sürekli hale getirilerek malzeme kayıplarının azaltılması ve işlem hızının artırılmasıdır. Bu kapsamda yürütülen çalışmalar hızlı bir şekilde devam etmektedir. Stolyarov ve arkadaşları [93] tarafından yapılan bir çalışmada, EKAE yöntemi 60 mm çapında ve 120 mm uzunluğundaki Ti numunelere uygulanmıştır. Ayrıca, 40x40 mm<sup>2</sup> boyutlarındaki Al alaşımlarına da oda sıcaklığında EKAE işlemi uygulanabilmiştir [14]. Numune kesitindeki büyümenin, içyapısal özellikler üzerindeki etkisi ise Chaudhury ve arkadaşları [94] tarafından incelenmiş ve 12,5x12,5 mm<sup>2</sup>, 50x50 mm<sup>2</sup>, 100x100 mm<sup>2</sup> kesit alanlarına sahip alüminyum alaşımı örneklerle yaptıkları çalışmada kesit alanındaki değişimin EKAE işlemi sonrası elde edilen özelliklerde önemli bir değişim meydana getirmediği saptanmıştır.

Öte yandan, EKAE işleminin verimli bir şekilde üretim süreçlerine aktarılması için üretim sürekliliğinin sağlanması gerekmektedir. Bu güne kadar bu amaçla gerçekleştirilen sürekli nitelikteki başlıca sistemler Şekil 8'de şematik olarak gösterilmiştir. Bu yöntemler daha çok, ince ve yassı malzemelere EKAE işleminin sürekli uygulanması için tasarlanmış olup, bu sistemlerin mevcut plastik şekillendirme hattına yerleştirilmesi amaçlanmıştır. Şekil 8(a)'da verilen yöntemde, malzeme merdaneler yardımıyla EKAE kalıbına sürülmektedir [95]. Şekil 8(b)'de verilen yöntemde malzeme büyük ana merdane ve küçük

planet tipi merdanelerin arasından geçirilerek EKAE kalıbına sokulmaktadır [96]. Şekil 8(c)'de gösterilen sistemde ise sac formdaki malzemenin EKAE kalıbına sürülmesi için merdane ile merdane destek bloğu arasında oluşan sürtünme kuvvetinde faydalanılmaktadır [97]. Şekil 8(d)'de ise tel veya çubuk formundaki malzemelerin EKAE işlemlerini sürekli halde gerçekleştirebilecek sistem verilmiştir [18]. Bu yöntemde, çevresel oluk açılmış silindirik merdane malzemeyi sürtünme kuvveti etkisiyle EKAE kalıbına iletmektedir. Bu yöntemlerin uygulandığı malzemelerden elde edilen özellikler, klasik EKAE yöntemi sonrası elde edilen özellikler ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 8. Geliştirilen başlıca sürekli EKAE yöntemleri: (a) İkili merdane düzeni ile sac besleme, (b) planet tipi merdaneler ile sac besleme, (c) bir merdane ve destek bloğu arasında oluşan sürtünme kuvveti kullanılarak sac besleme ve (d) çubuk tipi ürünler için geliştirilmiş sürekli EKAE sistemi

Günümüzde EKAE işlemi kullanılarak UİT yapılı hale getirilmiş malzemelerin kullanıldığı bazı mühendislik uygulamaları mevcuttur. Bu kapsamdaki ilk uygulama, UİT yapılı hale getirilen bakır ve alüminyumun kaplama taban malzemesi olarak kullanımınıdır. Bu uygulamalarda, UİT yapısı kaplamanın daha homojen meydana gelmesini ve tabana daha iyi tutunmasını sağlamıştır [18]. Bu kapsamda yapılan çalışmalar arasında en somut adım olarak insan dokusuna uyumlu saf titanyumun mukavemet ve yorulma özelliklerinin EKAE işlemi ile iyileştirilmesi ardından biyomedikal uygulamalarda kullanılması sayılabilir [98]. Halen UİT yapılı malzemelerin endüstriyel ölçeğe aktarılması konusunda yoğun bir çalışma yürütülmektedir. Özellikle mikro-elektromekanik (MEM) sistemlerde kullanılacak küçük boyutlu parçaların üretiminde, UİT'li malzemelerin kullanımının yakın gelecekte artacağı öngörülmektedir [80, 99].

### 1.3. IF-çeliği

IF (Interstitial-Free)-çeliği 1960'ların sonlarında Japon çelik üreticileri tarafından geliştirilen ve diğer çelik türlerine göre çok düşük oranlarda arayer atomu içeren bir çelik türüdür. Geleneksel çeliklerden farklı olarak IF-çelikleri, demir atomlarının arasında çözülmüş durumda bulunan C, O ve N gibi arayer elementlerinin mümkün olan en düşük seviyelere kadar düşürülmesi ile üretilmektedir. Bunun gerçekleştirilebilmesi için IF-çeliği üretimi, standart çelik üretiminden farklı olarak, vakum altında gaz giderme ve alaşımlama kademelerini içermektedir. Vakum altında gaz giderme işleminde çelik içerisindeki karbon oranı mümkün olabilecek en düşük sınırlara kadar indirilmektedir. Ardından çelikte bulunan arayer atomları ile kimyasal ilgisi yüksek olan Ti ve Nb elementlerinin birinin ya da her ikisinin eklenmesi ile kalan arayer atomlarının bir kısmı da TiC, TiN veya NbCN olarak tutulmaktadır [100]. Bu şekilde çeliğin içerdiği C ve N oranı %0.003 mertebelerine kadar düşürülmektedir. Elde edilen karalı bileşikler yapıda ince çökelti şeklinde dağılmaktadır [101]. IF-çeliğinin sahip olduğu bu içyapı diğer çelik türlerine göre çok üstün süneklik ve şekillendirilebilirlik özellikleri sergilemelerine neden olmaktadır [100, 101]. Ancak, azaltılan arayer atomu miktarı katı çözümlü sertleşmesi etkisini de azaltmaktadır. Ayrıca, C ve N'un stabilize edilmesi için kullanılan alaşım elementlerinin oluşturduğu kararlı bileşiklerin miktarı çökelti sertleşmesi oluşturabilecek büyüklükte değildir. Bu nedenle IF-çeliklerinin mukavemet değerleri diğer çelik türleri ile karşılaştırıldığında oldukça düşük değerlerde kalmaktadır.

IF-çeliği sahip olduğu mükemmel şekillendirilebilirlik özellikleri nedeniyle derin çekme uygulamalarının düşük sıcaklıklarda ve düşük paso sayılarında gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle IF-çeliği derin çekme uygulamalarının sıklıkla uygulandığı otomotiv ve beyaz eşya sektörlerinde daha yoğun olarak kullanılmaktadır. Ancak IF-çeliğinin mukavemet özelliklerinin düşük olması söz konusu malzemenin daha çok yüksek mukavemet gerektirmeyen gövde panel parçalarının üretiminde tercih edilmesine neden olmaktadır.

### 1.3.1. IF-Çeliğine Uygulanan EKAE İşlemleri

IF-çeliğinin içyapısal ve mekanik özelliklerine etkilerini inceleyen sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmalarda ağırlıklı olarak EKAE işlemi sonrasında ortaya çıkan tane incelme mekanizması, kristalografik yönelim oluşumu ile yorulma davranışı üzerinde durulmuştur. Bu kapsamda yapılan ilk çalışma 2000 yılında Bowen ve arkadaşları [102] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, IF-çeliğine 120° kalıp açısına sahip bir EKAE kalıbı kullanılarak 500°C’de ve rota-A’da 10 paso sayısında EKAE işlemi uygulanmıştır. Söz konusu işlem ile ortalama 300 nm kalınlığında 800 nm uzunluğunda taneler elde edilebilmiştir [102]. Diğer taraftan, Gazder ve arkadaşları [103] ile Bhowmik ve arkadaşları [104] tarafında yapılan çalışmalarda, IF-çeliğine farklı rota ve paso sayılarında ve oda sıcaklığında uygulanan EKAE işlemi sonrasında ortaya çıkan tane incelme mekanizması EBSD tekniği ile incelenmiştir. Bu çalışmalarda, oda sıcaklığında ve 90° kanal açısına sahip bir kalıpta uygulanan bir pasoluk EKAE işlemi sonrasında alt-tane oluşumunun büyük oranda tamamlandığını görülmüştür. Artan paso sayısı ile birlikte, yapıdaki GATS miktarının da artış elde edilmiştir. Ancak GATS oluşum hızının artan paso sayısı ile birlikte azalma eğilimi gösterdiği ortaya konulmuştur. Öte yandan, çok pasolu EKAE işlemi sonrasında elde edilen GATS miktarının uygulama rotasına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. Buna göre, rota-Bc’de gerçekleştirilen EKAE işlemi sonrasında oluşan GATS oranının diğer rotalardan daha yüksek olduğu ve bunu sırasıyla rota-Ba, rota-A ve rota-C’nin takip ettiği vurgulanmıştır.

EKAE işlemi uygulanmış durumdaki hacim merkezli kübik malzemelerde kristalografik yönelimin incelendiği çalışmalarda IF-çeliği model malzeme olarak alınmıştır. Genel olarak paso sayısı, uygulama rotası, ters basınç uygulaması ve deformasyon sıcaklığı gibi işlem parametrelerinin bu çelikte kristalografik yönelime etkisi

araştırılmıştır. Bu çalışmalarda daha çok bir pasoluk EKAE işlemi sonrası ortaya çıkan kristalografik yönelim deneysel ve teorik olarak incelenmiştir [105]. Söz konusu çalışmalarda, IF-çeliğine uygulanan EKAE işlemi ile burulma sırasında ortaya çıkan kristalografik yönelim arasında önemli benzerlikler bulunduğu görülmüştür [105]. Bu durum EKAE işlemi ve burulma sırasında numuneye uygulanan deformasyonun basit kayma şeklinde olmasına dayandırılmıştır [62, 105]. Bununla birlikte bir paso sonrasında elde edilen kristalografik yönelimin monoklinik simetri özelliği sergilediği görülmüştür [62, 106]. Monoklinik simetri, kayma düzleminde alınan kutup resimlerinin, söz konusu düzleme ait dış normal etrafında  $180^\circ$  döndürülmesi ile elde edilen kutup resimleri ile aynı olması anlamına gelmektedir [107]. Farklı rotalarda uygulanan çok pasolu EKAE işleminin kristalografik yönelime etkileri, kullanılan EKAE rotasına göre değişiklik göstermektedir. Buna göre rota-A ve rota-C'de elde edilen kristalografik yönelimin bir paso sonrasında ortaya çıkan kristalografik yönelim gibi monoklinik simetri özelliği gösterdiği anlaşılmıştır. Ancak rota-Bc'de uygulanan EKAE işlemi sonrasında ise monoklinik simetri görülmemiştir [61, 99]. Farklı EKAE rotalarında ve paso sayılarında elde edilen kristalografik yönelim bazı farklılıklar görülmüştür. Rota-A'da uygulanan EKAE işlemi sonrasında  $\langle 111 \rangle$  doğrultusunda elde edilen yönelim bileşenlerinin daha baskın olarak ortaya çıktığı anlaşılmıştır [62]. Bu etki artan paso sayısı ile artış göstermiştir [62]. Rota-C'de elde edilen kristalografik yönelim ise uygulanan paso sayısına göre değişim gösterdiği bilinmektedir. Buna göre tek numaralı paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen yönelimler ile bir paso sonrasında elde edilen yönelim arasında benzerlikler görülmüştür [108]. Aynı şekilde EKAE öncesi durumda elde edilen bileşenler ile çift numaralı paso sayıları sonrasında elde edilenler arasında da benzerlikler elde edilmiştir [108]. Bu durum söz konusu EKAE rotasında numunenin  $180^\circ$  döndürülmesine bağlı olarak açıklanmaktadır. Rota-Bc'de uygulanan çok pasolu EKAE işlemi sonrasında ise artan paso sayısı ile birlikte (110) düzleminde elde edilen bileşenlerinin şiddetinde olduğu belirlenmiştir [40, 103].

Uygulanan EKAE işleminin sonrasında IF-çeliğinin mukavemet ve sertliğinde önemli oranda artışların olduğu belirlenmiştir. Ancak artan paso sayısı ile birlikte mukavemet ve sertlik değerlerinde ki artış hızının azalma eğilimi gösterdiği görülmüştür. Öte yandan EKAE sonrasında elde edilen mukavemet artışının işlem rotalarına göre farklılık göstermiştir. Buna göre rota-A'da elde edilen mukavemet artışının rota-C'den

daha yüksek olduğu görülmüştür. Elde edilen mukavemet artışına karşın IF-çeliğinin süneklik değerleri EKAE öncesi duruma göre önemli oranda azalmıştır [109]

Farklı koşullarda EKAE uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin kısa çevrimli yorulma davranışı Niendorf ve arkadaşları [110] tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada, 4 pasodan daha yüksek paso sayılarında deforme edilmiş çeliğin kısa çevrimli yorulma davranışının iyileştiği görülmüştür. EKAE işlemi uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin hem yorulma ömrünün hem de yorulma dayanımının EKAE öncesi durumla karşılaştırıldığında, bu değerler işlem sonrası iki kattan daha fazla oranda artmıştır. Öte yandan, uygulanan EKAE rotalarının kısa çevrimli (ömürlü) yorulma davranışı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Nitekim, EKAE işlemi sonrasında yapıda oluşturulan tane sınırlarının daha çok geniş açılı karakterde olması durumunda daha iyi yorulma davranışı elde edildiği vurgulanmıştır. Bu durum dar açılı tane sınırlarının yapısal olarak stabil karakterde olmaması ve daha kolay deformasyon yumuşamasına neden olmasına dayandırılmıştır [111]. Benzer şekilde EKAE işlemi sonrasında içyapının toparlanmasını sağlayacak biçimde seçilen şartlarda uygulanan ısıtma işlemlerinin içyapısal kararlılığı artırdığı ve bu nedenle yorulma davranışını olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Bu sayede EKAE sonrasında elde edilen yorulma davranışının etkin bir içyapısal kontrol ile daha da iyileştirilebileceği gösterilmiştir [112, 113]. Ancak yorulma testlerinin toparlanma bölgesindeki sıcaklıklarda yapılması durumunda ise yorulma özelliklerinin olumsuz etkilendiği de görülmüştür. Bu durum yüksek sıcaklıklarda ve gerilme altında çatlak ucundaki lokal bölgelerde gerçekleşen tane büyümesine bağlı olarak açıklanmıştır [114]

#### **1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı**

Aşırı plastik deformasyon (APD) yöntemlerinden biri olan eş-kanallı açılmalı ekstrüzyon /basma (EKAE/B) işlemi özellikle kristal yapıya sahip metalik malzemelerde yüksek oranda deformasyona dayalı tane inceltme ve buna bağlı olarak mekanik ve fiziksel özelliklerin iyileştirilmesi için geliştirilmiştir. Bu yöntemde; artan paso sayısı veya deformasyon miktarına bağlı olarak başlangıçta iri ya da kaba taneli içyapılar kademeli olarak inceltilerek tane boyutu mikron altı mertebelere kadar indirilebilmekte ve sonuçta ultra-ince tane (UİT) yapıya sahip yeni tür içyapılar elde edilebilmektedir. Bu ise dislokasyon birikimine dayalı alt tane oluşumu ve gelişimiyle tamamlanmaktadır. Geleneksel plastik şekil verme yöntemlerinden farklı olarak EKAE işlemi uygulanan numune veya parçada

önemli bir kesit değişiminin olmaması, uygulanabilecek deformasyon miktarının kısıtlarını ortadan kaldırmış ve istenilen özellik değişimlerini sağlayacak içyapısal değişimlerin de yapılabilmesine imkan sağlamıştır. Bu sayede geliştirilen farklı rotalar ve bu rotalarda çoklu pasolar kullanılarak özellik optimizasyonlarının yapılması da mümkün hale gelmiştir. Bu nedenle, söz konusu APD yöntemi pek çok metal ve alaşıma uygulanmış ve hedeflenen özellik gelişimi konusunda çok olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bu yöntemde sağlanan aşırı tane incelmeleri ve dislokasyon yoğunluğundaki artış genel olarak bütün kristal yapı malzemelerin sertlik, mukavemet ve yorulma dayanımı gibi temel mekanik özelliklerinin gelişmesine neden olmaktadır. Özellikle malzemelerin akma dayanımı değerinde, geleneksel mukavemet artırma yöntemleriyle elde edilmesi çok zor olan artışlar sağlanmaktadır. Ayrıca, UİT yapıya hale getirilen süperplastik bileşimdeki malzemelerin nispeten daha düşük sıcaklık ve yüksek deformasyon hızlarında bile hala süperplastik özellik göstermeye devam ettikleri görülmüştür. Bu durum, yüksek deformasyon hızı ve düşük sıcaklıkta süperplastisiteyi hedefleyen çalışmalara hız kazandırmıştır. Ancak, UİT oluşumuyla malzemelerin mukavemet değerlerinde sağlanan bu iyileşme, geleneksel plastik şekil verme yöntemleri kadar olmasa da dökülmüş durumdaki alaşımlar hariç pek çok malzemenin süneklik ve tokluk özelliklerinin olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır.

Öte yandan, gelişen teknolojik seviye, özel malzeme ve üretim yöntemlerini de beraberinde geliştirmektedir. Özellikle çok karmaşık şekilli yapıların mevcut çelik malzemeler kullanılarak geleneksel plastik şekil verme yöntemleriyle imalatında sorunlar yaşanmış ve bunun için yeni tür çeliklerin geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. IF-çelikleri de bu amaçla geliştirilmiş olup, başlangıçta özellikle derin çekme parçaların (otomotiv ve beyaz eşya sektöründe kullanılan çeşitli parçalar) üretilmesi için düşünülmüştür. Bu çelikler, geleneksel olarak kullanılan çeliklerin içyapılarında arayer atomları şeklinde bulunan C, N ve O gibi elementlerin oranlarının özel teknikler ile (Ti, Nb gibi stabilize edici elementler ile alaşımlayarak) mümkün olan en alt seviyelere kadar düşürülmesiyle elde edilmektedir. Bu sayede çok iyi şekillendirilebilirlik özelliği kazanan bu çelikler; otomotiv, havacılık ve beyaz eşya gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ancak yetersiz mukavemet, sertlik ve yorulma dayanımı söz konusu çeliklerin farklı alanlarda da kullanılabilme potansiyelini sınırlamıştır. Bu nedenle son yıllarda özellikle sanayileşmiş ülkelerde yüksek dayanımlı IF-çeliği üretimine yönelik çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Bu sayede, mukavemet özellikleri geliştirilen IF-çeliğinden

daha hafif yapıların oluşturulması ve böylece söz konusu çeliğin özellikle hafifliğin ön planda tutulduğu pek çok mühendislik uygulamalarında da kullanılabilmesi amaçlanmıştır. Ancak IF-çeliğinin mukavemetinde sağlanacak artışın, şekillendirilebilirlik ve süneklik özelliklerini fazla etkilemeden gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Öte yandan, IF-çeliklerinin mukavemet değerlerinin artırılmasında geleneksel pek çok yöntemin kullanılmasının da mümkün olmadığı görülmektedir. Özellikle yeterli karbon elementi içermemesi, söz konusu çeliklere ısıl işleme dayalı mukavemet artırma tekniklerinin de uygulanmasını ortadan kaldırmaktadır. Diğer geleneksel plastik deformasyon yöntemleriyle (dövme ve haddeleme gibi) de etkin bir mekanik özellik kontrolü sağlanamamakta ve elde edilebilecek iyileşmeler çok sınırlı kalmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, bu tür çeliklerde yapısal dönüşüme dayalı mekanik özellik değişimlerinin sadece tane inceltmesi ve beraberinde sağlanacak dislokasyon artışıyla sağlanabileceği fikri ön plana çıkmaktadır. Ancak, bu amaçla uygulanacak bir yöntemin söz konusu çeliklerin yapısal, mekanik ve özellikle işlevsel özelliklerinde ne gibi değişimleri meydana getireceğinin ayrıntılı bir şekilde ortaya konulması ve bu anlamda özellik optimizasyonlarının yapılması gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışma aşağıdaki amaçlar doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.

- Endüstriyel olarak kullanılan IF-çeliklerinin aşırı plastik deformasyon tekniklerinden biri olan eş-kanallı açısız ekstrüzyon (EKAE) yöntemiyle çeşitli rota ve paso sayılarında işlemlere tabi tutularak meydana gelen yapısal (tane boyutu, tane morfolojisi, yönelim ve doku oluşumu, dislokasyon dağılımı, geniş ve dar açılı tane sınırları gibi) ve temel mekanik özellik (sertlik, mukavemet ve süneklik gibi) değişimleri ayrıntılı bir şekilde ortaya çıkarılacaktır. Literatürel birikime bakıldığında, şimdiye kadar bu konuda belli çalışmalar yapıldığı ancak bütün işlem parametrelerini dikkate alan ve bunlar arasında bir korelasyon yapan kapsamlı bir çalışmanın henüz mevcut olmadığı görülmektedir.
- Ultra-ince tane (UİT) yapıya getirilen IF-çeliğinin etkin ve sistematik bir yaklaşımla termal kararlılık ve yeniden kristalleşme kinetiğinin aydınlatılması sağlanacak ve en uygun özellik değişimlerini veren şartlar belirlenecektir. Pek çok araştırmada, IF-çeliği ve benzeri yapılarda çok yüksek oranlarda mukavemet artışlarıyla birlikte süneklik değerlerinin de önemli oranda azaldığı rapor edilmektedir. Bu nedenle, IF-çeliklerinin EKAE işlemleri sonrası uygun ısıl işlemlerle mukavemet-süneklik özelliklerinin de optimize edilmesi gerekmektedir.



Bu kapsamda çeşitli malzemeler için bazı çalışmaların yapıldığı literatürden anlaşılmaktadır. Ancak, EKAE işlemi uygulanmış durumdaki IF-çeliği üzerine bu kapsamda detaylı bir çalışmanın henüz yapılmamış olduğu dikkati çekmektedir. Ayrıca, bu kapsamda elde edilecek sonuçlar diğer benzer yapıdaki UİT yapılı metalik malzemeler için de yol gösterici nitelikte olacaktır.

- UİT yapılı hale getirilen IF-çeliğinin darbe tokluğu ve sünek-gevrek geçiş davranışı detaylı bir şekilde incelenecek ve muhtemel değişimlerin yapısal mekanizmaları aydınlatılmaya çalışılacaktır. Özellikle HMK yapı malzemelerde darbe tokluğu ve sünek-gevrek geçiş davranışının belirlenmesi gerekmektedir. Geleneksel yapıdaki çelik malzemelerin bu kapsamdaki davranışları genel olarak ortaya konulmuştur. Ancak, UİT’li HMK yapılı malzemelerin bu davranışları şimdiye kadar ayrıntılı bir şekilde incelenmemiştir. Özellikle EKAE ve IF-çeliği ile ilgili ulaşılabilir literatürde bu kapsamda yapılmış herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle, bu kapsamda elde edilecek sonuçlar özelde IF-çeliği ve genelde bütün UİT’li HMK yapılı malzemeler için önemli bir literatürel boşluğu dolduracak nitelikte olacaktır.
- UİT yapılı hale getirilecek IF-çeliğinin çok eksenli gerilme altında derin çekilebilirliği Erichsen testi ile incelenecek ve muhtemel değişimlerin içyapısal nedenleri araştırılacaktır. Çünkü IF-çeliği gibi şekillendirilebilirlik davranışının önemli olduğu malzemelerde meydana getirilecek yapısal ve mekanik özellik değişimlerinin, söz konusu malzemelerin şekillendirilebilirlik davranışlarını nasıl etkilediğinin de belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için ise tek eksenli çekme deneyleri ile elde edilen sonuçların çok eksenli gerilme altında yapılacak şekillendirme işlemlerindeki geçerliliğinin de araştırılması önemli görülmektedir. Literatür araştırmaları, UİT yapılı malzemelerle ilgili bu kapsamda ayrıntılı bir çalışmanın henüz yapılmadığını göstermemektedir. Bu nedenle, elde edilecek sonuçlar IF-çeliğinin yanında benzer UİT yapılı diğer malzemeler için de büyük oranda geçerli olacak ve bu anlamda araştırmacılar için yol gösterici niteliği taşıyacaktır.
- Çalışmanın bir diğer amacı ise sac formundaki malzemelere de EKAE işlemini uygulayabilecek bir kalıp sisteminin tasarlanması ve bu kapsamdaki ön çalışmaların yapılmasıdır. Tasarlanan bu sistem ile endüstriyel uygulamalarda sac formda kullanılmakta olan IF-çeliğinin mukavemetinin, herhangi bir ara işleme

gereksinim duyulmadan ve sürekli bir şekilde uygulanan EKAE işlemi ile arttırılması amaçlanmaktadır. Bu durum hem yüksek mukavemetli IF-çeliği sacların üretimine EKAE yönteminin entegre edilmesi açısından, hem de sürekli EKAE yöntemlerinin geliştirilmesi açısından endüstriyel öneme sahip olacaktır. Literatürel birikime bakıldığında, bu alana yoğun bir ilginin olduğu görülmektedir. Ancak gelinen noktada henüz tam anlamıyla kütleli formdaki çeliklerden elde edilen özellik değişimlerinin sac formunda sağlanamadığı gözlenmektedir. Bu kapsamda gerçekleştirilecek çalışmalar, EKAE işleminin sac formundaki malzemelere uygulanmasına yönelik ileri bir adım niteliğinde olacaktır.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Deney Malzemesi

Çalışmalarda Tablo 1’de kimyasal bileşimi verilen ve Ti ile stabilize edilen IF-çeliği kullanıldı. Söz konusu çelik, hem kütleli formda hem de sac formda tedarik edilerek eş kanallı açısız ekstrüzyon/basma (EKAE/B) ve eş kanallı açısız sac ekstrüzyonu (EKASE) işlemleri için hazır hale getirildi. Kütleli formdaki IF-çeliği numuneler (numune) ERDEMİR’de üretilen yaklaşık 25 mm kalınlığındaki sıcak hadde ürünü slablardan çıkarıldı. Söz konusu slablardan dilinen parçalar talaşlı imalat yöntemiyle EKAE işlemi için gerekli numune boyutlarına getirildi. Sac formdaki IF-çeliği numuneleri ise aşağıda verilen üretim süreci sonunda ortaya çıkan yarı mamulden kesilerek çıkarıldı. Söz konusu yarı mamul, sıcak haddelenmiş IF-çeliği slabların çeşitli ezme oranlarında soğuk haddelenmesi ile elde edilen ürünün sürekli tavlama hattında 790°C’de uygulanan sürekli tavlama ve yüzey temizleme kademelerine tabi tutulduktan sonra 700°C’de bobine sarılarak üretildi. Öte yandan, hem kütleli hem de sac formundaki IF-çeliği numunelerin aynı kimyasal bileşime sahip olmaları için, numuneler aynı döküm sürecinden elde edildi.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan kütleli ve sac formundaki IF-çeliğinin kimyasal bileşimi

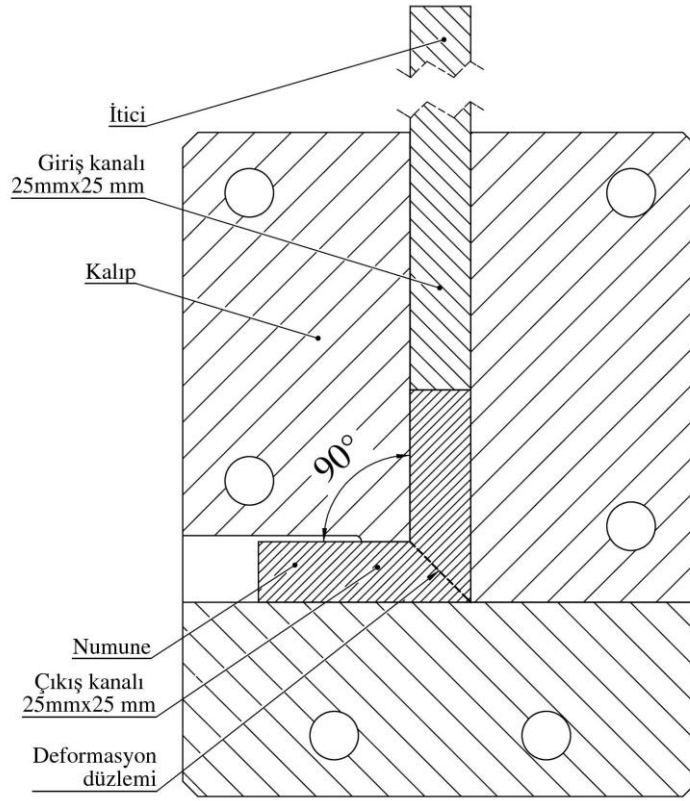
Standart gösterimi	Elementlerin ağırlık oranı (%)					
	C	P	S	Mn	Ti	Fe
DIN EN 10130 DC06	0,004	0,012	0,009	0,2	0,1	Kalan

### 2.2. EKAE İşlemleri

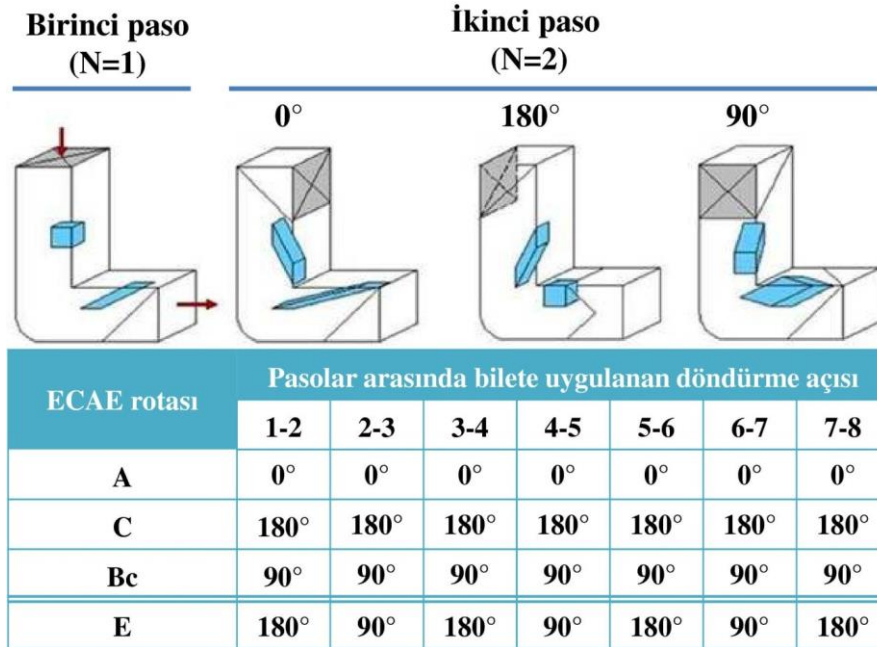
#### 2.2.1. Kütleli Formdaki IF-Çeliğine Uygulanan EKAE Deneyleri

EKAE işlemi için yukarıda kimyasal bileşimi ve üretim geçmişi verilen kütleli formdaki IF-çeliğinden 25x25x150 mm<sup>3</sup> boyutlarında numuneler talaşlı imalat yöntemiyle hazırlandı. Hazırlanan numunelerin yüzeyleri işlem öncesi teflon ile sarılarak işlem sırasında oluşacak sürtünme etkileri en aza indirilmeye çalışıldı. Uygulanan EKAE işlemlerinde şematik resmi Şekil 9’da verilen ve kalıp açısı ( $\Phi$ ) 90° ve dış köşe yuvarlatma

açısı ( $\psi$ ) ise  $0^\circ$  olan kalıp sistemi kullanıldı (Şekil 9). Söz konusu kalıp açıları özellikle seçilerek bir pasoda en yüksek eşdeğer şekil değişimi elde edilmeye çalışıldı. EKAE işlemi, oda sıcaklığında ve literatürde rota-A, rota-C, rota-Bc ve rota-E olarak adlandırılan dört farklı rotada ve uygulama rotasına bağlı olarak 1, 2, 4 ve 8 paso sayılarında gerçekleştirildi. Söz konusu rotaların uygulanışını gösteren şematik resim Şekil 10'da gösterilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi, rota-A'da gerçekleştirilen işlem sırasında numuneler takip eden pasolar arasında döndürülmeden hep aynı pozisyonda kalıba yerleştirilerek toplam 8 pasoluk ekstrüzyon işlemi gerçekleştirildi [12, 20]. Rota-C ve rota-Bc'de uygulanan işlemler sırasında ise numuneler birbirini takip eden pasolar arasında sırasıyla saat ibresinin ters yönünde  $180^\circ$  ve  $90^\circ$  döndürülerek kalıba yerleştirildi [12, 20]. Rota-E'de uygulanan işlem ise  $2C \times B_C \times 2C$  şeklinde gerçekleştirildi. Bu işlemde numune, önce pasolar arasında ardı ardına iki defa  $180^\circ$  ( $2C$ ) döndürülerek işleme tabi tutuldu, ardından yine saat ibresi yönünde  $90^\circ$  döndürüldü ve sonra tekrar ardı ardına iki defa  $180^\circ$  ( $2C$ ) döndürülerek bir çevrimlik işlem tamamlanmış oldu [23]. Bu rotalarda 1, 2, 4 ve 8 paso sayılarında EKAE işlemine tabi tutulmuş durumdaki numuneye uygulanan eş değer şekil değişimi miktarı ilgili ampirik bağıntılardan [12] faydalanılarak sırasıyla 1,15, 2,30, 4,60 ve 9,20 olarak belirlendi. Uygulanan tüm EKAE işlemleri oda sıcaklığında ve  $2,5 \text{ mm.s}^{-1}$ 'lik numune ilerleme hızında gerçekleştirildi. Tablo 2'de kütleli formdaki çeliğe uygulanan EKAE işleminde kullanılan deney parametreleri verilmiştir.



Şekil 9. Çalışmada kullanılan EKAE kalıp sisteminin şematik gösterimi



Şekil 10. EKAE rotalarının uygulanışını gösteren şematik resim

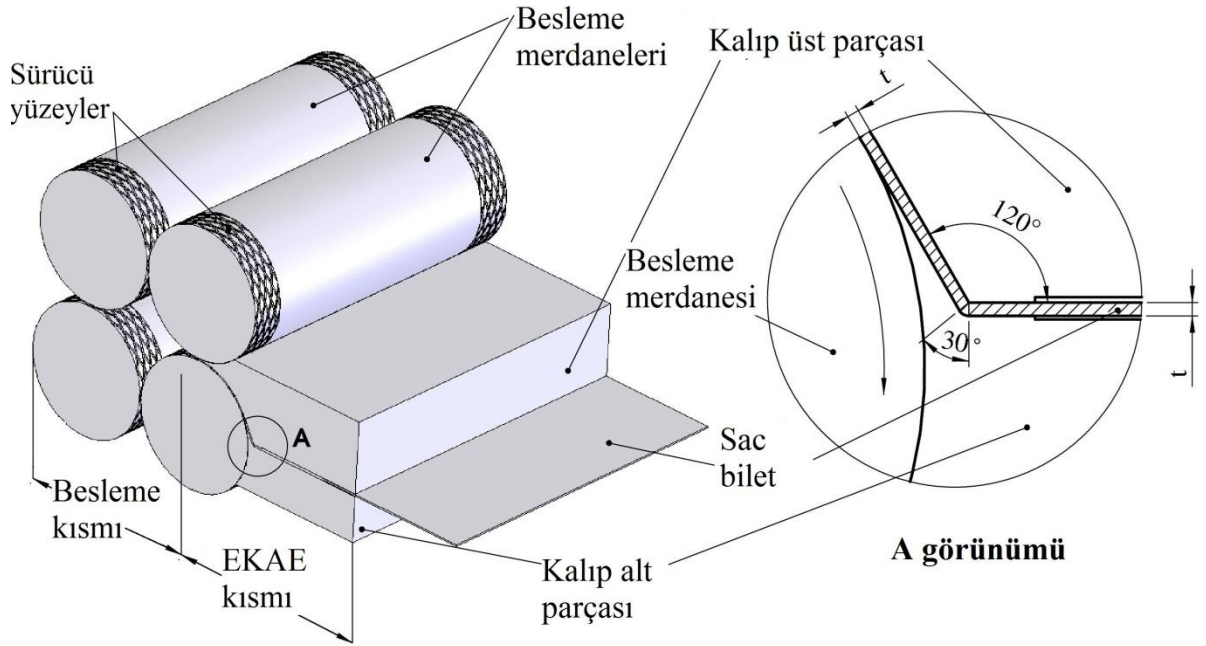
Tablo 2. Kütlesel formdaki IF-çeliğine uygulanan EKAE işlemlerinde kullanılan deney parametreleri.

Deney malzemesi	Kalıp açısı	EKAE rotaları	Paso sayısı	Ekstrüzyon hızı (mm.s <sup>-1</sup> )	İşlem sıcaklığı (°C)
Kütlesel formdaki IF-çeliği	$\Phi=90^\circ$ $\Psi=0^\circ$	Rota-A	1, 2, 4 ve 8	2,5	Oda sıcaklığı
		Rota-Bc	1, 4 ve 8	2,5	Oda sıcaklığı
		Rota-C	1, 2, 4 ve 8	2,5	Oda sıcaklığı
		Rota-E	1 ve 8	2,5	Oda sıcaklığı

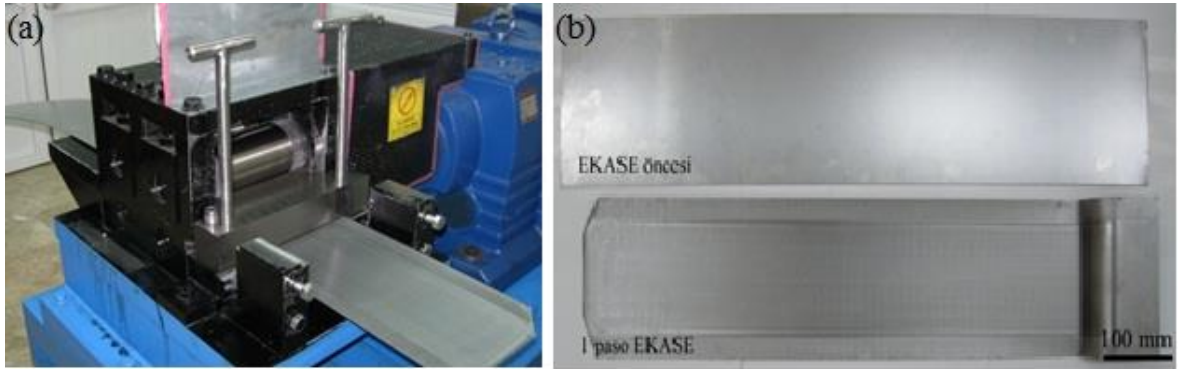
### 2.2.1. Sac Formdaki IF-Çeliğine Uygulanan EKASE Deneyleri

Tez çalışması kapsamında, sac formundaki IF-çeliğine EKAE işlemi uygulamak amacıyla yeni bir kalıp sistemi tasarlanıp ve imal edildi. “Eş kanallı açıl sac ekstrüzyonu (EKASE)” ismi verilen söz konusu sistemin şematik gösterimi Şekil 11’de, fotoğrafı ise Şekil 12’de verilmiştir. Şematik resimden de görüleceği gibi geliştirilen bu sistem; “besleme kısmı” ve kalıpları içeren “EKAE kısmı” olmak üzere iki temel bölümden meydana gelmektedir. Besleme kısmında EKASE işlemi sırasında sac numunenin kalıp sisteminden geçirilmesi için gerekli olan itme kuvveti sağlanmaktadır. Bu kısımdaki merdanelerin çapı 80 mm ve genişliği ise 180 mm olarak tasarlandı. Merdane yüzeyleri taşlama işlemine tabi tutularak parlatıldı. Ancak, gerekli besleme veya itici kuvveti sağlamak için merdanelerin iki kenarında genişliği 30 mm ve çapı merdane çapından 0,1 mm daha büyük olan sürücü kısımlar oluşturuldu. Bu kısımların yüzeylerine baklava dilimi şeklinde desenler işlenerek merdanelerin yüzey pürüzlülüğünün bu bölümlerde artırılması sağlandı. Sistemin çalıştırılması sırasında, merdane yüzeyleri arasındaki mesafe sac numunenin bu kısma denk gelen bölümünde plastik deformasyon ortaya çıkmayacak biçimde ayarlandı. Bu şekilde bir ayarlama yapıldığında, sürücü kısımlara denk gelen bölgelerde sürücü yüzeyindeki baklava dilimi şekilli dişlerin numuneye girmesi sağlanarak yüksek bir itici kuvvetin oluşması sağlandı. Elde edilen itme kuvveti, sac numunenin kalıp sisteminden geçişini sağlamaktadır. Sistemin kalıp kısmında ise, sac numuneler için geliştirilmiş bir EKAE kalıp sistemi bulunmaktadır. Sistemde bulunana merdaneler ile alt ve üst kalıp parçalarının montajı sonrasında kesit görünümü Şekil 11’de verilen (A görüntüsü) kanal geometrisi elde edildi. Bu kanal geometrisinde kanal açısı ( $\phi$ )  $120^\circ$  ve dış köşe yuvarlatma açısı ( $\psi$ ) ise  $30^\circ$  olarak belirlendi. Söz konusu geometrik parametreler gerçekleştirilen bir dizi ön deneyler ve daha önce yapılan literatür çalışmaları esas alınarak

belirlendi. Bu geometrik parametrelere sahip EKAE kalıbından geçirilen sac örneğe her paso sayısında uygulanan eş değer şekil değiştirme oranı ilgili ampirik bağıntılar [12, 20] kullanılarak 0,67 olarak belirlendi. Şekil 12(b)'de işlem öncesi ve ilgili kalıpta bir pasoluk işleme tabi tutulmuş sac numunelerin resimleri verilmiştir.



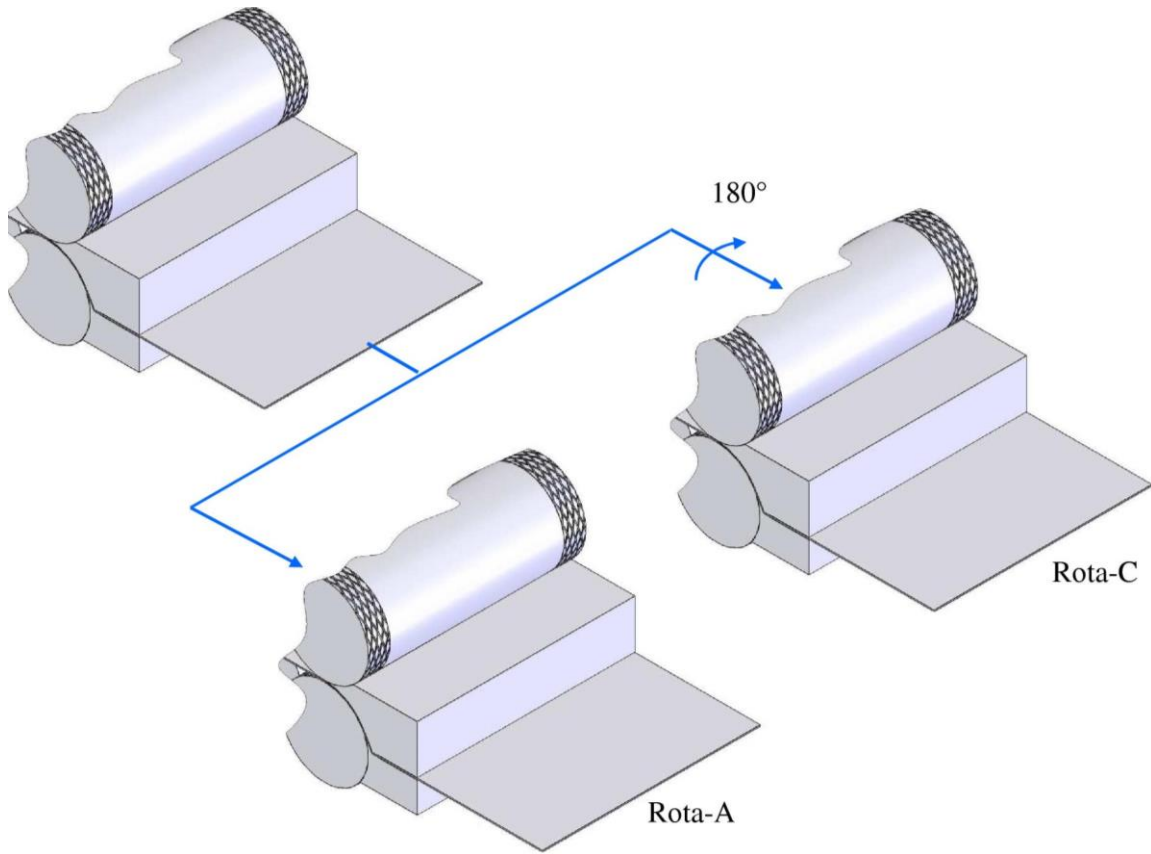
Şekil 11. Eş kanallı açısız sac ekstrüzyon (EKASE) sisteminin şematik gösterimi



Şekil 12. (a) Geliştirilen EKASE sisteminin genel görünümü ve (b) kullanılan sac numunelerin işlem öncesi ve bir pasoluk işlem sonrası görüntüleri.

EKASE için yukarıda kimyasal bileşimi ve üretim geçmişi verilen IF-çeliği saclardan  $175 \times 700 \times 1,2 \text{ mm}^3$  (en x boy x kalınlık) boyutlarında numuneler çıkarılarak EKASE işlemine hazır hale getirildi. EKASE işlemi rota-A ve rota-C olarak bilinen standart EKAE rotalarında gerçekleştirildi. Bu işlem rotalarının uygulanışını gösteren

şematik resim Şekil 13’de gösterilmiştir. Rota-A’da uygulanana EKASE işlemi sırasında sac numunenin yönü pasolar arasında değiştirilmeden yeniden kalıba yerleştirilerek işlem gerçekleştirildi. Rota-C’de ise takip eden pasolar arasında numuneler aynı yönde  $180^\circ$  döndürülerek kalıba yerleştirildi. Hazırlanan numunelere her bir işlem rotasında toplam 8 paso (1, 2, 4, 6, 8) sayısına kadar EKASE işlemi uygulandı. Bu sayede sac numuneye 1, 2, 4, 6 ve 8 pasolar sonrası sırasıyla 0,67, 1,33, 2,67, 4,0 ve 5,33 büyüklüğünde eş değer şekil değişimi uygulanmış oldu. Proses işlemleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş olup sac ilerleme hızı olarak 0,18 m/s seçildi. İşlem sırasında sürtünmeyi azaltmak ve deformasyonun daha homojen olarak gerçekleştirilmesini sağlamak için sac ve kalıp yüzeyleri mineral esaslı bir sıvı yağlayıcılarla yağlandı. Tablo 3’de sac formundaki IF-çeliğine uygulanan EKASE işlemi sırasında kullanılan deney parametreleri verilmiştir.



Şekil 13. EKASE işlemi sırasında kullanılan işlemler için gösteren şematik resim



Tablo 3. Sac formundaki IF-çeliğine uygulanan EKASE işlemlerinde kullanılan deney parametreleri

Deney malzemesi	Kalıp açısı	EKAE rotaları	Paso sayısı	Ekstrüzyon hızı (m.s <sup>-1</sup> )	Proses Sıcaklığı (°C)
Sac formundaki IF-çeliği	$\Phi=90^\circ$ $\Psi=30^\circ$	Rota-A	0, 1, 2, 4, 6 ve 8	0,18	Oda sıcaklığı
		Rota-C	0, 1, 2, 4, 6 ve 8	0,18	Oda sıcaklığı

### 2.3. İyçyapı İncelemeleri

Kütlesel ve sac formdaki IF-çeliğinin EKAE/EKASE öncesi ve farklı rota ve paso sayılarında uygulanan işlemler sonrasında iyçyapıda ortaya çıkan değişimler; optik mikroskop, geçirimli elektron mikroskobu (transmission electron microscope-TEM) ve geri saçılmış elektron difraksiyonu (electron backscattered diffraction-EBSD) özelliği olan taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelendi. Ayrıca, EKAE ve EKASE uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin iyçyapısında ortaya çıkan kristalografik yönelim ise X-ışını difraksiyonu yöntemi ile belirlendi. Optik mikroskop incelemesi için standart metalografi yöntemi ile hazırlanan örnekler Marshall ayıracı [115] ile dağlandı. Dağlanan örnekler bir ışık mikroskobunda incelenerek iyçyapı resimleri çekildi. Çekilen iyçyapı resimlerinden faydalanılarak EKAE/EKASE öncesi durumdaki IF-çeliğinin ortalama tane boyutu değerleri lineer kesiştirme yöntemi ile belirlendi.

EKAE/EKASE uygulanmış durumdaki kütlesel ve sac formdaki IF-çeliğinin iyçyapısal özellikleri, numunedeki konumu Şekil 14(a)-(b)'de gösterilen metalografi örnekleri kullanılarak incelendi. Bu şekilden de anlaşılabilceği gibi, EKAE işlemleri sonrasında kütlesel formdaki IF-çeliğinin iyçyapısı numune ilerleme doğrultusuna dik kesit düzlemi üzerinden, EKASE işlemleri sonrasında sac formdaki IF-çeliğinin iyçyapısı ise boyuna düzlemi üzerinden incelendi. TEM incelemeleri için gerekli örnekler, EKAE ve EKASE numunelerinin orta bölgelerinden tel elektro-erozyon (wire-EDM) yöntemi kullanılarak çıkarıldı. Bu sayede, kesmeye bağlı ısı oluşumu ve bunun aşırı deforme olmuş iyçyapıya olan etkisi en aza indirilmeye çalışıldı. TEM incelemeleri için kesilen örnekler ilk önce mekanik aşındırma yöntemi ile 0.15 mm kalınlığa kadar inceltildi ve ardından -40 °C'de tutulan %5'lik perklorik asit çözeltisinde 20V potansiyel fark uygulanarak elektro-kimyasal olarak daha da inceltilip folyo haline getirildi. TEM incelemelerinde 200 kV'ta

çalıştırılan Philips CM-200 model bir mikroskop kullanıldı. TEM incelemeler sırasında her bir şart için seçilmiş alan difraksiyon deseni (SAD pattern) incelemeleri de gerçekleştirildi.

Geri saçılmış elektron difraksiyonu (EBSD) incelemeleri belli şartlardaki numunelere uygulandı. Bu incelemeler EKAE ve EKASE uygulanmış durumdaki kütleli ve sac formdaki IF-çeliğinin sırasıyla dik kesit ve akış düzlemleri üzerinden gerçekleştirildi. Bu incelemeler için EKASE işlemi uygulanmış durumdaki sacın orta bölgesinden kesilen parçalar bakalite alınıp %5 perklorik asit çözeltisinde 20V potansiyel fark uygulanarak elektro-kimyasal olarak parlatıldı. EBSD incelemeleri 20 kV'da çalıştırılan Zeiss 1530 VP FEG marka bir SEM kullanılarak gerçekleştirildi. Ayrıca, işlem sonrası EKASE uygulanmış sac numunenin kalınlığı boyunca geri saçılan elektron (BSE) modu kullanılarak resimler çekildi.

Kristalografik yönelim incelemeleri EKAE ve EKASE uygulanmış durumdaki kütleli ve sac formdaki IF-çeliğinin sırasıyla dik kesit ve akış düzlemleri üzerinden gerçekleştirildi. Tekstür incelemeleri 40 kV potansiyel fark ve 40 mA akımda çalıştırılan Bruker AXS D8 Discover marka X-ışını difraktometresinde Cu-K $\alpha$  radyasyonu kullanılarak gerçekleştirildi. Elde edilen X-ışını difraksiyonu verileri, POPLA (Preferred Orientation Package-LosAlamos) yazılımında işlenerek kutup şekilleri oluşturuldu.

#### **2.4. Mekanik Özellik İncelemeleri**

Kütleli ve sac formdaki IF-çeliğinin EKAE/EKASE işlemleri öncesi ve sonrasında sahip olduğu mekanik özellikler oda sıcaklığında gerçekleştirilen sertlik ve çekme deneyleri kullanılarak belirlendi.

Sertlik deneyleri, Vickers ölçüm yöntemi ile Struers marka (Duramin-3) bir mikrosertlik deney cihazında gerçekleştirildi. Deneyler hem kütleli formdaki hem de sac formundaki IF-çeliğinde dik kesit düzleminde gerçekleştirildi (Şekil 14(a)-(b)). Bunun için ilgili kesitlerden çıkarılan örnekler bakalite alınarak sertlik ölçümlerinin gerçekleştirileceği yüzeyleri parlatıldı. Ölçümler, 9.81 N yük altında ve 10 saniye bekleme sürelerinde gerçekleştirildi. Her bir sertlik değeri için en az 10 ölçüm yapıldı ve ölçülen değerlerinden en düşük ve en yüksek olanları göz ardı edilip kalan ölçümlerin ortalaması alındı.

Çekme deneyleri, Şekil 14(a)-(d)'de EKAE/EKASE uygulanmış numunelerdeki konumları ve boyutları verilen numuneler kullanılarak gerçekleştirildi. Kütleli formdaki

IF-çeliğinin mekanik özellikleri EKAE doğrultusu (ED) ile aynı doğrultuda çıkarılan örnekler kullanılarak belirlendi. Sac formundaki IF-çeliğinin mekanik özellikleri ise EKASE doğrultusuna (ED) göre 0°, 45° ve 90° yönünde çıkarılan çekme örnekleri ile belirlendi. Çekme deneylerinde Instron 3382 model bir üniversal çekme-basma deney makinesi kullanıldı. Çekme örneklerinde meydana gelen uzama miktarı, bu cihaza bağlı olan video tipi bir uzama ölçer (ekstansometre) yardımıyla belirlendi. Deneyler oda sıcaklığında ve  $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 'lik deformasyon hızında gerçekleştirildi. Çekme deneyleri sırasında numuneye uygulanan yük ve elde edilen deformasyon bir bilgisayar yardımıyla kaydedilerek gerilme-uzama diyagramları çizdirildi. Bu diyagramlar kullanılarak temel mukavemet ve süneklik özellikleri belirlendi. Her bir durum için en az üç çekme deneyi yapıp elde edilen sonuçları ortalamaları alındı.

### **2.5. Termal Kararlılık ve Yeniden Kristalleşme Davranışı**

EKAE uygulanmış durumdaki kütleli formundaki IF-çeliğinin ısı kararlılığının, yeniden kristalleşme kinetiğinin ve mekanik özellik değişimlerinin incelenmesi amacıyla Tablo 4'de verilen deney parametreleri kullanılarak tavlama ısı işlemleri uygulandı. Belirlenen deney parametreleri, gerçekleştirilen ön deneyler ve ilgili literatür birikiminden yararlanılarak oluşturuldu. Isıl işlem uygulamaları hassas sıcaklık kontrolüne ( $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) sahip bir tav fırınında gerçekleştirildi. Isıl işlem sonrası fırından çıkarılan numuneler ısı işlem sürecinin durdurulması için musluk suyu ortamına daldırılarak soğutuldu. Uygulanan ısı işlemlerin IF-çeliğinin içyapısal özelliklere etkileri optik mikroskop ve EBSD incelemeleri ile, mekanik özelliklerine olan etkileri ise sertlik ve çekme deneyleri ile belirlendi. Söz konusu incelemelerde, yukarıda açıklanan deneysel yöntemler uygulandı.

Tablo 4. UİT yapılı IF-çeliğine uygulanan tavlama parametreleri

Isıl işlemin uygulandığı EKAE koşulları	Isıl işlem koşulları	
	Sıcaklık (°C)	Zaman(dk.)
1A 2A 2C 4A 4C 8A 8C 8Bc 8E	20	60
	200	
	300	
	350	
	400	
	450	
	500	
	550	
	600	
	650	
8A 8C 8Bc 8E	700	3,5
	600	5,5
		7,5
		9,5
		11,5
		30
		45
		60
		90
		120
240		

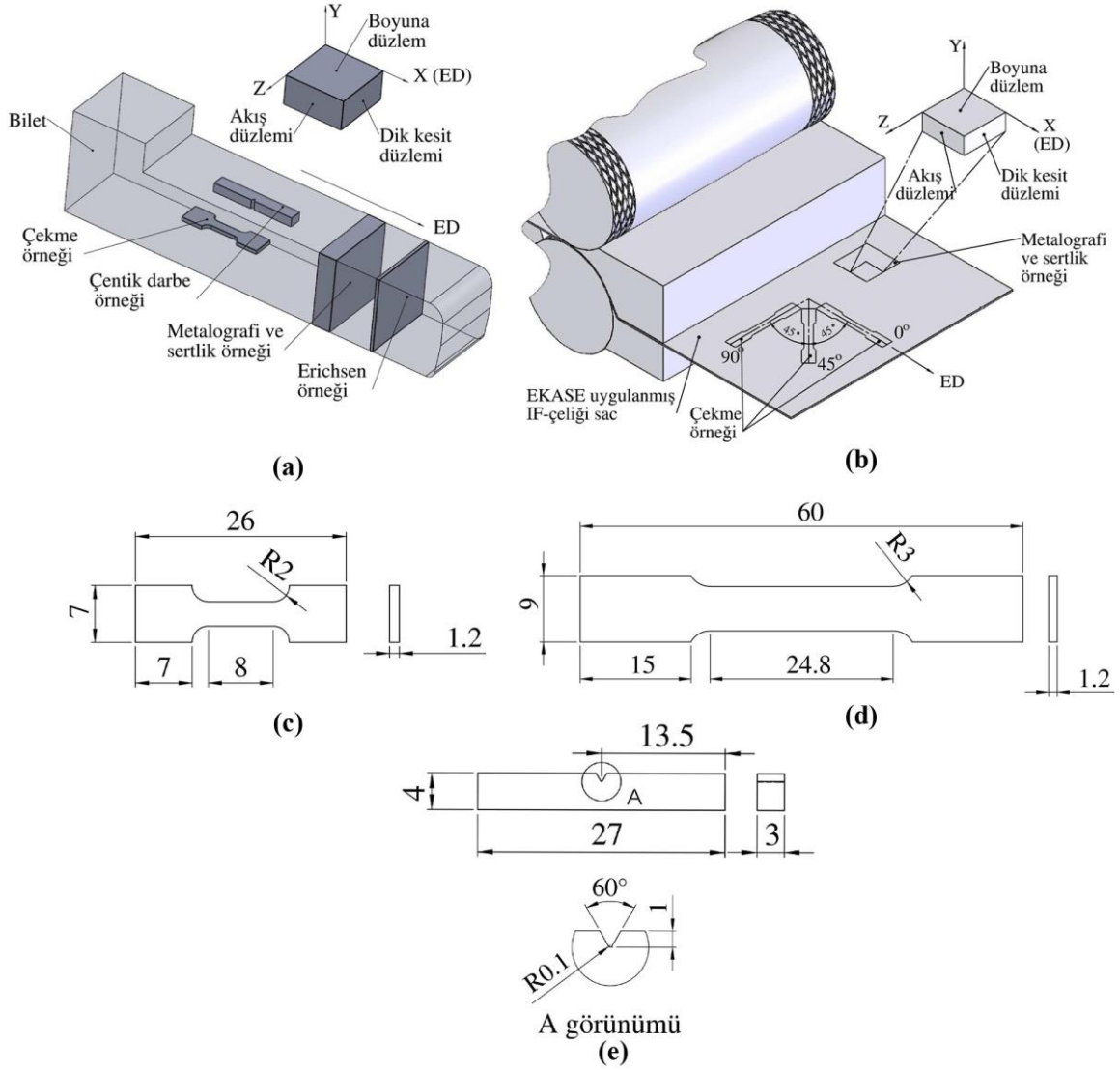
## 2.6. Çentik Darbe Tokluğu ve Sünek-Gevrek Geçiş Davranışı

EKAE öncesi ve sonrası IF-çeliğinin çentik darbe davranışının belirlenmesi için Şekil 14'de numune içerisindeki konumu gösterilen örnekler DIN 50115 standardına uygun boyutlarda tel elektro-erozyon yöntemi ile kesildi. Kesilen örneklerin yüzeyleri zımparalanarak deneye hazır hale getirildi. Çentik-darbe deneyleri, 50 J kapasiteli Instron-Ceast marka bir Charpy çentik darbe makinesinde DIN 50115 standardına uygun olarak gerçekleştirildi. Sünek-gevrek geçişi davranışının belirlenmesinde de aynı örnek boyutları ve deney parametreleri kullanıldı. Bu kapsamdaki deneylerde deney sıcaklığı çentik altına kadar açılan bir deliğe yerleştirilen termo-eleman çifti ile belirlendi. Deney sıcaklığına gelen numuneler çekicinin serbest bırakılmasıyla kırıldı. Sünek-gevrek geçiş eğrisinin oluşturulmasında, -170°C ile 20°C arasında 14 farklı deney sıcaklığında deneyler yapıldı. Her bir sıcaklık değeri için ortalama 5 farklı deney gerçekleştirildi. Çentik darbe deneyleri

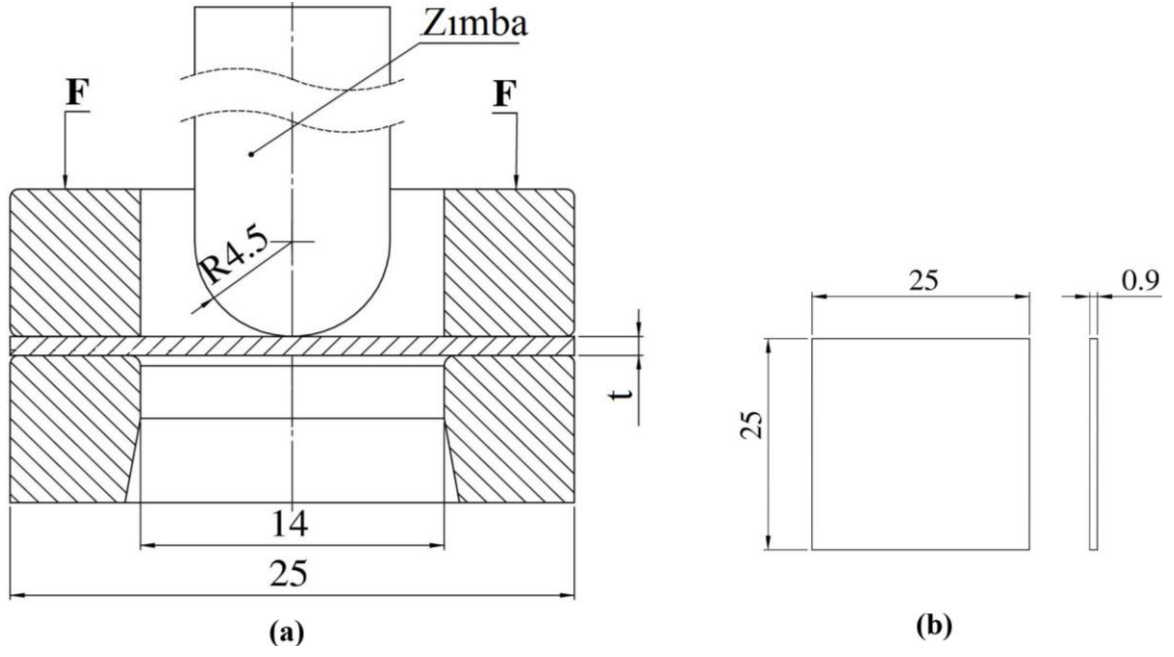
sırasında kırılan numunelerin yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelendi ve kırılma mekanizmasındaki değişimler ortaya konulmaya çalışıldı.

## 2.7. Şekillendirilebilirlik Davranışı

EKAE IF-çeliğinin şekillendirilebilirlik özellikleri Erichsen deneyi ile belirlendi. Erichsen testleri Instron 3382 model çekme/basma makinesine bağlanan bir Erichsen kalıp sistemi kullanılarak gerçekleştirildi. Şematik resmi ve ana boyutları Şekil 15(a)'da verilen bu kalıp sistemi TS EN ISO 20482 standardında belirtilen kalıp boyutlarının ½ ölçeğinde küçültülmesi ile elde edildi. Erichsen deneyleri için numune içerisindeki konumu ve boyutları Şekil 15'de verilen örnekler tel erozyon yöntemi ile kesildi. Kesilen numunelerin yüzeyleri zımparalanıp parlatılarak çizikler gibi çatlak başlangıcı oluşturabilecek yüzey kusurları giderildi. Şekillendirilebilirlik testleri oda sıcaklığında, yağlayıcı kullanılmadan 0,045 mm/s zımba ilerleme hızında gerçekleştirildi. Şekillendirilebilirlik testleri sırasında ortaya çıkan kuvvet ve çökme değerleri bir bilgisayar yardımı ile kaydedilerek kuvvet-çökme eğrisi çizdirildi. Söz konu egride kuvvetin ulaştığı en yüksek değere karşılık gelen çökme değeri Erichsen indeksi (Ei) olarak alındı. Elde edilen en yüksek kuvvet ve Ei değerleri en az üç ölçümün ortalaması alınarak belirlendi. Deney sonrasında örnek yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelendi.



Şekil 14. (a) EKA işlemi uygulanmış kütsel numune içerisinde metalografi, çekme, çentik darbe ve Erichsen örneklerinin konumu, (b) EKASE işlemi uygulanmış sac numune içerisinde metalografi, çekme ve Erichsen örneklerinin konumu, (c) Kütsel formda IF-çeliğinden çıkarılan çekme örneğinin boyutları, (d) Sac formundaki IF çeliğinden çıkarılan çekme örneğinin boyutları, (e) Kütsel formda IF-çeliğinden çıkarılan çentik-darbe örneğinin boyutları



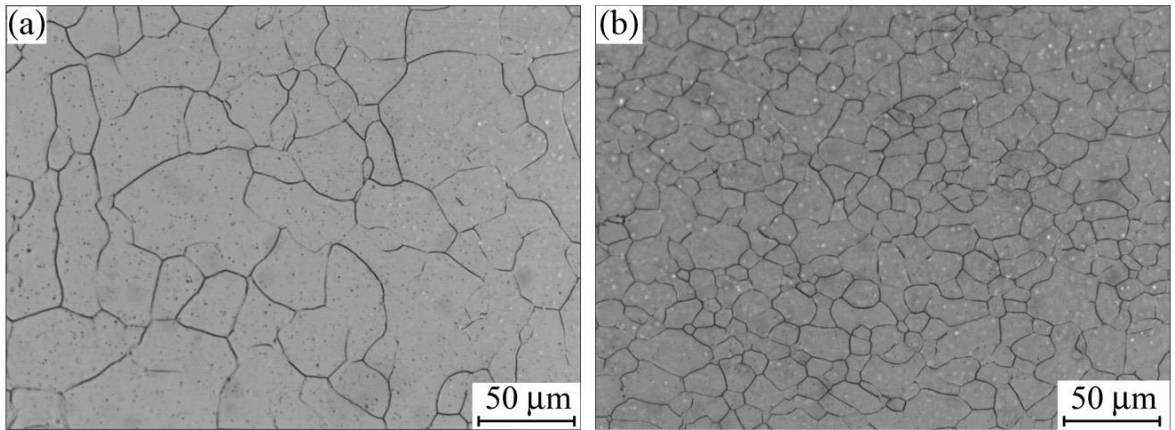
Şekil 15. (a) Şekillendirilebilirlik deneylerinin yapıldığı Erichsen deney kalıbının şematik gösterimi, (b) kütsel formda IF-çeliğinden çıkarılan Erichsen örneğinin boyutları

### 3. BULGULAR

#### 3.1. İçyapı

##### 3.1.1. İşlem Öncesi Durum

Kütlesel ve sac formdaki IF-eliğinin EKAE işlemi uygulanmamış durumdaki içyapısına ait optik mikroskop resimleri Şekil 16(a)-(b)'de gösterilmiştir. Söz konusu içyapı resimleri incelendiğinde, işlem öncesi durumdaki IF-eliğinin eş-eksenli ve iri ferrit tanelerinden oluşan bir içyapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca bu resimlerden, kütlesel ve sac formlardaki IF-eliğinin ortalama tane boyutları ise sırasıyla  $30\pm 10\ \mu\text{m}$  ve  $15\pm 4\ \mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir. İki durum arasındaki bu tane boyutu farkı, kütlesel ve sac formdaki IF-eliğinin üretim sürecinden kaynaklanmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi, kütlesel formdaki IF-eliği sıcak haddeleme ile üretilirken, sac formdaki elik ise soğuk haddelendikten sonra sürekli tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Dolayısıyla yüksek haddeleme sıcaklığı ve süresi kütlesel formdaki IF-eliğinin yeniden kristalleşmesine ve belli oranda tane büyümesine neden olurken, sac formundaki çelikte bu etki daha düşük seviyelerde kalmıştır. Bu nedenle, sac formda nispeten daha küçük boyutlarda tanelerden oluşan bir içyapı ortaya çıkmıştır.



Şekil 16. IF-eliğinin EKAE işlemi öncesi içyapılarını gösteren optik resimler: (a) Kütlesel form, (b) sac form



### 3.1.2. İşlem Sonrası Durum

#### 3.1.2.1. Kütlesel Formdaki IF-Çeliği

Kütlesel formdaki IF-çeliğine farklı rota ve paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrası oluşan içyapıları gösteren TEM resimleri Şekil 17-26'da gösterilmiştir. Ayrıca bu şekillerde, ilgili içyapıya ait difraksiyon desenleri de verilmiştir. Verilen içyapı resimleri genel olarak incelendiğinde, farklı rotalarda uygulanan çok pasolu EKAE işleminin iri taneli IF-çeliğinin tane boyutunu önemli ölçüde küçülttüğü ve sonuçta mikron-altı mertebede ultra-ince tanelerden (UİT) meydana gelen bir yapının oluştuğu görülmektedir. Bu durumu daha iyi ortaya koyabilmek için mevcut TEM resimlerinden elde edilen ortalama tane boyutu değerleri Tablo 5'de verilmiştir. Bu tabloda verilen değerler yakından incelendiğinde, uygulanan bir pasoluk EKAE işleminin önemli oranda tane incelmesine neden olduğu ve işlem öncesi durumda 30 µm olan tane boyutunu 1,4 µm (1400 nm) değerine kadar incelttiği görülmektedir (Tablo 5). Elde edilen bu tane incelmesi kütlesel formdaki IF-çeliğine farklı rotalarda uygulanan çok pasolu EKAE işlemi sırasında da azalan oranda devam etmektedir. Nitekim rota-A, rota-C ve rota-Bc'de gerçekleştirilen 4 pasoluk EKAE işlemi sonrası elde edilen ortalama tane boyutu değerleri sırasıyla 780 nm, 1200 nm ve 640 nm olarak belirlenmiştir. Paso sayısının (uygulanan deformasyon miktarının) daha da artırılması durumunda ise tane incelmelerinin hala devam ettiği görülmektedir. Şöyle ki, rota-A, rota-C, rota-E ve rota-Bc'de uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemleri sonrası elde edilen ortalama tane boyutu değerleri sırasıyla 550 nm, 820 nm, 530 nm ve 420 nm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlardan, EKAE işlemi sırasında elde edilen tane incelmelerinin büyük oranda ilk paso sonrasında gerçekleştiği ve artan paso sayısı ile bu incelmenin azalan oranda devam ettiği anlaşılmaktadır. Öte yandan, işlem sırasında kullanılan EKAE rotasının ise elde edilen ortalama tane boyutu üzerinde belli oranda etkili olduğu söylenebilir. Nitekim farklı rotalarda uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrasında en ince taneli içyapının rota-Bc'de ve en iri taneli içyapının ise rota-C'de gerçekleştirilen işlemler sonrasında elde edildiği görülmektedir.

EKAE sonrası elde edilen TEM resimlerine morfolojik açıdan bakıldığında ise oluşan içyapının uygulanan işlem rotasına ve paso sayısına bağlı olarak belli oranda yönelme etkisi gösterdiği ve tanelerin belli doğrultularda uzadığı söylenebilir. Nitekim uygulanan bir pasoluk EKAE işlemi sonrası tanelerin kayma düzlemi boyunca yönelmiş olduğu açıkça gözlenmektedir (Şekil 17). Ayrıca, özellikle rota-A'da uygulanan EKAE

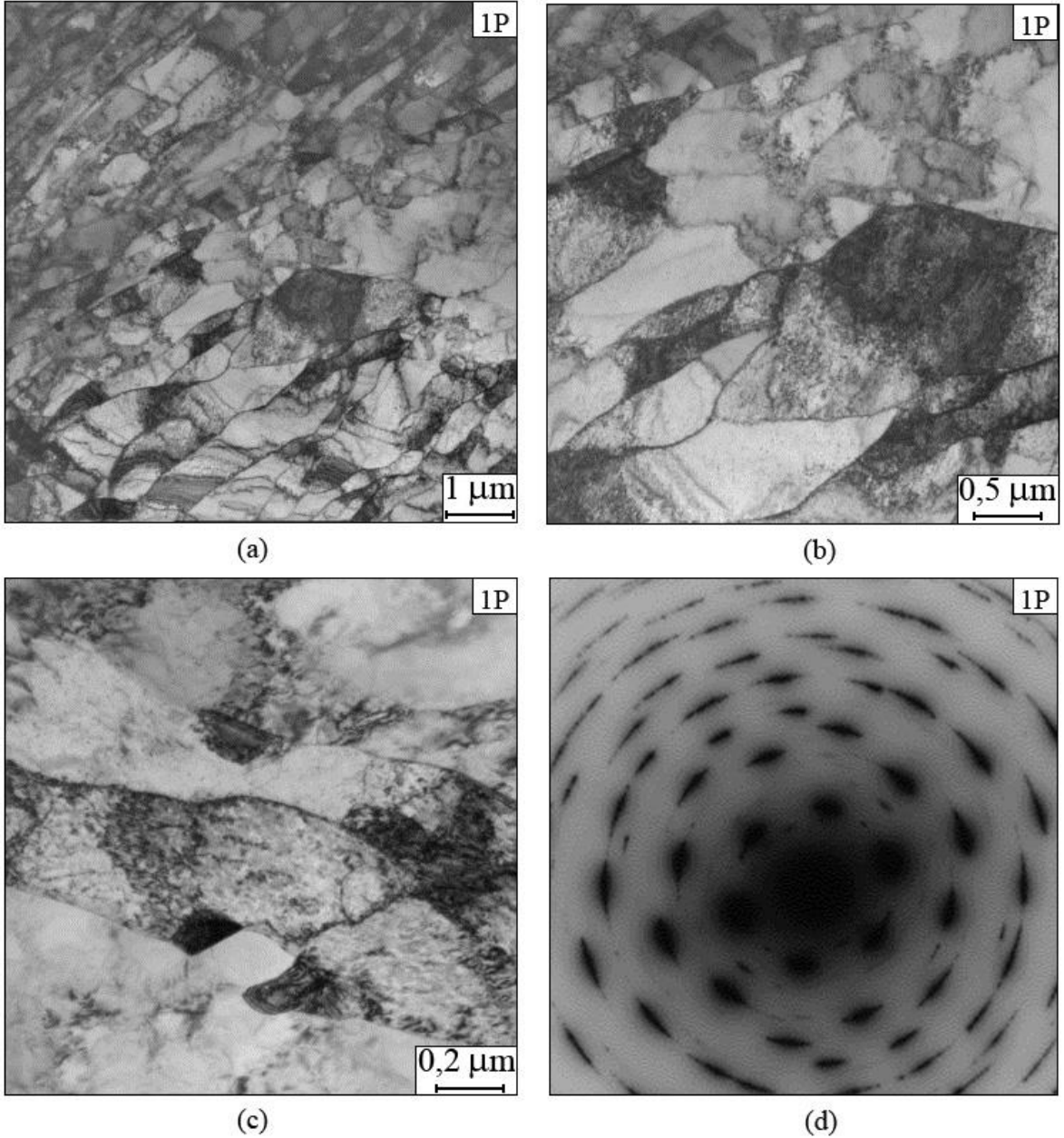
işleminde bu etki paso sayısı arttıkça belirginleşerek devam etmektedir. Buna göre, hem 4 paso sonrasında (Şekil 20) hem de 8 paso sonrasında (Şekil 23) elde edilen içyapıda tanelerin büyük oranda yönlendirilmiş durumda olduğu görülmektedir. Bu yönlendirme tanelerin eni ve boyu arasında önemli bir farklılık ortaya çıkarmaktadır. Nitekim bir paso sonrasında yaklaşık 1030 nm olarak ölçülen ortalama tane eni, uygulanan 2, 4 ve 8 paso sonrasında sırasıyla 500 nm, 450 nm ve 320 nm olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde bir paso sonrasında yaklaşık 1950 nm olarak ölçülen tane boyu ise, uygulanan 2, 4 ve 8 paso sonrasında sırasıyla 1980, 1100 ve 770 nm değerine almıştır. Buna göre, 8 paso sonrasında tane boyunda, %250 inceleme ortaya çıkarken, tane eninde bu değer %320 olarak belirlenmiştir. Bu durum söz konusu rotada tane incelmesinin enine doğrultuda daha etkin bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Tane eninde ortaya çıkan incelmenin tane boyunda ortaya çıkan incelmeden daha fazla olması, söz konusu işlem rotasının uygulanması sırasında numunenin pasolar arasında döndürülmeden işleme devam edilmesinden kaynaklanmaktadır (Şekil 3). Uygulanan diğer rotalarda ise durum biraz daha farklılık arz etmektedir. Rota-Bc'de uygulanan 4 ve 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası tane yapısının daha çok eş-eksenli bir durum sergilediği ve bunun 8 paso sonrası daha da belirgin bir şekilde ortaya çıktığı söylenebilir (Şekil 22 ve 25). Söz konusu rotada numuneler her paso arasında 90° çevrilmekte ve dolayısıyla taneler bir sonraki pasoda uzama yerine zıt yönde kısalmakta ve bu da tane yapısının çift numaralı pasolarda toparlanmasına neden olmaktadır. Sonuçta rota-Bc'de yapılan işlem sonrası nispeten daha eş-eksenli tanelerden oluşan bir içyapı oluşmaktadır [37]. Rota-C'de uygulanan EKAE işlemi ise, uygulanan her iki pasoluk işlem sonrası tane yapısının toparlanmasını gerektirdiğinden, artan paso sayısı nispeten daha eş-eksenli tanelerden oluşan bir içyapının oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 24) [37]. Rota-E'de 8 paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrası ise yine büyük oranda eş-eksenli tanelerden oluşan bir içyapı oluşmaktadır (Şekil 26). Ayrıca TEM resimleri yakından incelendiğinde, rota-A hariç diğer rotalarda artan paso sayısı ile beraber yapısal homojenliğin de (tane boyutu ve morfolojisi) arttığı ve içyapının daha çok eş-eksenli bir tane yapısına doğru gidiş gösterdiği söylenebilir (Şekil 17-26). Bu durum Tablo 5'de verilen saçılım değerlerinden de anlaşılmaktadır.

Verilen TEM resimleri içerdiği dislokasyon açısından değerlendirildiğinde, uygulanan EKAE işleminin içyapıda dislokasyon birikimine neden olduğu söylenebilir. Nitekim, bir pasoluk EKAE işlemi sonrası dislokasyon yoğunluğunun işlem öncesi duruma

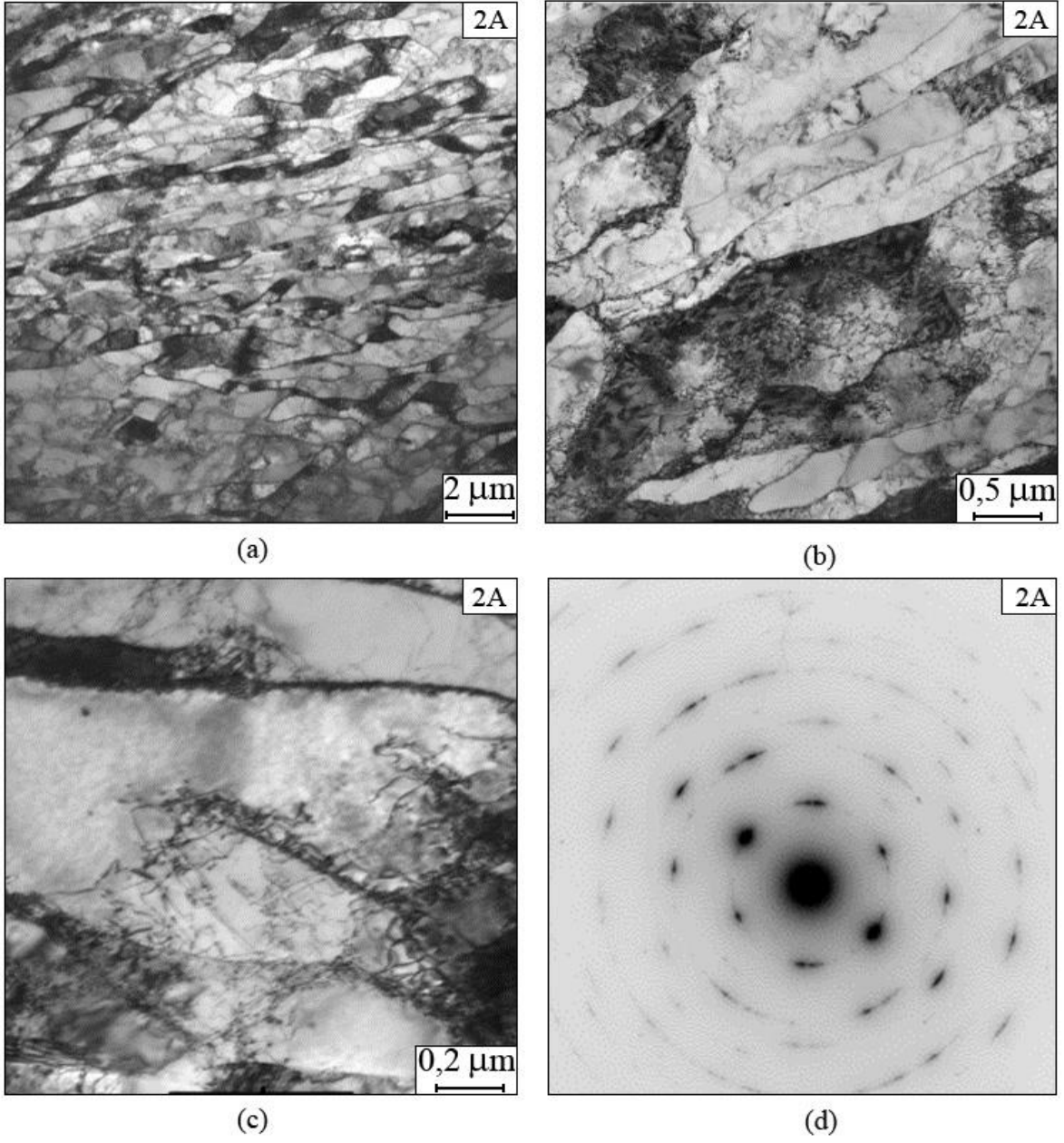
göre çok büyük oranda arttığı, bu artışın bütün rotalarda artan paso sayısı ile azalarak devam ettiği söylenebilir. Öte yandan, içyapıdaki dislokasyon dağılımının homojen olmadığı ve dislokasyonların daha çok tane ve alt tane sınırlarında biriktiği de dikkati çekmektedir. Bu nedenle, tane sınırlarından tane içerisine doğru gidildikçe dislokasyon yoğunluğunun hızlı bir şekilde azaldığı ve neredeyse dislokasyonsuz tane içi bölgelerin olduğu görülmektedir. Bu durum bütün rotalar sonrası elde edilen yüksek büyültmeli TEM resimlerinden de açıkça görülmektedir (Şekil 17(c)-25(c)).

EKAE sonrasında elde edilen tane incilmesi dislokasyonların oluşturduğu sınırların gelişimiyle sağlanmaktadır. Dislokasyonların oluşturduğu sınırlar, ayırdıkları bölgeler arasındaki kristalografik yöneliminin  $15^\circ$ 'den küçük ve büyük olmaları durumunda sırasıyla dar açılı tane sınırı (DATS) ve geniş açılı tane sınırı olarak (GATS) adlandırılmaktadır. EKAE sonrası elde edilen difraksiyon desenleri incelendiğinde, uygulanan paso sayısı ve işlem rotasına bağlı olarak yapıdaki tane sınırı karakterinde farklılıkların ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. Nitekim bir pasoluk işlem sonrasında elde edilen difraksiyon desenleri daha çok nokta biçiminde ortaya çıkmıştır (Şekil 17(d)). Bu durum, bir paso sayısında uygulanan işlem sonrasında elde edilen tane sınırlarının daha çok DATS karakterinde olduğunu göstermektedir. Benzer yapıdaki difraksiyon desenleri rota-A ve rota-C'de 2 paso sayısında uygulanan işlem sonrasında da görülmektedir (Şekil 18(d) ve 19(d)). Artan paso sayısı ile birlikte, elde edilen difraksiyon şekillerinin nokta formundan uzaklaştığı ve yörünge boyunca yayılarak halka biçimine dönüştükleri söylenebilir. Bu durum 4 paso (Şekil 20(d)-22(d)) ve 8 paso (Şekil 23(d)-26(d)) sayılarında uygulanan işlem sonrasında elde edilen difraksiyon desenlerinde de açık bir şekilde görülmektedir. Nitekim, paso sayısı arttıkça içyapıda oluşturulan tane sınırlarının GATS karakterine dönüştüğü ilgili difraksiyon desenlerinden anlaşılmaktadır. Öte yandan aynı paso sayısında ancak farklı rotalarda uygulanan EKAE işlemleri sonrasında elde edilen difraksiyon desenlerinde de farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bu durum, farklı rotalarda uygulanan 8 pasoluk işlem sonrasında elde edilen difraksiyon desenlerinde de açık bir şekilde görülmektedir. Nitekim rota-Bc ve rota-E'de uygulanan 8 pasoluk işlem sonrasında büyük oranda halka biçimine dönüşmüş bir difraksiyon karakteristiği elde edilmiştir (Şekil 25(d) ve 26(d)). Buna karşın, rota-A ve rota-C'de 8 paso sayısında uygulanan işlem sonrasında elde edilen difraksiyon desenlerindeki yayılmanın daha az olduğu görülmektedir (Şekil 23(d) ve 24(d)). Bu durum, rota-Bc ve rota-E'de 8 paso sayısında uygulanan işlem sonrasında oluşan GATS oranının, rota-A ve rota-C'de aynı paso

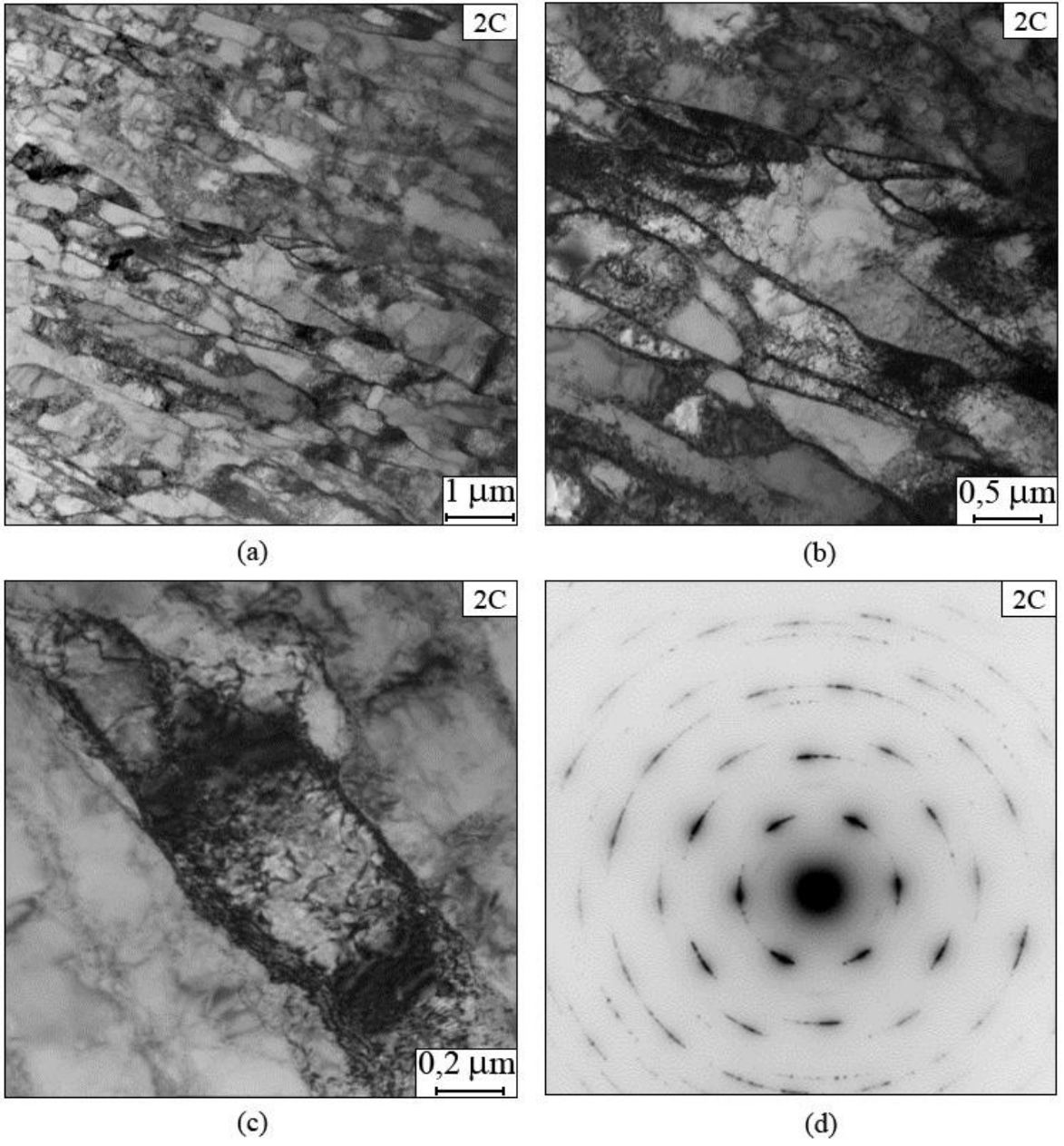
sayısında oluşan GATS oranına göre daha yüksek olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu sonuç Tablo 5’de verilen ortalama tane boyutu değerleri ile de uyumluluk göstermektedir. Nitekim rota-Bc ve rota-E’de 8 paso sayısında uygulanan işlem sonrasında elde edilen ortalama tane boyutu değeri, rota-A ve rota-C’de aynı paso sayısında elde edilen tane boyutundan daha küçüktür.



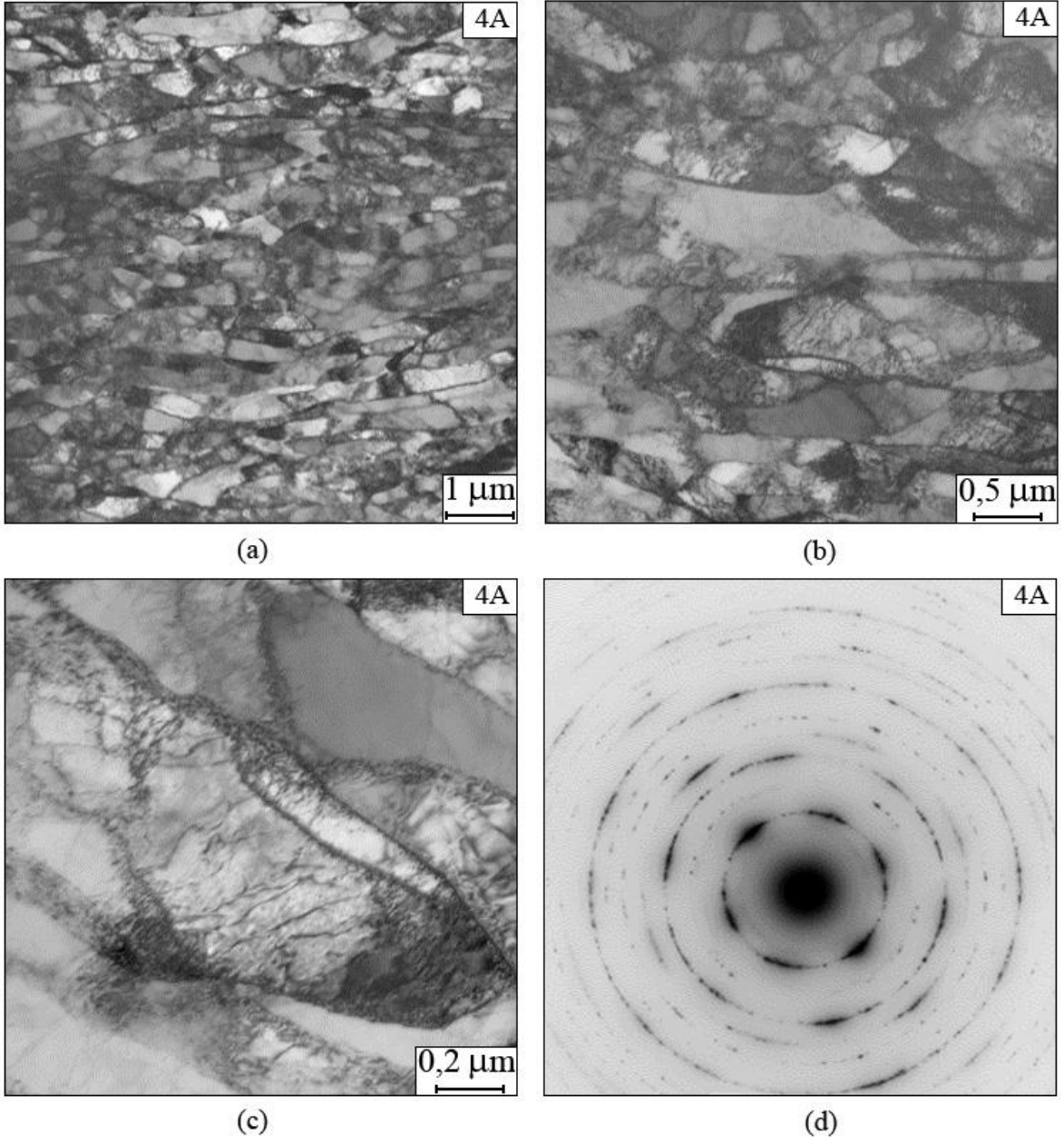
Şekil 17. Kütlesel formdaki IF-çeliğine uygulanan bir pasoluk EKAE işlemi sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri: a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) ilgili içyapıya ait difraksiyon deseni



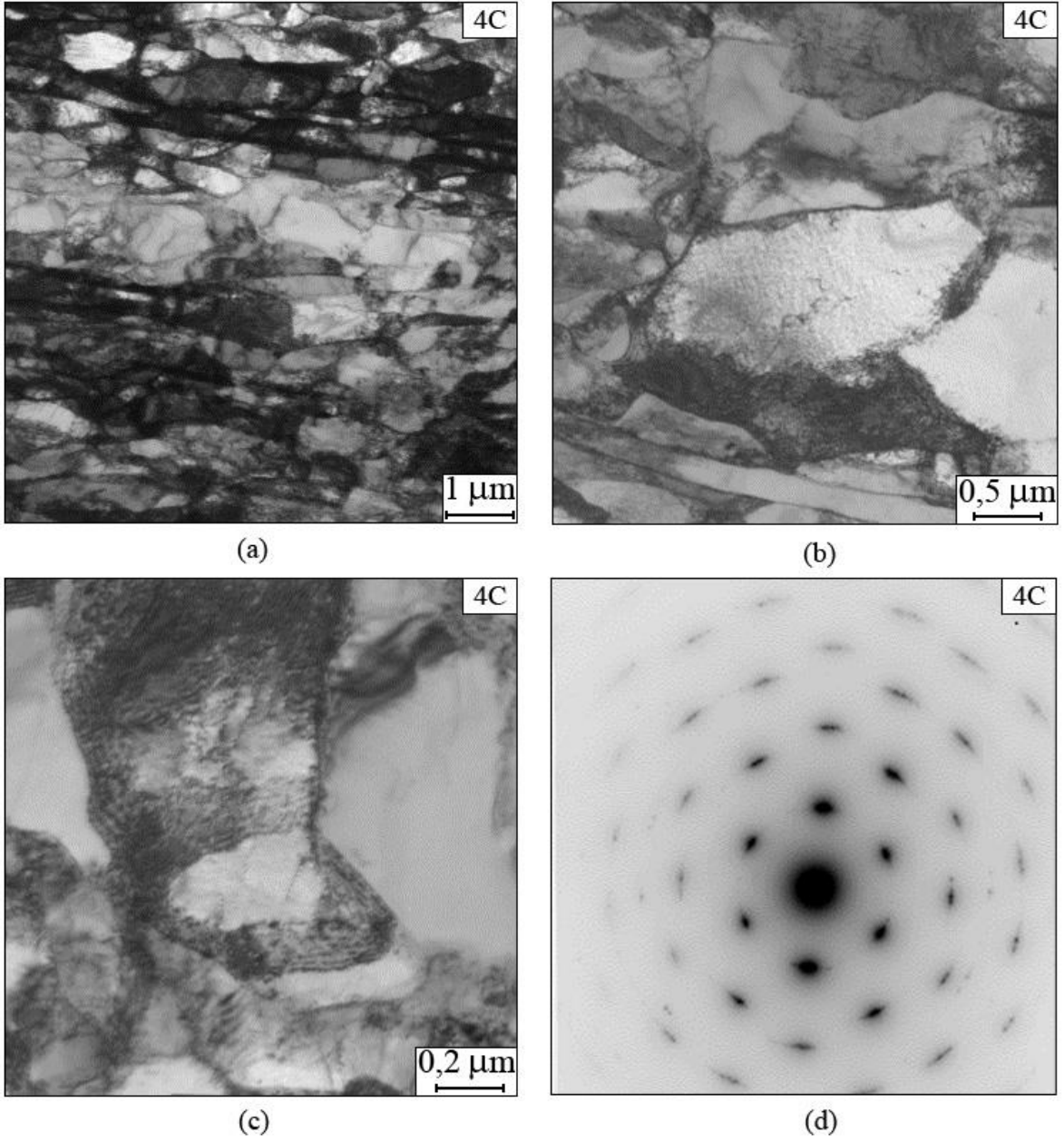
Şekil 18. Kütleli formdaki IF-çeliğine rota-A'da uygulanan 2 pasoluk EKAЕ işleminin sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri: (a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) ilgili difraksiyon deseni



Şekil 19. Kütleli formdaki IF-çeliğine rota-C’de uygulanan 2 pasoluk EKAЕ işlemi sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri (a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) ilgili difraksiyon deseni

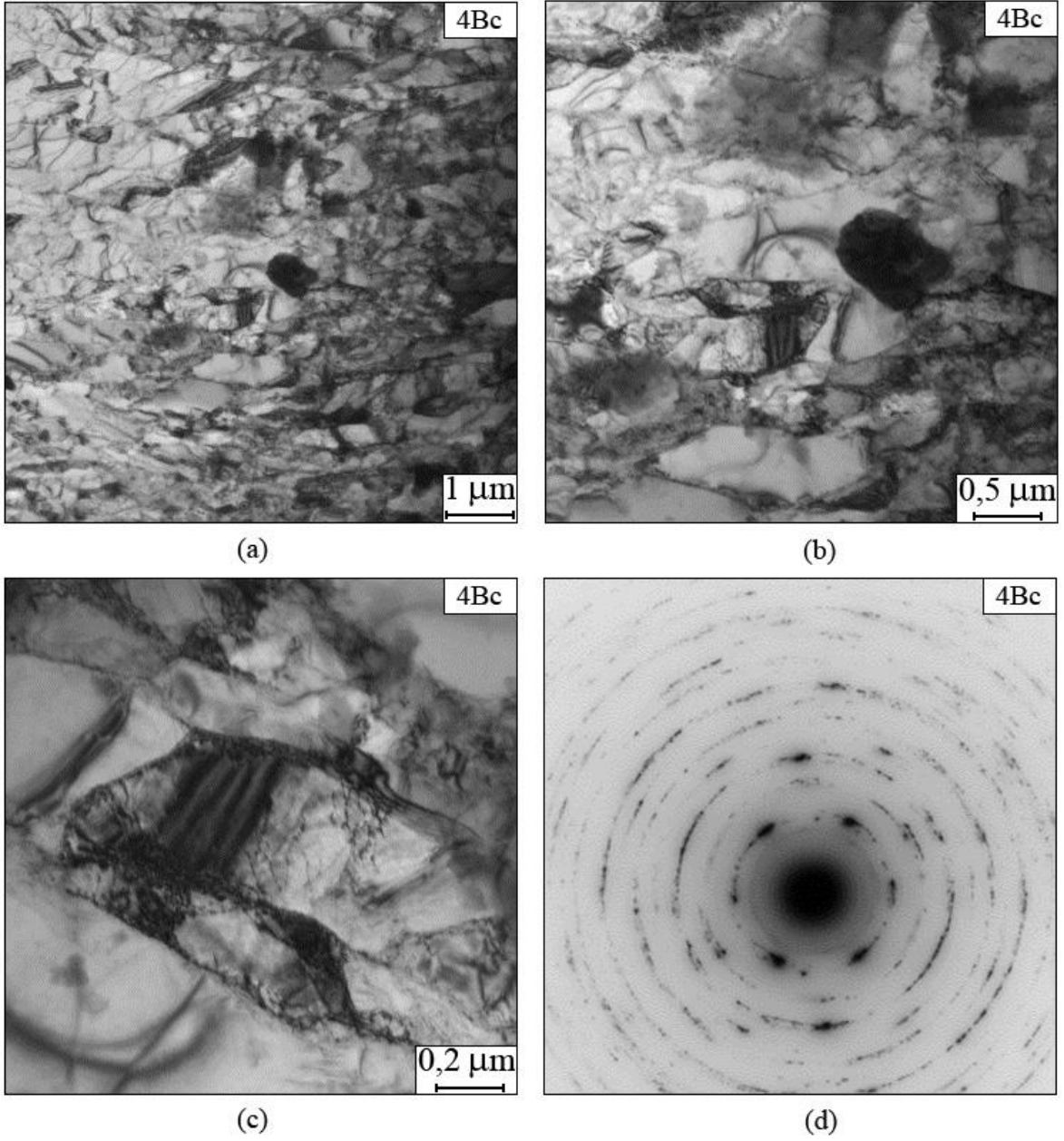


Şekil 20. Kütleli formdaki IF-çeliğine rota-A’da uygulanan 4 pasoluk EKAЕ işlemi sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri: (a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) ilgili difraksiyon deseni

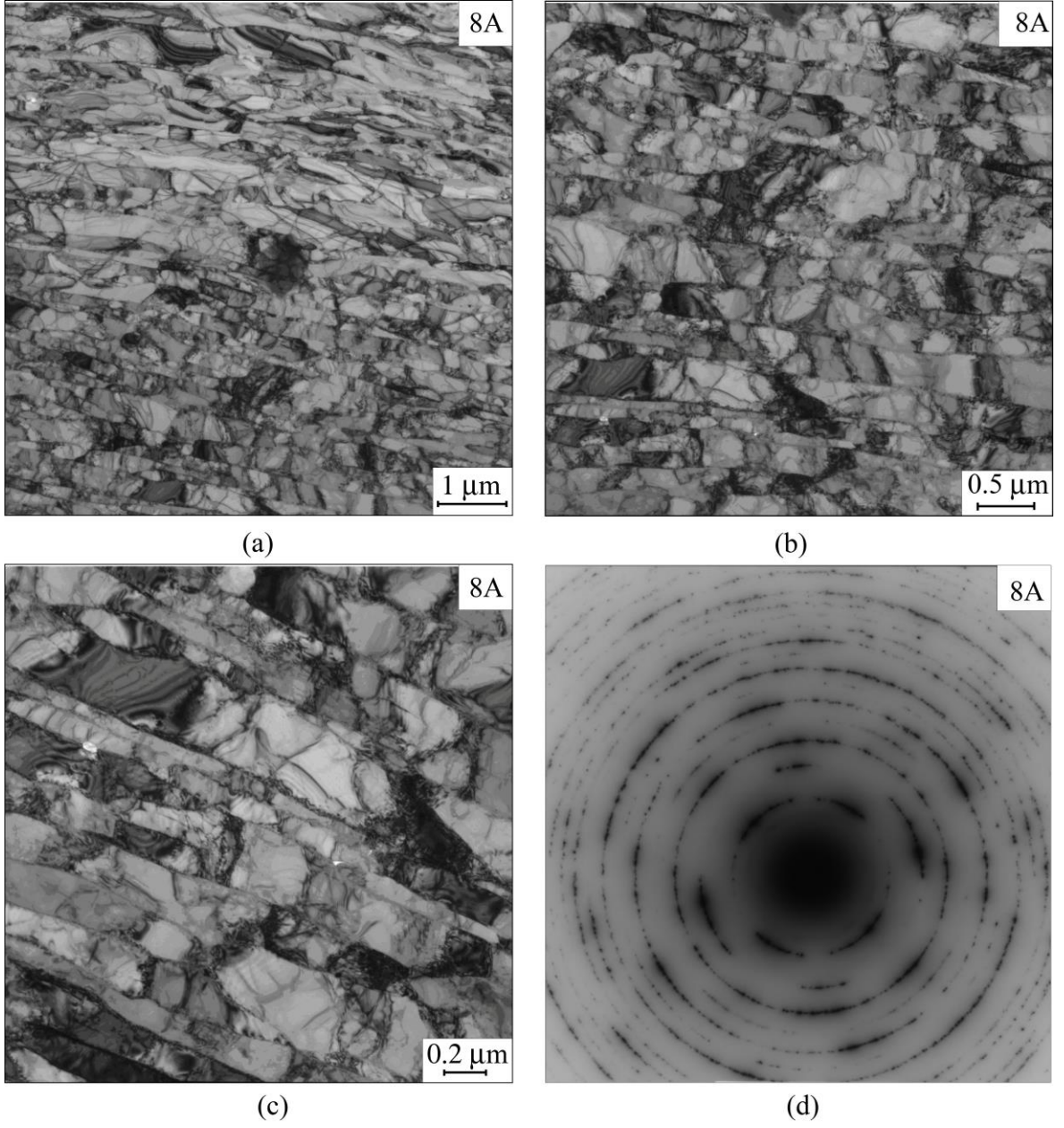


Şekil 21. Kütleli formdaki IF-çeliğine rota-C’de uygulanan 4 pasoluk EKAЕ işleminin sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri: (a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) ilgili difraksiyon deseni

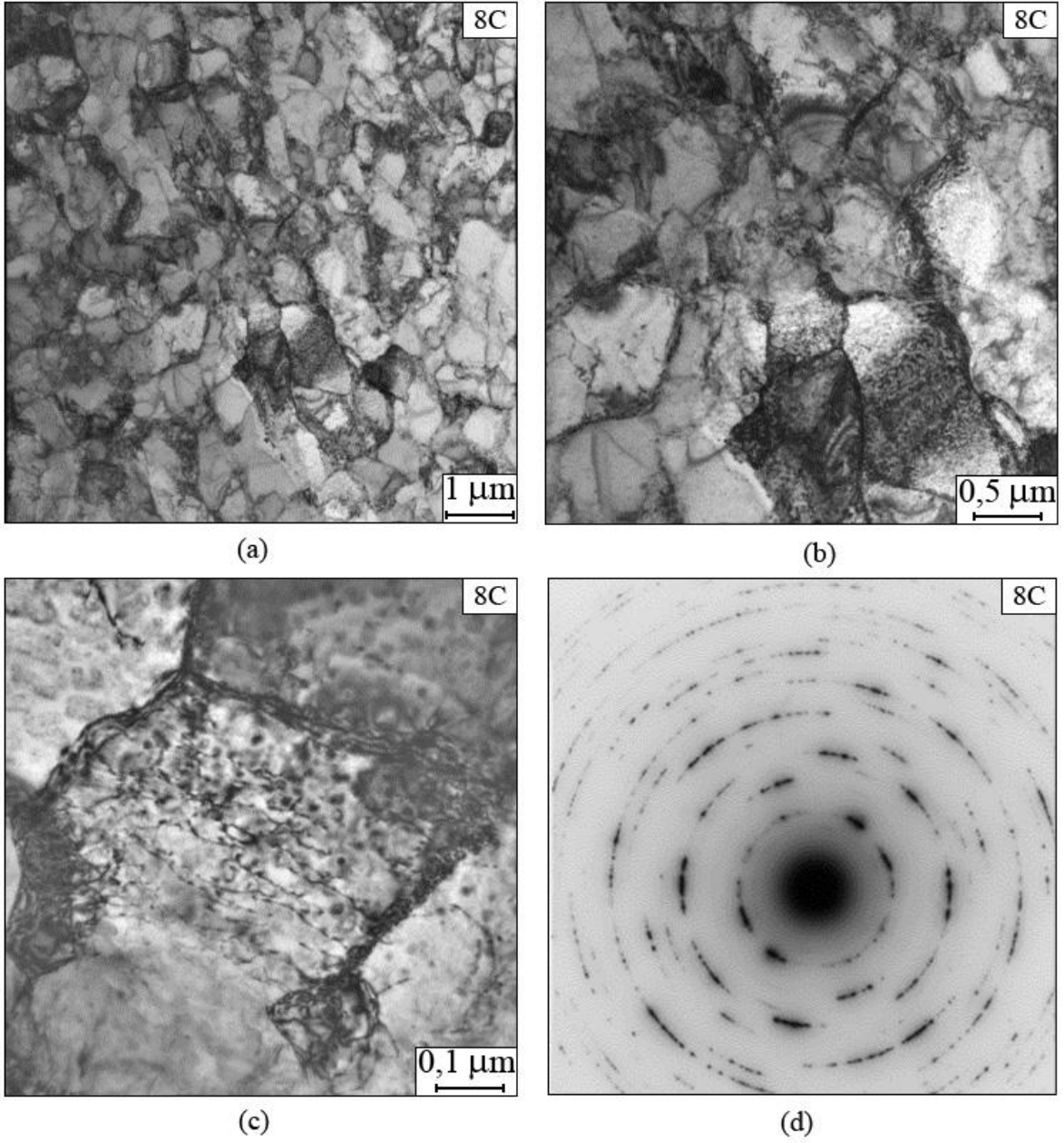




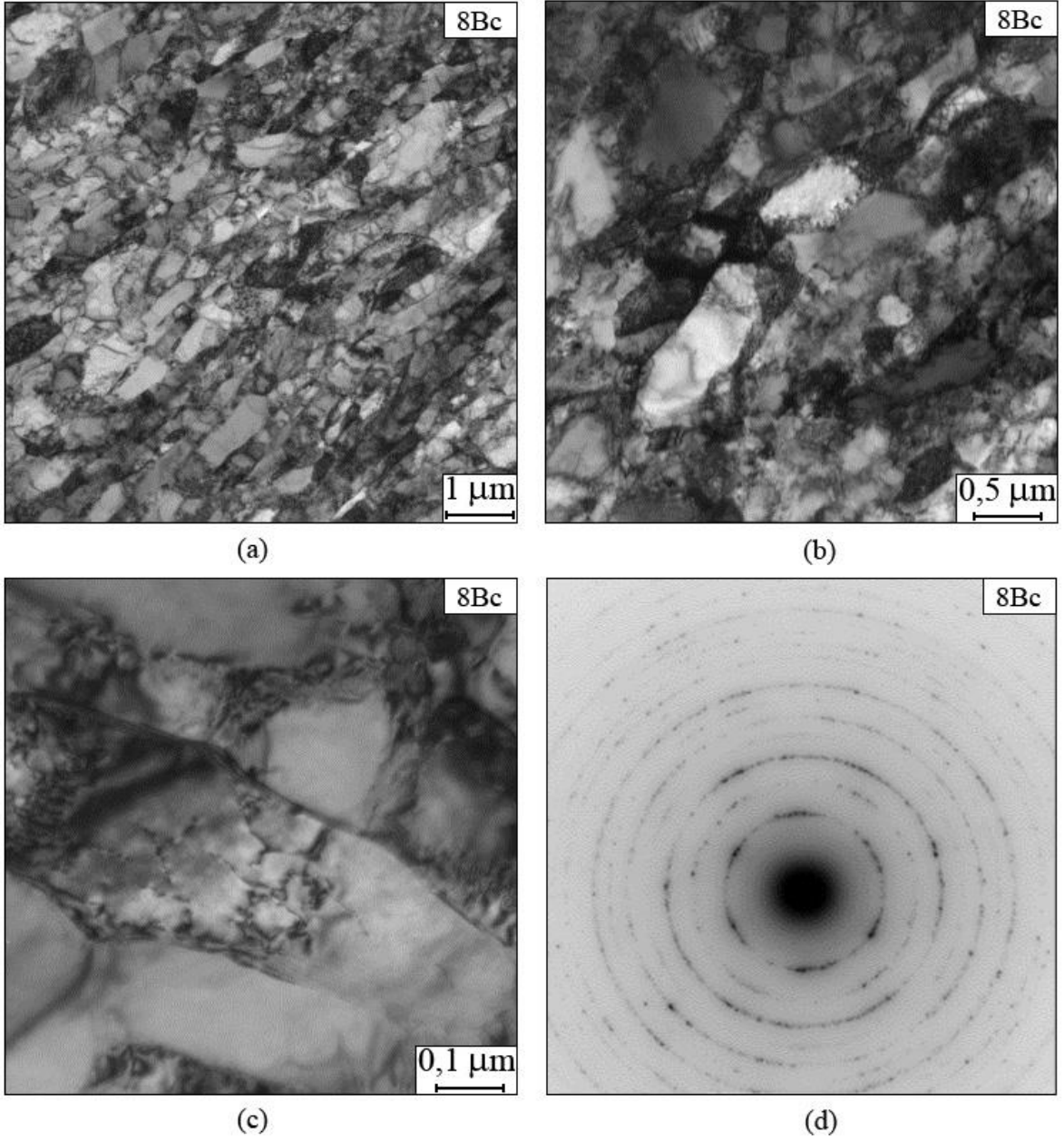
Şekil 22. Kütleli formdaki IF-çeliğine rota-Bc'de uygulanan 4 pasoluk EKAЕ işleminin sonrası oluşan iç yapıyı gösteren TEM resimleri ve ilgili difraksiyon deseni: (a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) ilgili difraksiyon deseni



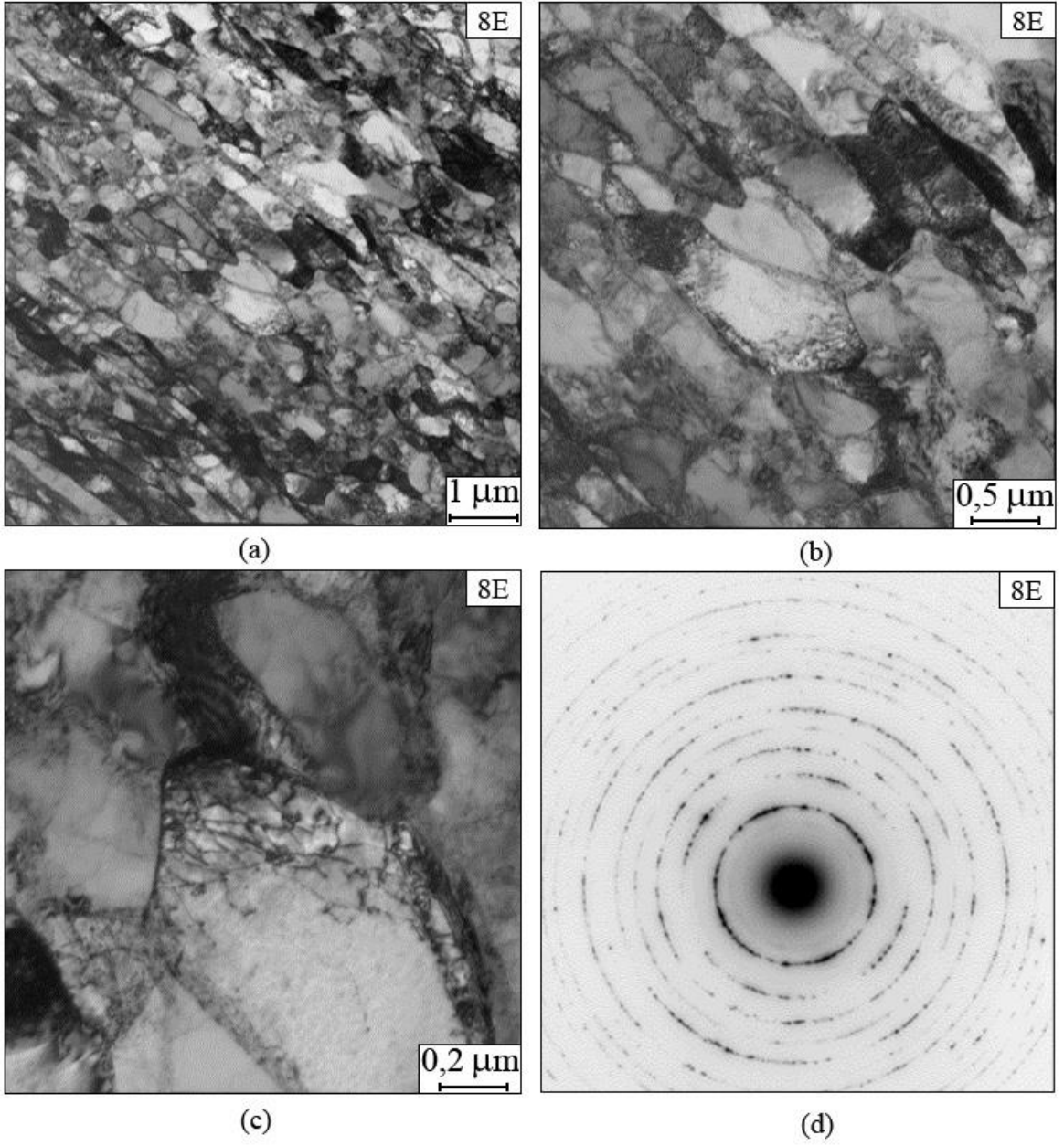
Şekil 23. Kütleli formdaki IF-çeliğine rota-A'da uygulanan 8 pasoluk EKAЕ işlemi sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri: (a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) ilgili difraksiyon deseni



Şekil 24. Kütlesel formdaki IF-çeliğine rota-C’de uygulanan 8 pasoluk EKAET işlemi sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri: (a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) ilgili difraksiyon deseni



Şekil 25. Kütleli formdaki IF-çeliğine rota-Bc'de uygulanan 8 pasoluk EKAET işlemi sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri: (a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) difraksiyon deseni



Şekil 26. Kütlesel formdaki IF-çeliğine rota-E’de uygulanan 8 pasoluk EKAÉ işlemi sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri: (a) Düşük büyültme, (b) orta büyültme, (c) yüksek büyültme ve (d) ilgili difraksiyon deseni

Tablo 5. Kütleli formda IF-çeliğine değişik rota ve paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrası ölçülen ortalama tane boyutu değerleri

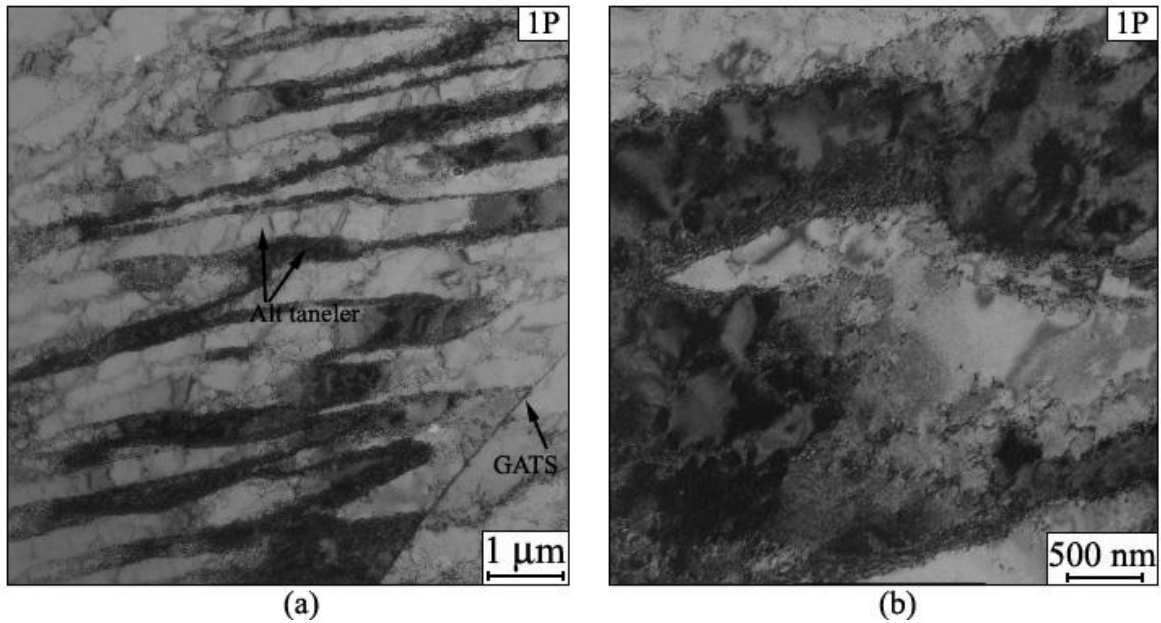
İşlem durumu		Tane boyutu (nm)						Genel ortalama (nm)
		Boy			En			
İşlem rotası	Paso sayısı	Maks.	Min.	Ortalama	Maks	Min	Ortalama	
		0	30000 (30±10 µm)					
	1	3930	930	1950	2190	640	1030	1400
Rota-A	2	4720	880	1980	650	270	500	1240
	4	2220	520	1100	860	195	450	780
	8	2000	420	770	420	190	320	550
Rota-C	2	3780	740	1930	1240	370	720	1330
	4	2350	540	1480	1860	400	920	1200
	8	1600	590	950	940	530	690	820
Rota-Bc	4	1510	490	830	720	270	450	640
	8	1010	200	510	660	200	360	420
Rota-E	8	840	240	620	710	220	440	530

### 3.1.3 Sac Formdaki IF-Çeliği

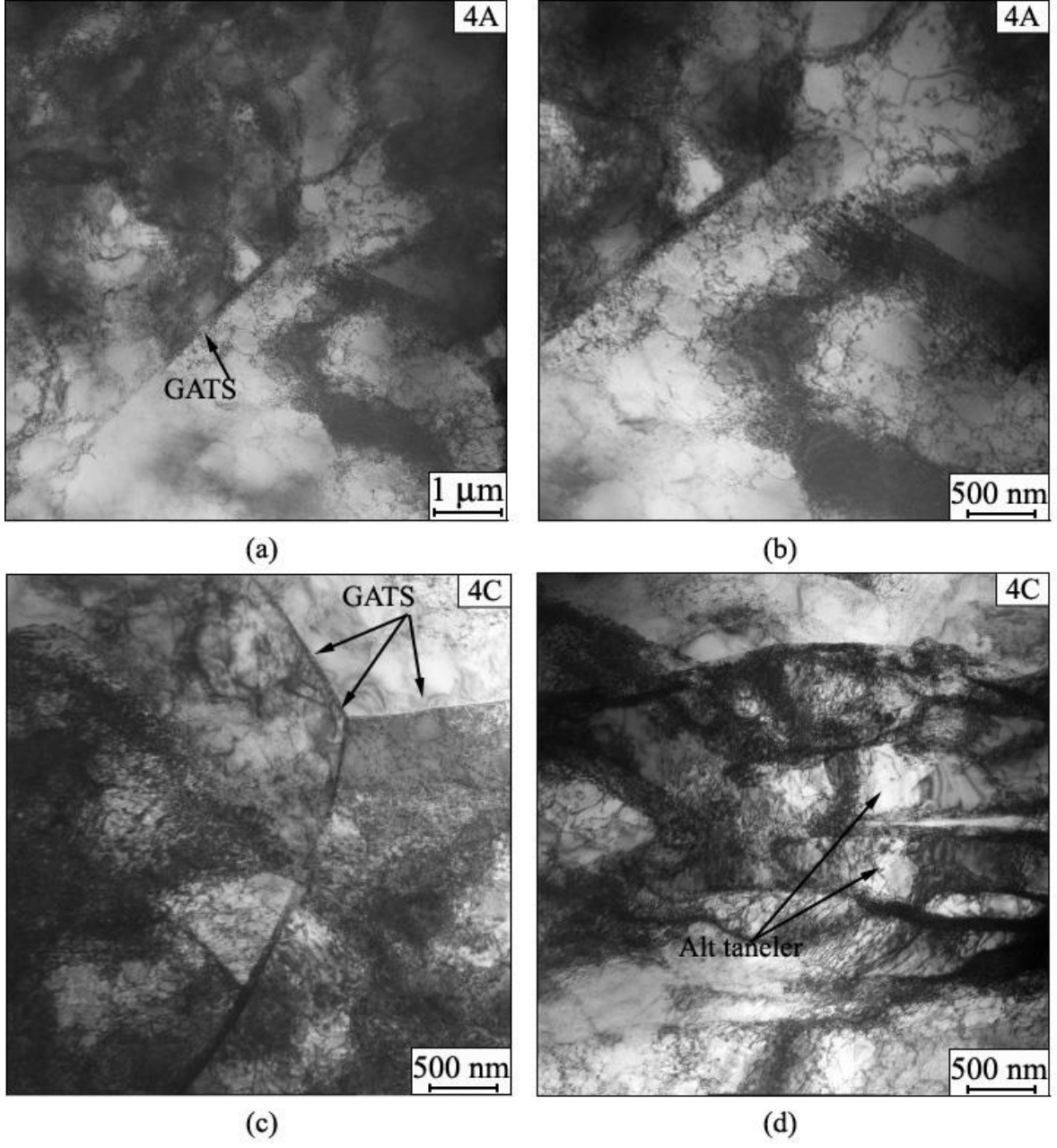
Sac formdaki IF-çeliğine uygulanan bir pasoluk eş kanallı açısız sac ekstrüzyon (EKASE) işlemi sonrasında oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri Şekil 27'de verilmiştir. Rota-A ve rota-C'de 4 paso sayısında uygulanan EKASE işlemi sonrası oluşan içyapıları gösteren TEM resimleri ise sırasıyla Şekil 28(a)-(b) ve Şekil 28(c)-(d)'de gösterilmiştir. Şekil 29'da ise rota-A ve rota-C'de 8 paso sayısında uygulanan EKASE işlemi sonrasında meydana gelen içyapıları gösteren TEM resimleri verilmiştir. Uygulanan bir pasoluk EKASE işlemi sonrasında, içyapıda dislokasyon hücrelerinin oluşmaya başladığı ve bunların alt-tane sınırlarının meydana gelmesine katkı sağladığı gözükmemektedir (Şekil 27). Ancak oluşan dislokasyon hücrelerinin henüz tane karakterinde olmadığı ve aralarındaki açısız farkın çok düşük olduğu söylenebilir. Öte yandan, bu yapıda işlem öncesi mevcut olan geniş açılı tane sınırlarının (GATS) bir pasoluk işlem sonrasında da varlığını sürdürdüğü gözükmemektedir (Şekil 27(a)). Uygulanan deformasyon miktarı arttıkça (artan paso sayısı) alt tane oluşumunun belirginleşmeye başladığı söylenebilir. Nitekim, rota-A ve rota-C'de uygulanan 4 pasluk EKASE işlemi sonrası içyapıdaki dislokasyon yoğunluğu artmakta ve alt taneler daha belirgin bir şekilde gözükmemektedir (Şekil 28). Ayrıca, ilgili TEM resimlerinde alt tane oluşumunun belli

bölgelerde daha yoğun bir şekilde oluştuğu da dikkati çekmektedir (Şekil 28(c)-(d)). Öte yandan, işlem öncesi durumdan kalan GATS halen içyapıda varlığını belli oranda koruduğu ve oluşmaya başlayan alt tane sınırlarının bunlar üzerinde sonlandığı görülmektedir. Uygulanan 8 pasoluk EKASE işlemi sonrası ise çok daha ince yapıda ve dislokasyon duvarları tarafından çevrilen alt tanelerin oluştuğu açıkça gözlenmektedir (Şekil 29). Bu durum rota-A'da uygulanan 8 pasluk işlem sonrası çok daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır (Şekil 29(a)-(b)). Ayrıca bu yapılarda, dar açılı sınırlara sahip tanelerin henüz tam anlamıyla geniş açılı sınırlara sahip tanelere dönüşemediği ve bu nedenle hala yapıda başlangıç durumdan gelen GATS'larının mevcudiyetini koruduğu dikkati çekmektedir.

İşlem sonrası sac formdaki IF-çeliğinin içyapısında da kütleli formdaki çeliğe benzer şekilde bir dislokasyon dağılımı gözlenmektedir. Şöyle ki, sac malzemede oluşan dislokasyonların da belirgin bir şekilde alt tane sınırları ve buna yakın bölgelerde toplandığı ve tane içi bölgelerin çok az oranda dislokasyon içerdiği söylenebilir. Ancak, dislokasyon yoğunluğunun ve geniş açılı sınırlara sahip tanelerin oluşumunun kütleli formdaki çeliğe göre çok daha yavaş geliştiği ilgili resimlerden açıkça gözükmektedir.

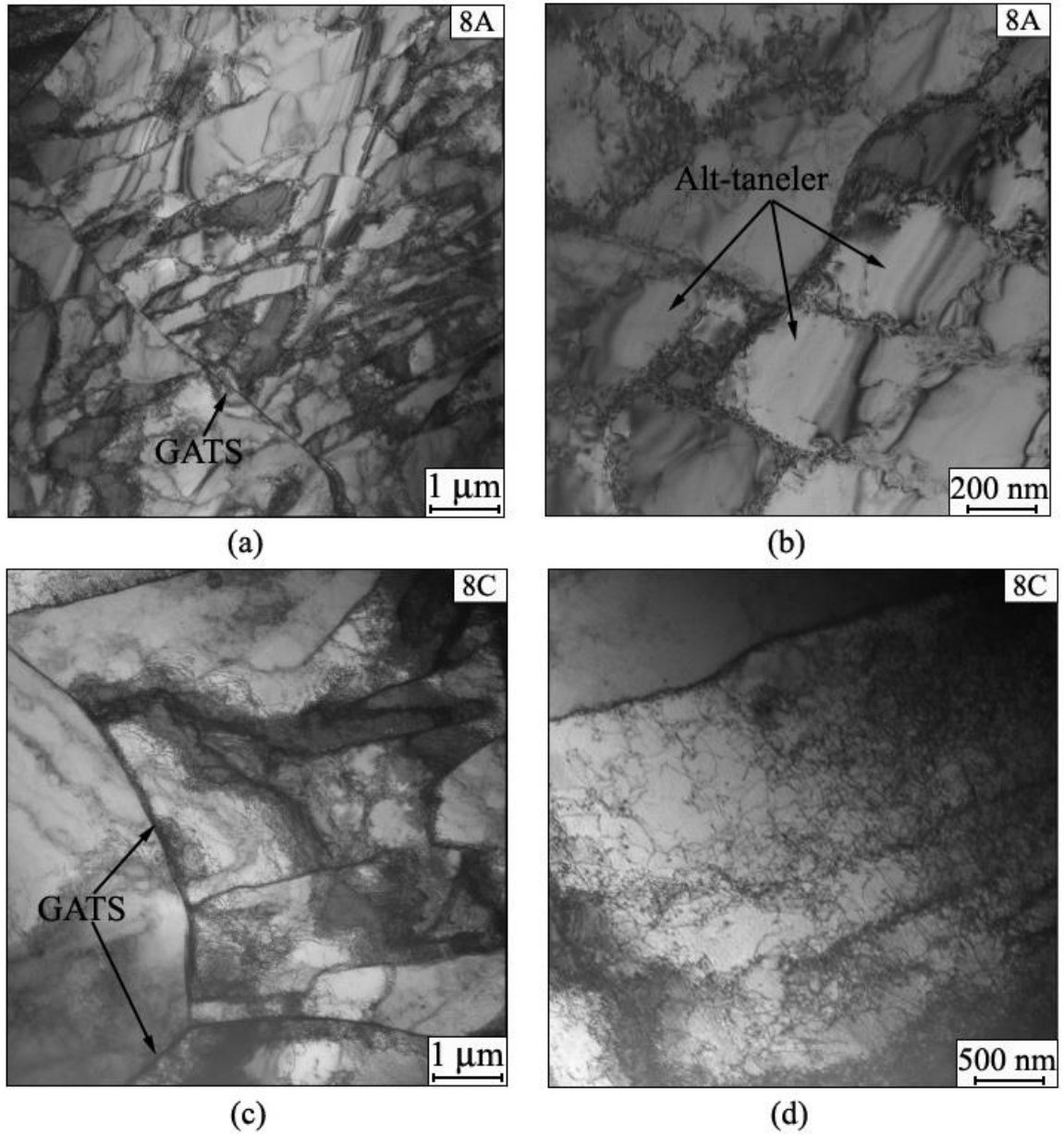


Şekil 27. Sac formundaki IF-çeliğine uygulanan bir pasoluk EKASE işlemi sonrası oluşan içyapıyı gösteren TEM resimleri: (a) düşük büyültme ve (b) yüksek büyültme



Şekil 28. Sac formundaki IF-çeliğine uygulanan 4 pasoluk EKASE işlemi sonrası oluşan içyapıları gösteren TEM resimleri: (a)-(b) rota-A, 4 paso ve (c)-(d) rota-C, 4 paso

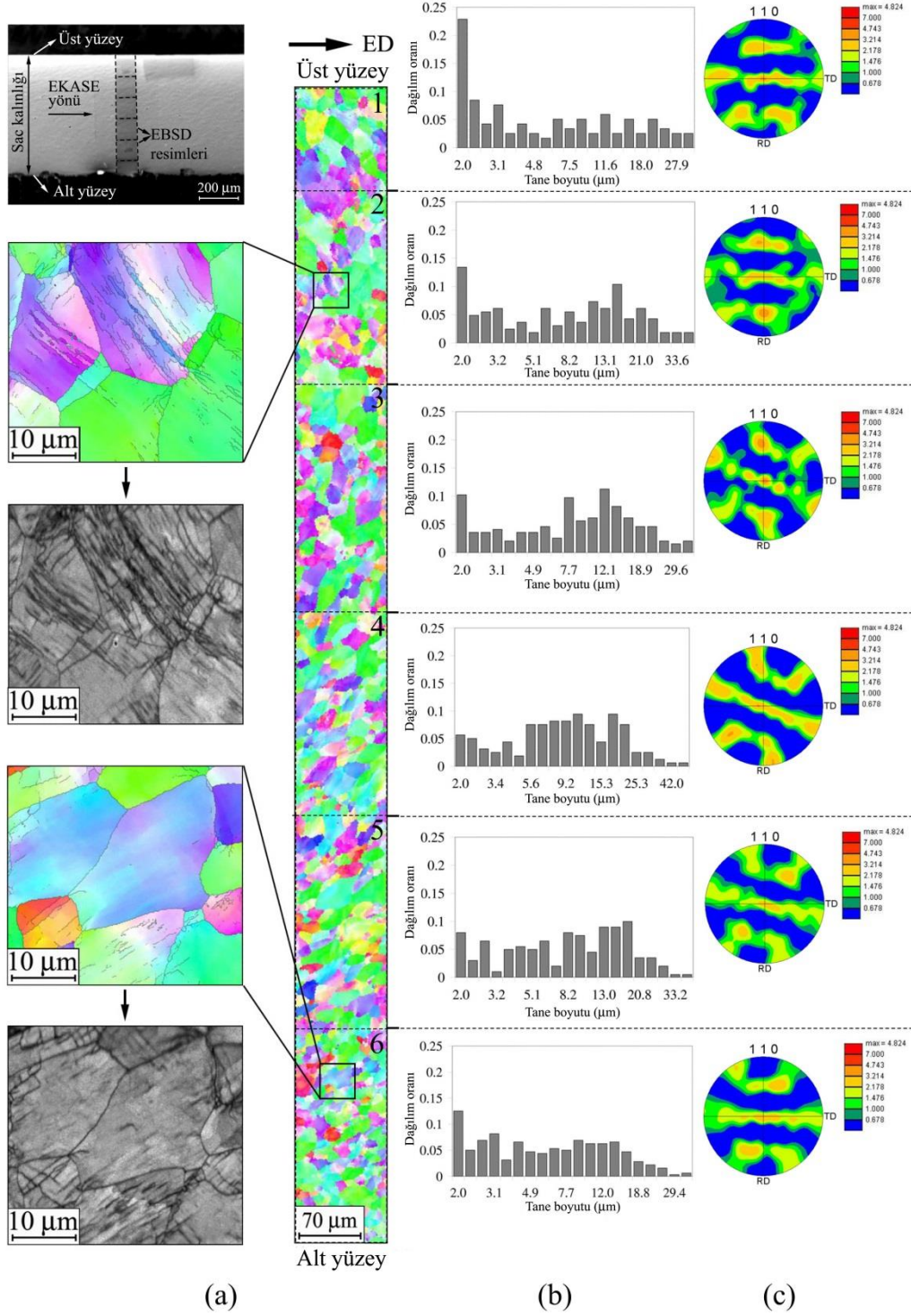




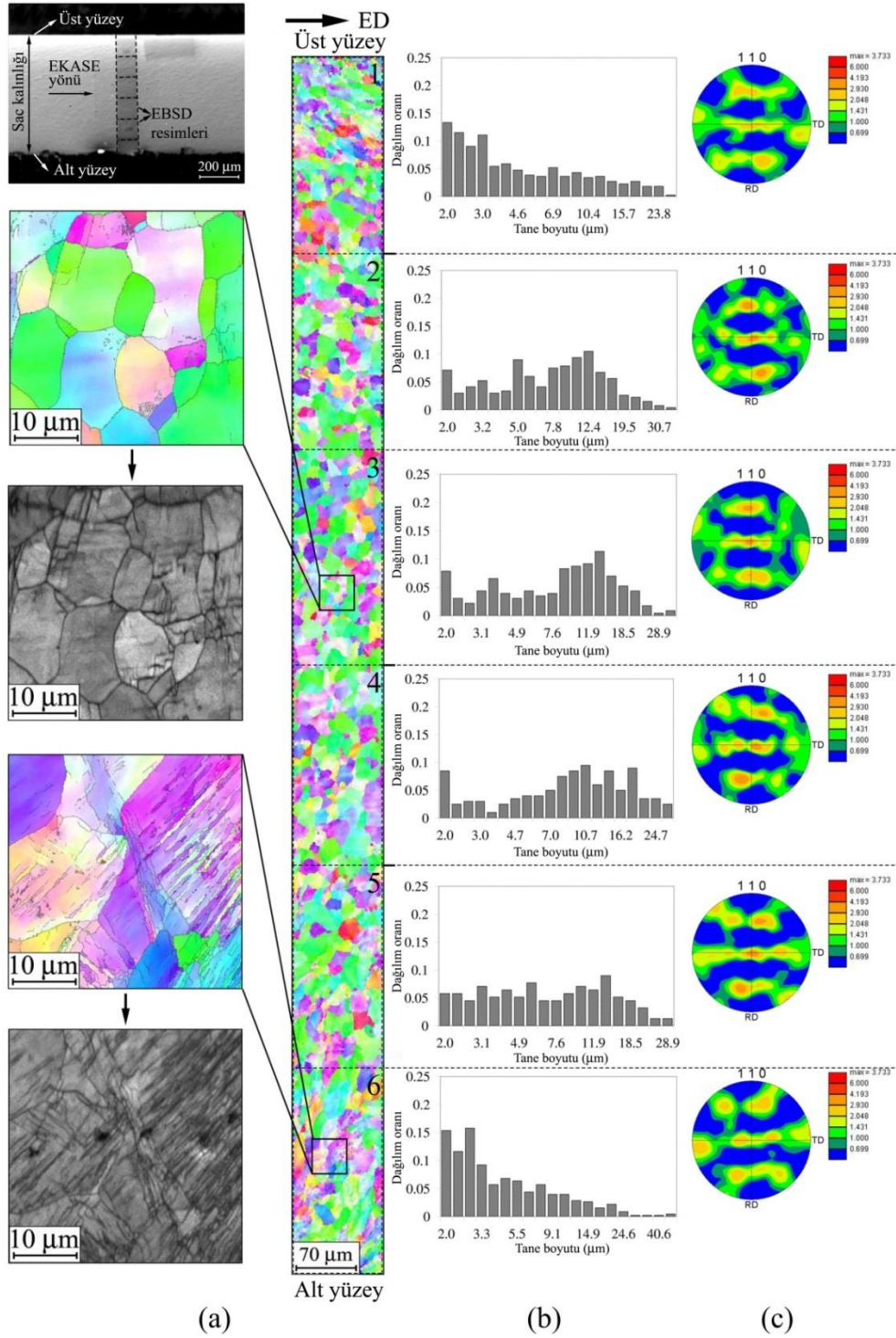
Şekil 29. Sac formundaki IF-çeliğine uygulanan 8 pasoluk EKASE işlemi sonrası oluşan içyapıları gösteren TEM resimleri: (a)-(b) rota-A, 8 paso ve (c)-(d) rota-C, 8 paso

IF-çeliğine uygulanan 8 pasoluk EKASE işlemi sonrası, sac kesiti boyunca meydana gelen deformasyon yapısı elektron geri saçılım difraksiyonu (EBSD) tekniği ile incelendi. Bu inceleme sonucu deforme olan sac kesiti boyunca elde edilen EBSD haritası rota-A ve rota-C için sırasıyla Şekil 30(a) ve Şekil 31(a)'da gösterilmiştir. Ayrıca, sac kesiti boyunca tane boyutu dağılımı da belirlenerek her iki rota için sırasıyla Şekil 30(b) ve Şekil 31(b)'de

grafik olarak verilmiştir. Öte yandan, yönlenme ve deformasyon homojenliğini daha iyi analiz edebilmek için kesit boyunca ortaya çıkan kristalografik yönelim belirlenmiş ve elde edilen kutup şekilleri her iki rota için sırasıyla Şekil 30(c) ve Şekil 31(c)'de gösterilmiştir. Şekil 30(a) ve Şekil 31(a)'da verilen EBSD resimleri incelendiğinde, morfolojik açıdan tanelerin kesit boyunca özellikle rota-A'da uygulanan işlem sonrası yönlenecek uzadığı dikkati çekmektedir. Bu durum daha önce de açıklandığı gibi rota-A'nın uygulanış karakterinden (pasolara arasında döndürme yok) kaynaklanmaktadır. Rota-C'de yapılan işlem sonrası ise bu yönlenme etkisinin daha az olduğu görülmektedir. Söz konusu EBSD haritalarına deformasyon homojenliği açısından bakıldığında, kesit boyunca homojen bir tane boyutu dağılımının olmadığı ve tanelerin geometrik şeklinin de kesit boyunca farklılıklar gösterdiği dikkati çekmektedir. Bu durum Şekil 30(b) ve Şekil 31(b)'de verilen ve kesit boyunca tane boyutu dağılımını gösteren grafiklerde de açıkça görülmektedir. Bu grafikler incelendiğinde, tane boyutu dağılım homojenliğinin sac yüzeyine yakın bölgelerde sürtünme etkisinin de katkısıyla daha düşük olduğu görülmektedir. Ancak, sac yüzeyine yakın bölgelerde daha ince taneli bir yapının oluştuğu da dikkati çekmektedir. Öte yandan, her iki rotada yapılan EKASE işlemi sonrası, kesit boyunca doku oluşumunun da homojen olmadığı ve belirgin farklılıklar gösterdiği verilen kutup şekillerinden gözükmemektedir (Şekil 30(c) ve Şekil 31(c)). Bu durum ise EKASE işlemi sırasında uygulanan deformasyonun sac malzemenin kesiti boyunca hep aynı oranda etkimeydiğini göstermektedir.

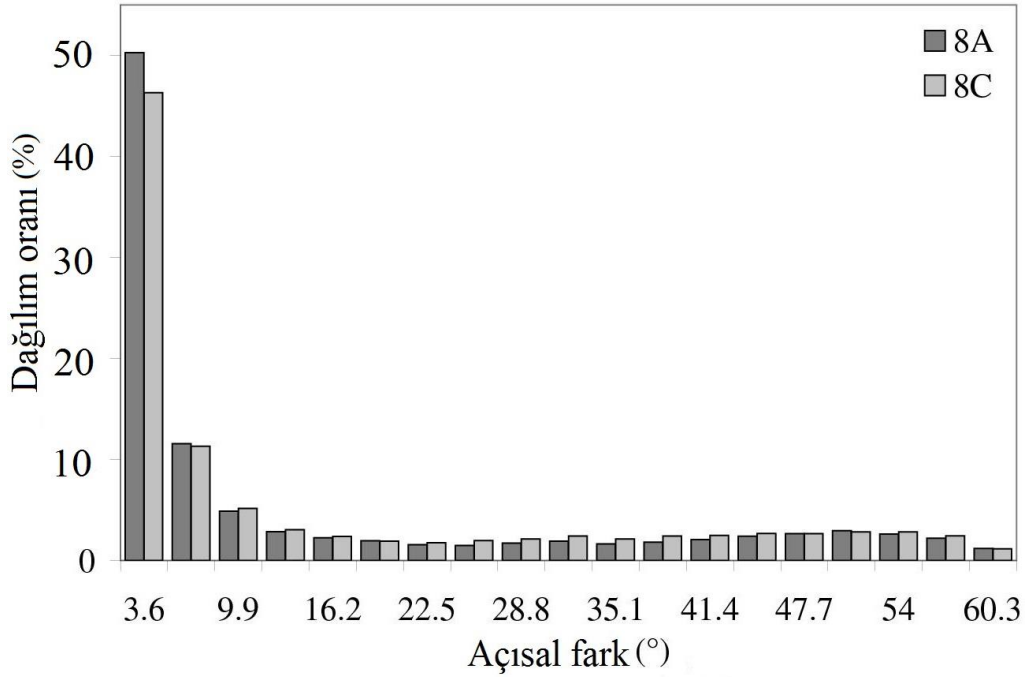


Şekil 30. Sac formdaki IF-çeliğine rota-A'da uygulanan 8 pasluk EKASE işlemi sonrası sac kesiti boyunca ortaya çıkan içyapısal durum: (a) Kesit boyunca içyapı ve tane dağılımını gösteren EBSD haritası ve seçilen bölgelerden alınan yüksek büyültmeli EBSD resimleri, (b) kesit boyunca farklı bölgelerde tane boyutu dağılımını gösteren grafikler ve (c) kesit boyunca farklı bölgelerde doku oluşumunu gösteren kutup şekilleri



Şekil 31. Sac formundaki IF-çeliğine rota-C’da uygulanan 8 pasluk EKASE işlemi sonrası sac kesiti boyunca ortaya çıkan yapısal durum: (a) Kesit boyunca içyapı ve tane boyutunu gösteren EBSD haritası ve seçilen bölgelerden alınan yüksek büyültmeli EBSD resimleri, (b) kesit boyunca farklı bölgelerde tane boyutu dağılımını gösteren grafikler ve (c) kesit boyunca farklı bölgelerde doku oluşumunu gösteren kutup şekilleri

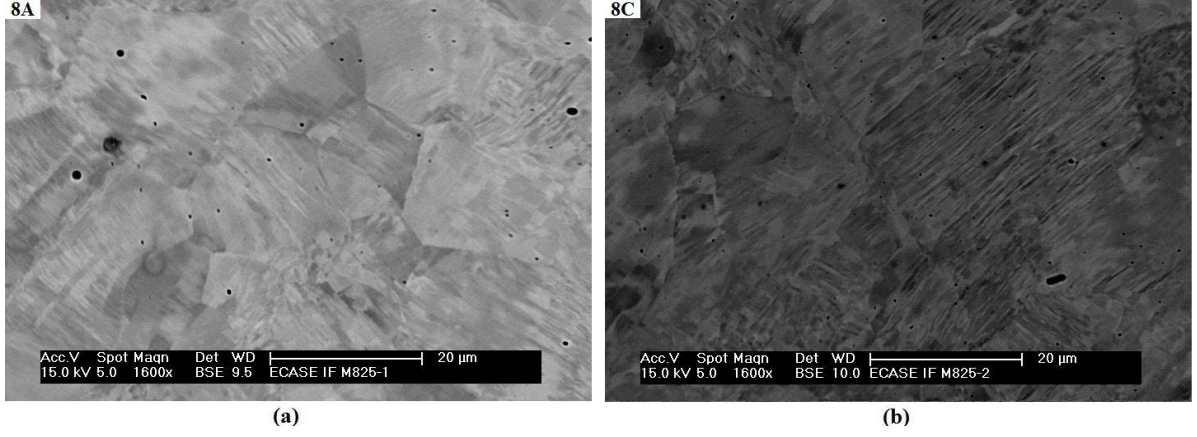
Rota-A ve rota-C’de uygulanan 8 pasluk EKASE işlemi sonrası sac malzemenin içyapısını oluşturan yeni taneler arasındaki açısal farkı gösteren grafik Şekil 32’de gösterilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, yeni oluşan taneler arasındaki açısal farkın genelde  $10^\circ$ ’nin altında olduğu görülmektedir. Bu durum, sac malzemedeki oluşan yeni içyapının daha çok dar açılı sınırlarla birbirinden ayrılmış tanelerden oluştuğunu göstermektedir. Yukarıda verilen TEM resimleri de bu durumu doğrulamaktadır (Şekil 27-29).



Şekil 32. Rota-A ve rota-C’de uygulanan 8 pasluk EKASE işlemi sonrası sac malzemenin içyapısını oluşturan taneler arasındaki açısal farkın dağılımını gösteren grafik

Rota-A ve rota-C’de 8 paso sayısında uygulanan EKASE işlemi sonrası sac malzemenin içyapısından SEM-geri saçılımlı elektron (BSE) modu kullanılarak yüksek çözünürlüklü resimler çekilmiş ve bunlardan seçilmiş iki tanesi Şekil 33’de gösterilmiştir. Bu resimler incelendiğinde, içyapıda yoğun bir şekilde mikro ölçekte kayma bantlarının olduğu gözlenmektedir. Bu oluşum, yönsel farklılıklar olmasına rağmen her iki rota için de yaklaşık benzer yoğunlukta ortaya çıkmaktadır. Ayrıca oluşan mikro-kayma bantlarının tane içinde yoğun bir şekilde olduğu ve bunların tane sınırlarında büyük oranda sonlandığı gözlenmektedir. Bu yönlenmenin, büyük oranda belirli doğrultularda olduğu da

dikkati çekmektedir. Yönlenme doğrultusunun ise muhtemelen maksimum kayma düzlemi boyunca oluşmuş olduğu düşünülmektedir.



Şekil 33. Rota-A ve rota-C’de uygulanan 8 pasoluk EKASE işlemi sonrası sac malzemenin içyapısında mikro-kayma bantlarının oluşumunu gösteren SEM-BSE resimleri. (a) rota-A, 8 paso ve (b) rota-C, 8 paso

### 3.1.4. Kristalografik Yönelim (Tekstür/Doku Oluşumu)

IF-çeliğinin içyapısının UİT yapılı hale getirilmesi için uygulanan aşırı plastik deformasyon söz konusu malzemede kristalografik yönelme oluşumuna da neden olmuştur. Bu oluşum ise işlem sırasında uygulanan EKAE rotası ve paso sayısına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. EKAE öncesi ve farklı rota ve paso sayılarında uygulanan EKAE işlemleri sonrasında kütleli formdaki IF-çeliğinde ortaya çıkan kristalografik yönelim (110), (200) ve (211) düzlemleri için Şekil 34-39’da verilen kutup şekillerinde gösterilmiştir. Şekil 34 incelendiğinde, EKAE öncesi durumdaki iri taneli IF-çeliğine ait kutup şekillerinde baskın olarak  $\{112\}\langle 110 \rangle$  bileşenlerine ait piklerin ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. Bu durum iri taneli durumdaki IF-çeliğinin bile belli oranda kristalografik yönelime sahip olduğunu göstermektedir. Söz konusu kristalografik yönelim HMK yapılı malzemelerin haddelenmesi sonrasında oluşan yönelim ile benzerlik göstermektedir [116]. Bu durum, sıcak haddelemeyle üretilmiş olan kütleli formdaki IF çeliğinde haddeleme etkisinin kristalografik yönelim üzerinde hala etkisini sürdürdüğünü göstermektedir..

Uygulanan bir pasoluk EKAE işlemi kütleli formdaki IF-çeliğinin kristalografik yönelimi üzerinde önemli değişimlere neden olmuştur. Nitekim, Şekil 35’de verilen kutup şekilleri incelendiğinde, söz konusu işlem koşulları sonrasında  $\{110\}\langle 112 \rangle$  bileşenlerinin daha baskın olarak ortaya çıktığı bir kristalografik yönelimin olduğu görülmektedir. Bunun yanında daha düşük şiddette  $\{112\}\langle 111 \rangle$  bileşenlerine ait piklerin ortaya çıktığı da

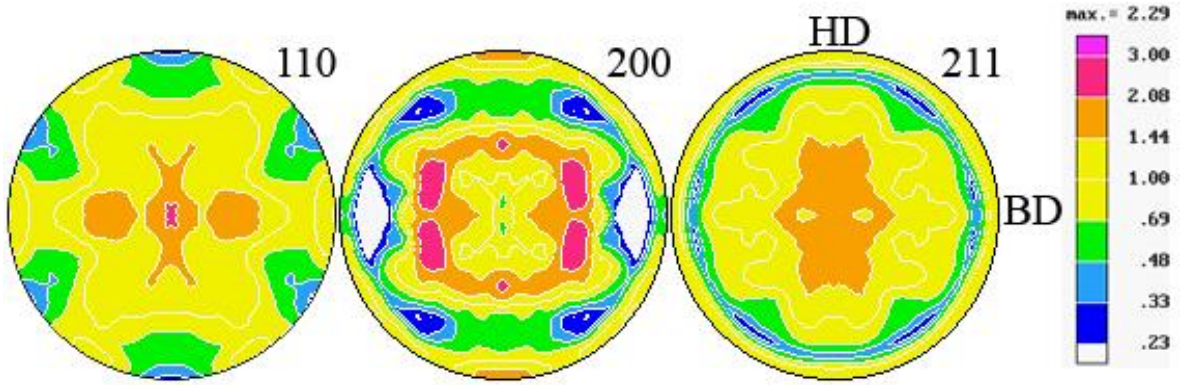
ilgili kutup şekillerinden anlaşılmaktadır (Şekil 35). Bu durum, bir paso sayısında uygulanan işlem sonrasında ortaya çıkan kristalografik yönelimde daha çok  $\{110\}$  düzlemlerinin boyuna düzleme,  $\langle 112 \rangle$  doğrultularının da EKAE doğrultusuna paralel olarak yönlendiğini göstermektedir [105, 107, 117].

Rota-A'da 8 paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrasında ortaya çıkan kristalografik yönelimin (Şekil 36) baskın olarak  $\{112\}\langle 111 \rangle$  bileşenlerinden oluştuğu görülmektedir. Bu durum söz konusu işlem rotasında ortaya çıkan yönelimin,  $\{112\}$  düzlemlerinin boyuna düzleme,  $\langle 111 \rangle$  doğrultularının da EKAE doğrultusuna paralel olarak yönlendiğini göstermektedir. Ayrıca söz konusu işlem sonrasında elde edilen kristalografik yönelimin çok keskin bir karakterde ortaya çıktığı söylenebilir. Kristalografik yönelimin rota-A'da uygulanan 8 pasoluk işlem sonrasında keskin bir şekilde ortaya çıkmasında, bu rotanın uygulanmasında izlenen yöntemin etkili olduğu düşünülmektedir. Şöyle ki söz konusu işlem rotasında uygulanan çok pasolu işlem sırasında, numune döndürülmeden yeniden kalıba yerleştirilerek işleme devam edilmektedir. Bu durum içyapıdaki tanelerin aynı yön ve büyüklükteki basit kayma deformasyonuna maruz kalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, söz konusu işlem rotasında elde edilen kristalografik yönelim her paso sayısında daha da belirgin hale gelmektedir [105, 107, 117].

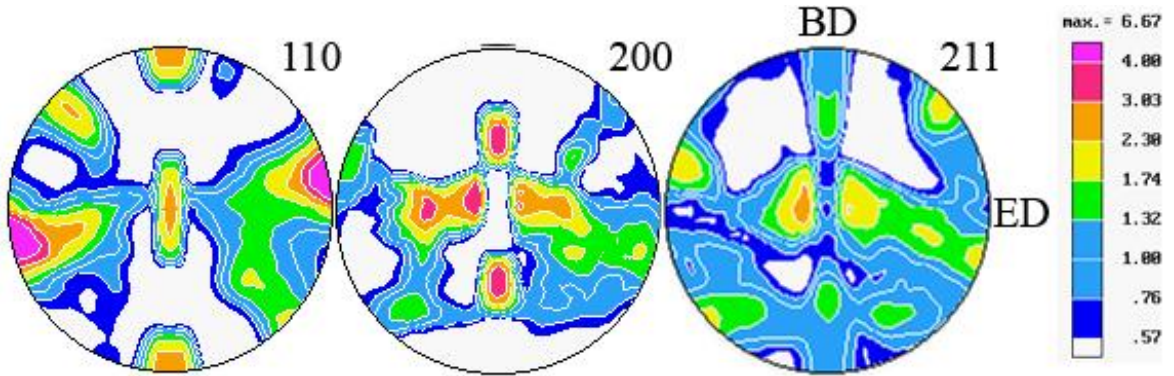
Rota-C'de 8 paso sayısında uygulanan işlem sonrasında ortaya çıkan kutup şekilleri Şekil 37'de verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, söz konusu şartlarda uygulanan işlem sonrasında elde edilen kristalografik yönelimin bir paso sonrasında elde edilen durum ile benzerlikler sergilediği söylenebilir. Nitekim, rota-C'de uygulanan 8 pasoluk işlem sonrasında da  $\{110\}\langle 112 \rangle$  ve  $\{112\}\langle 111 \rangle$  bileşenlerinin ortaya çıktığı bir kristalografik yönelim görülmektedir. Ayrıca söz konusu işlem rotasında elde edilen bu bileşenlerin şiddetlerinin de birbirine yakın olduğu söylenebilir. Bu durum, rota-C'de uygulanan işlem sonrasında elde edilen kristalografik yönelimin keskin karakterde olmadığına işaret etmektedir.

Rota-Bc'de 8 paso sayısında uygulanan işlem sonrasında elde edilen kutup şekilleri Şekil 38'de gösterilmiştir. Bu kutup şekillerinden söz konusu işlem sonrasında oluşan kristalografik yönelimin rota-A'da elde edilen durum kadar olmasada keskin karakterde olduğu söylenebilir. Nitekim, rota-Bc'de uygulanan 8 pasoluk işlem sonrasında,  $\{112\}\langle 111 \rangle$  bileşenlerinin belirgin olarak ortaya çıktığı anlaşılmaktadır.

Rota-E'de uygulanan 8 pasoluk işlem sonrasında elde edilen kutup şekilleri Şekil 39'de gösterilmektedir. Bu şekilden, söz konusu işlem sonrasında elde edilen kutup şekilleri ile, rota-C'de aynı paso sayısında elde edilen kutup şekillerinin birbirine benzer olduğu görülmektedir. Nitekim rota-E'de uygulanan 8 pasoluk işlem sonrasında da  $\{110\}\langle 112\rangle$   $\{112\}\langle 111\rangle$  bileşenlerinin oluştuğu görülmektedir. Ancak rota-E'de uygulanan işlem sonrasında elde edilen kristalografik yönelim bileşenlerinin rota-C'ye kıyasla daha yüksek şiddette oluştuğu anlaşılmaktadır.

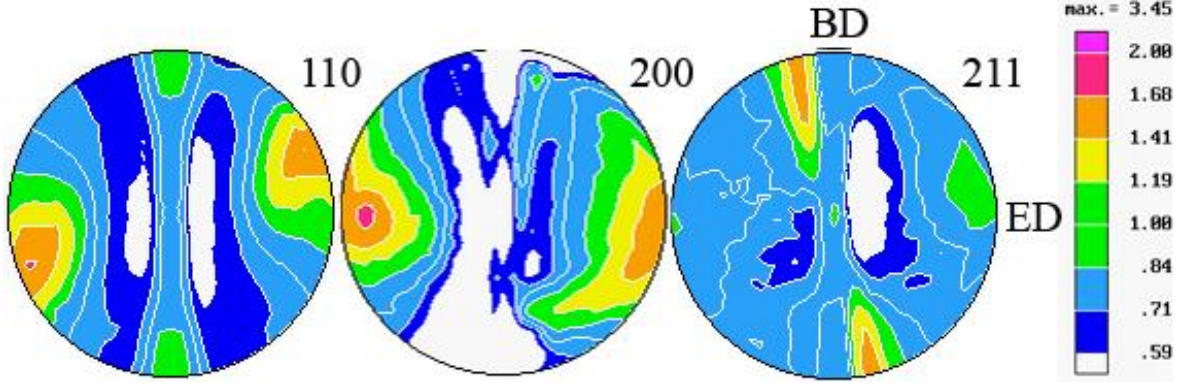


Şekil 34. Kütleli formdaki IF-çeliğinin EKAE öncesi durumda (sıcak işlem görmüş iri taneli yapı) elde edilen kutup şekilleri

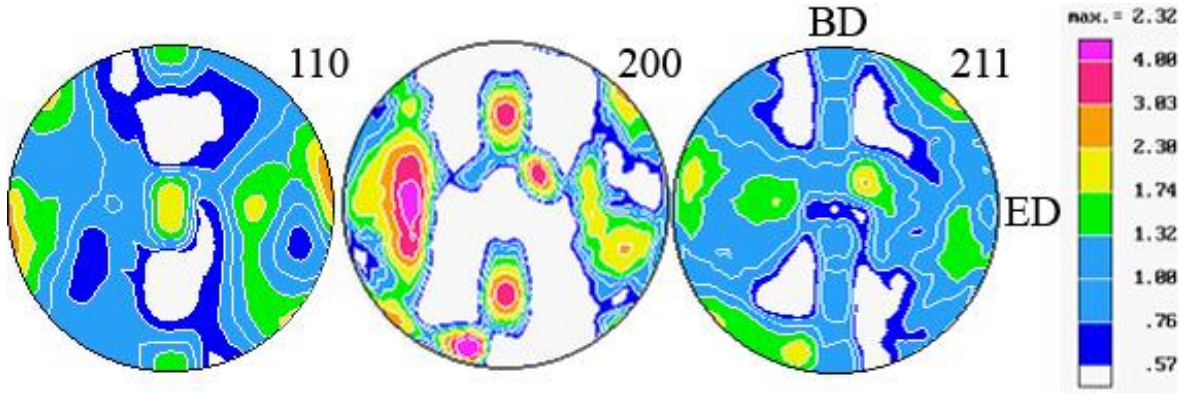


Şekil 35. Kütleli formdaki IF-çeliğine bir paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen kutup şekilleri

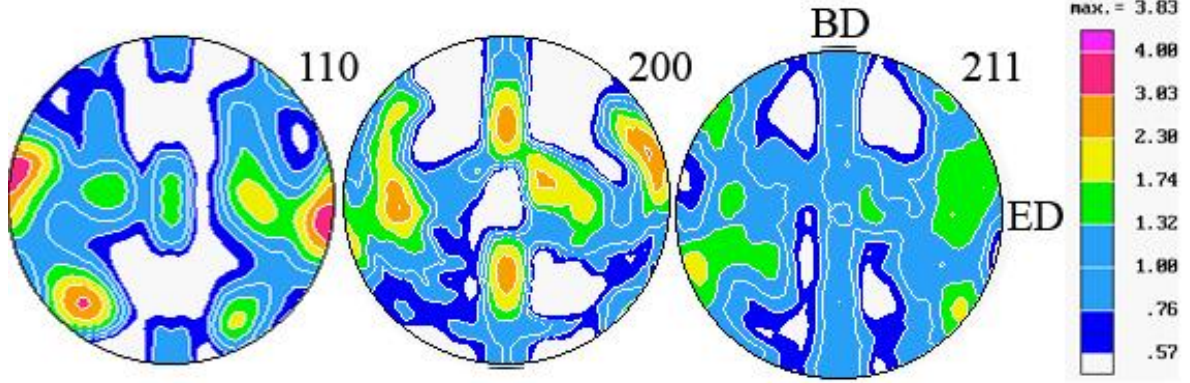




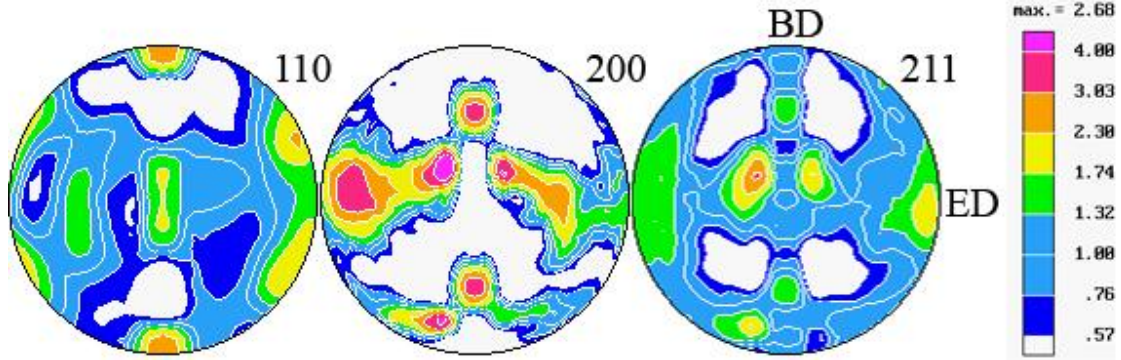
Şekil 36. Kütleli formdaki IF-çeliğine rota-A'da 8 paso sayısında uygulanan EKAE işleminin sonunda elde edilen kutup şekilleri



Şekil 37. Kütleli formdaki IF-çeliğine rota-C'de 8 paso sayısında uygulanan EKAE işleminin sonunda elde edilen kutup şekilleri



Şekil 38. Kütlesel formdaki IF-çeliğine rota-Bc’de 8 paso sayısında uygulanan EKAЕ işlemi sonrasında elde edilen kutup şekilleri



Şekil 39. Kütlesel formdaki IF-çeliğine rota-E’de 8 paso sayısında uygulanan EKAЕ işlemi sonrasında elde edilen kutup şekilleri

## 3.2. Mekanik Özellikler

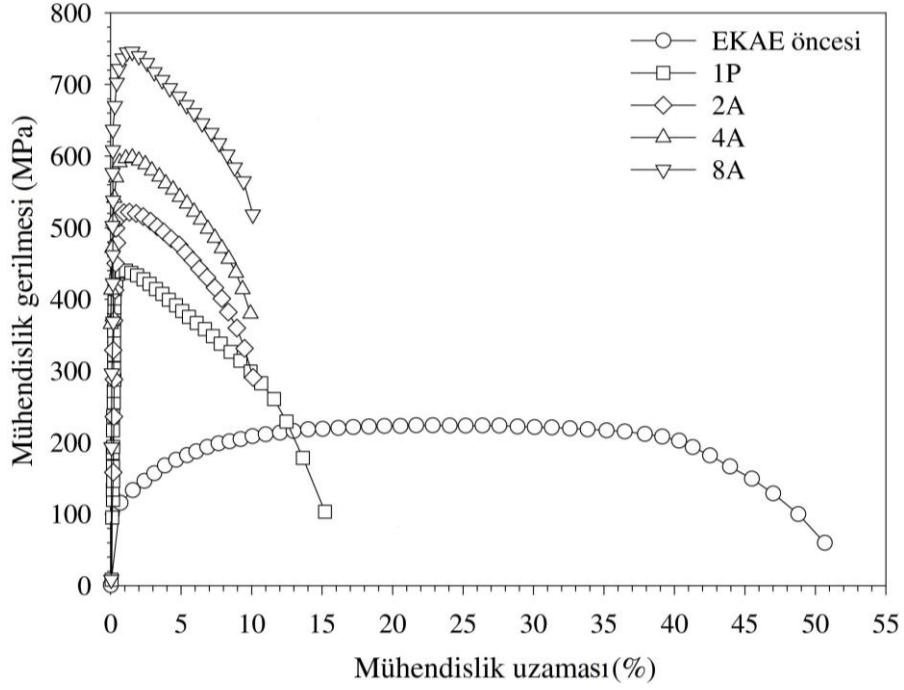
### 3.2.1. Çekme Özellikleri

#### 3.2.1.1. Kütlesel Formdaki IF-Çeliği

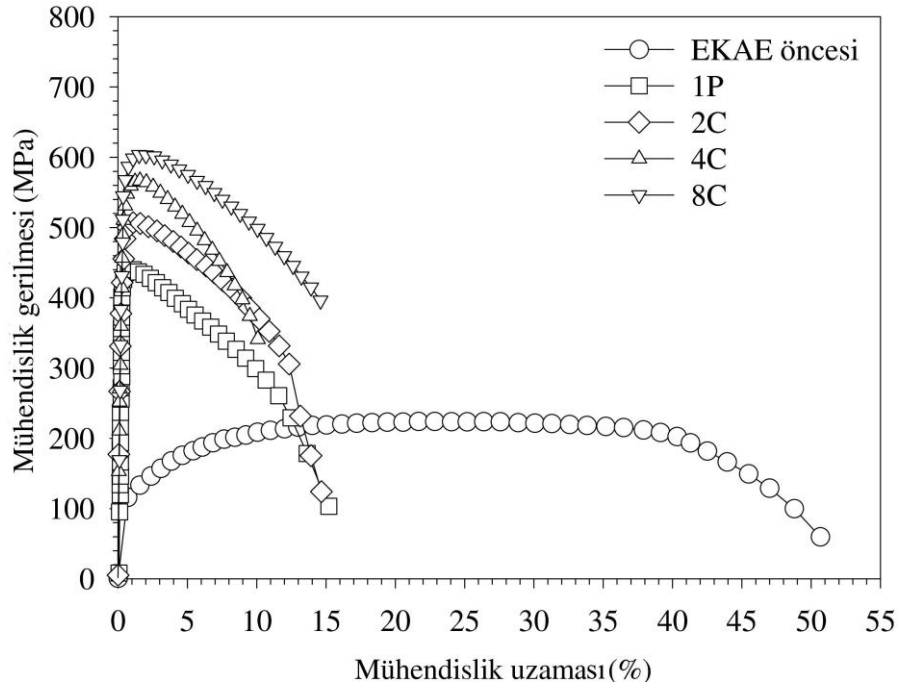
Rota-A ve rota-C’de 1, 2, 4 ve 8 paso sayılarında, Rota Bc’de 4 ve 8 paso sayılarında ve rota-E’de 8 paso sayısında uygulanan EKAЕ işleminin kütlesel formdaki IF-çeliğinin gerilme-uzama davranışına etkisi sırasıyla Şekil 40-43’de gösterilmiştir. Gerilme-uzama eğrileri kullanılarak belirlenen akma ve çekme dayanımı ile kopma ve üniform uzama değerleri ise Tablo 6’da, bu değerlerin uygulanan işlem rotası ve paso sayısına göre değişimini gösteren eğriler ise sırasıyla Şekil 44-45’de verilmiştir.

EKAE işlemi öncesi iri taneli IF-çeliğinin gerilme-uzama eğrileri incelendiğinde, söz konusu çelikte deformasyon sertleşmesi davranışının etkin bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir. Nitekim, bu malzeme akma ve çekme dayanımına karşılık gelen noktalar arasında önemli oranda uzama göstererek geniş bir uniform deformasyon bölgesi sergilemektedir. Çekme dayanımı sonrasında ise boyun verme ile gerçekleşen lokal uzamanın ardından kırılma olayının gerçekleşmektedir. Bu sonuç, EKAE öncesi iri taneli IF-çeliğinin deformasyon sertleşme kabiliyetinin yüksek olduğunu ve sergilediği kopma uzamasının büyük oranda üniform deformasyon bölgesinde gerçekleştiğini göstermektedir. Bu tür bir deformasyon davranışı, özellikle dislokasyon yoğunluğu düşük ve iri taneli bir içyapıya sahip metaller için karakterisirtik bir durumdur.

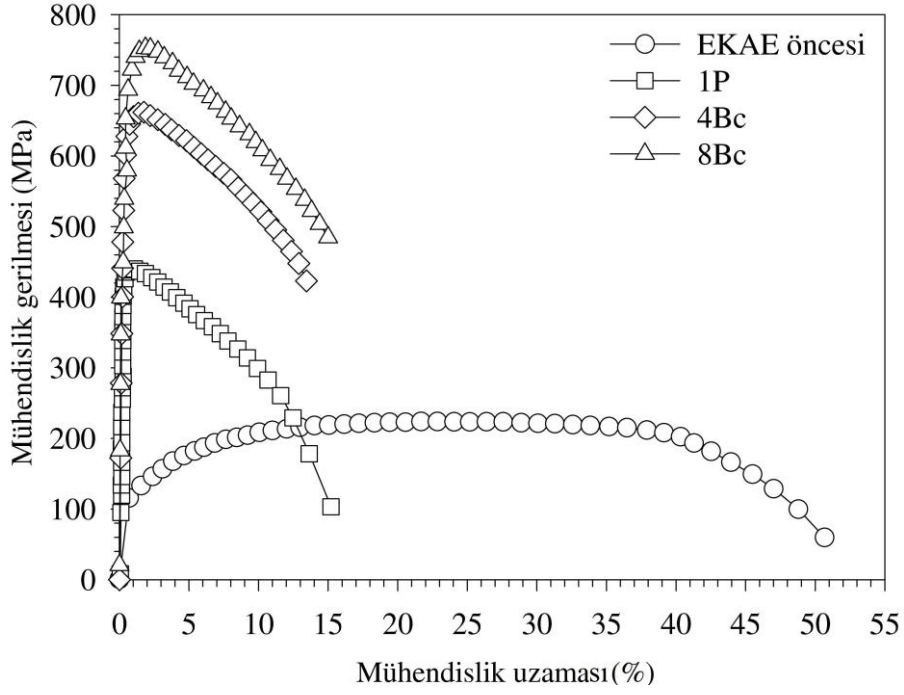
Farklı rota ve paso sayılarında uygulanan EKAE işleminin kütleli formdaki IF-çeliğinin gerilme-uzama davranışını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir (Şekil 40-43). Şöyle ki, uygulanan bir pasoluk EKAE işlemi gerilme-uzama eğrisindeki baskın deformasyon sertleşme davranışını büyük oranda ortadan kaldırmaktadır. Nitekim, bir pasoluk EKAE işlemi sonrasında elde edilen eğriler akma noktasını takip eden sınırlı bir üniform uzamanın ardından çekme dayanımı noktasına ulaşmaktadır. Bu durum, uygulanan EKAE işlemi sonrasında IF-çeliğinin deformasyon sertleşme kabiliyetinde belirgin bir azalmanın meydana geldiğini göstermektedir. Çekme noktasından sonra ise deformasyon lokalleşmesi ve boyun vermeyle birlikte önemli oranda uzamanın gerçekleştiği dikkati çekmektedir. Başka bir deyişle, EKAE uygulanmış durumdaki IF-çeliğinde gerçekleşen toplam uzamanın büyük bir bölümü boyun verme ile meydana gelmektedir. Bu etki bir paso sonrası belirgin bir şekilde ortaya çıkmakta ve farklı rotalarda ve paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrasında da etkisi azalarak da olsa devam etmektedir (Şekil 40-43).



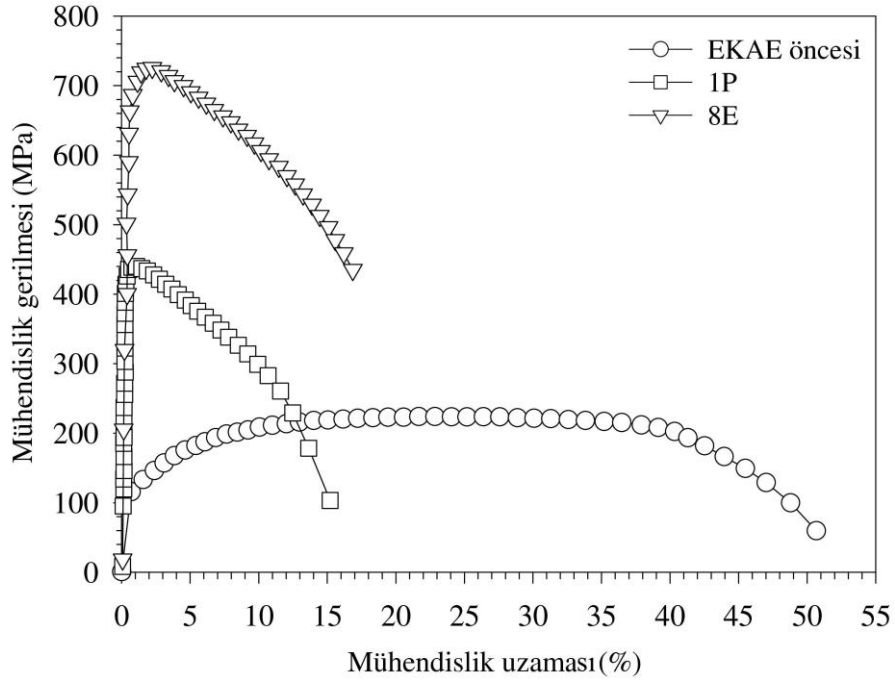
Şekil 40. Rota-A'da 1, 2, 4 ve 8 paso sayılarında uygulanan EKAE işleminin sonrası kütleli formdaki IF-çeliği örneklerinden elde edilen gerilme-uzama eğrileri



Şekil 41. Rota-C'de 1, 2, 4 ve 8 paso sayılarında uygulanan EKAE işleminin sonrası kütleli formdaki IF-çeliği örneklerinden elde edilen gerilme-uzama eğrileri



Şekil 42. Rota-Bc’de 1, 4 ve 8 paso sayılarında uygulanan EKAET işlemi sonrası kütleli formdaki IF-çeliği örneklerinden elde edilen gerilme-uzama eğrileri



Şekil 43. Rota-E’de 1 ve 8 paso sayılarında uygulanan EKAET işlemi sonrası kütleli formdaki IF-çeliği örneklerinden elde edilen gerilme-uzama eğrileri

Tablo 6’da verilen mukavemet ve süneklik değerleri ve Şekil 44-45’de bu değerlerin değişimini gösteren eğriler incelendiğinde, farklı rotalarda uygulanan EKAE işleminin malzemenin mukavemet değerlerini önemli oranda artırdığı açıkça görülmektedir. Bu artış uygulanan ilk paso sonrası çok daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmakta ve artan paso sayısı ile azalan oranda devam etmektedir (Tablo 6 ve Şekil 44). İşlem öncesi iri taneli çelik 106 MPa’lık bir akma dayanımına, 232 MPa’lık çekme dayanımına ve %53’lük yüksek bir kopma uzaması değerine sahiptir (Tablo 6). Uygulanan bir pasoluk EKAE işlemi sonrası akma ve çekme dayanımı değerleri sırasıyla yaklaşık %280 ve %55 oranında artarak 406 MPa ve 446 MPa değerlerine yükselmekte ve rota-A’da uygulanan toplam 8 pasoluk işlem sonrası ise söz konusu değerler sırasıyla 646 MPa ve 724 MPa’ya ulaşmaktadır. Diğer rotalarda uygulanan EKAE işlemi sonrası da mukavemet değerlerinde benzer şekilde artışlar elde edilmektedir. Nitekim, rota-Bc’de 8 pasoluk EKAE işlemi sonrasında elde edilen akma dayanımı ve çekme dayanımı değerleri başlangıç durumuna göre sırasıyla % 548, % 163 artış göstererek 687 MPa ve 750 MPa değerine ulaşmaktadır. Rota C’de 8 pasoluk EKAE işlemi sonrasında ise sırasıyla %545 ve %216 oranlarında artışlar elde edilerek bu değerler 568 MPa ve 623 MPa olmaktadır. Rota-E’de uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrasında ise akma dayanımı ve çekme dayanımı değerleri başlangıç değerlerine göre %524 ve %132 oranlarında artarak 662 MPa ve 683 MPa değerlerini almaktadır.

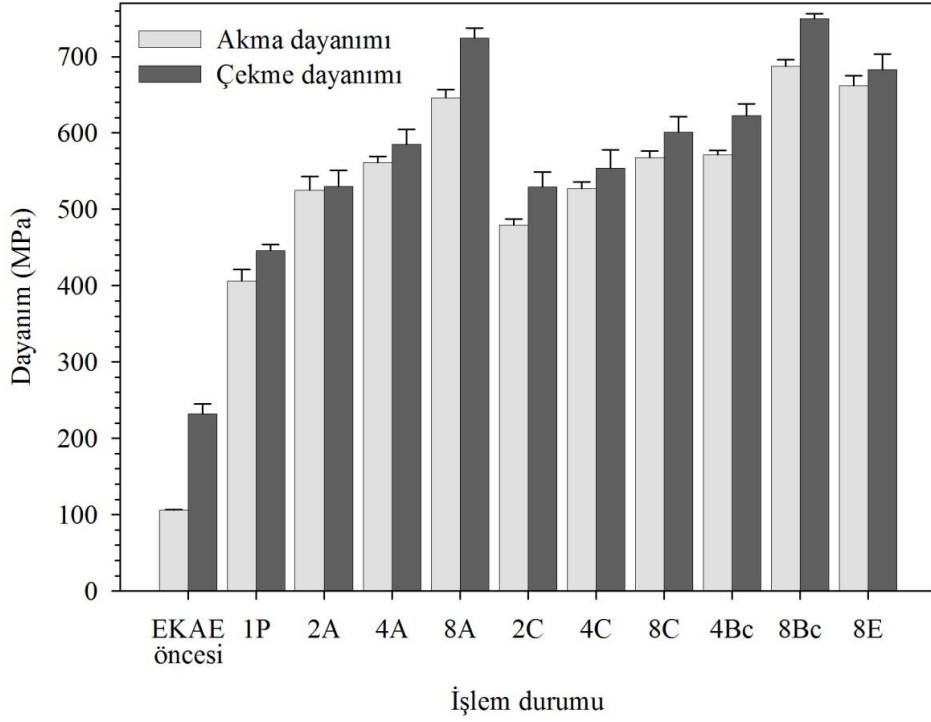
EKAE işlemi sonrası mukavemet değerlerinde elde edilen bu büyük artış, söz konusu çeliğin süneklik değerlerinde ise belirgin azalmaya neden olmaktadır (Tablo 6 ve Şekil 45). Bu azalma, üniform uzama değerlerinde çok daha belirgin olarak ortaya çıkmakta ve büyük oranda ilk paso sonrası gerçekleşmektedir. Nitekim, EKAE öncesi durumdaki iri taneli IF-çeliğinin üniform uzama ve kopma uzaması değerleri sırasıyla %25 ve %53 olarak ölçülmüştür. Bu değerler bir pasoluk EKAE işlemi sonrasında sırasıyla %94 ve %78 azalarak %1,3 ve %15,1 değerlerine düşmüştür. Ancak, artan paso sayısının çeliğin süneklik değerlerinde önemli bir değişime neden olmadığı da dikkati çekmektedir. Nitekim Rota-A, rota-C, rota-Bc ve rota-E’de uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası üniform uzama değerleri sırasıyla %1,5 %1,9, %1,8, %1,9 olarak gerçekleşmiştir. Kopma uzaması değerleri ise rota-A, rota-C, rota-Bc ve rota-E’de uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrasında sırasıyla %9,6, %12,9, %14,7 ve %16,4 olarak ölçülmüştür (Tablo 6).

İşlem sonrası mukavemet ve süneklik değerlerinde elde edilen değişim belli oranda uygulanan EKAE rotasına bağlılık göstermektedir. Bu bağlılık mukavemet değerlerinde

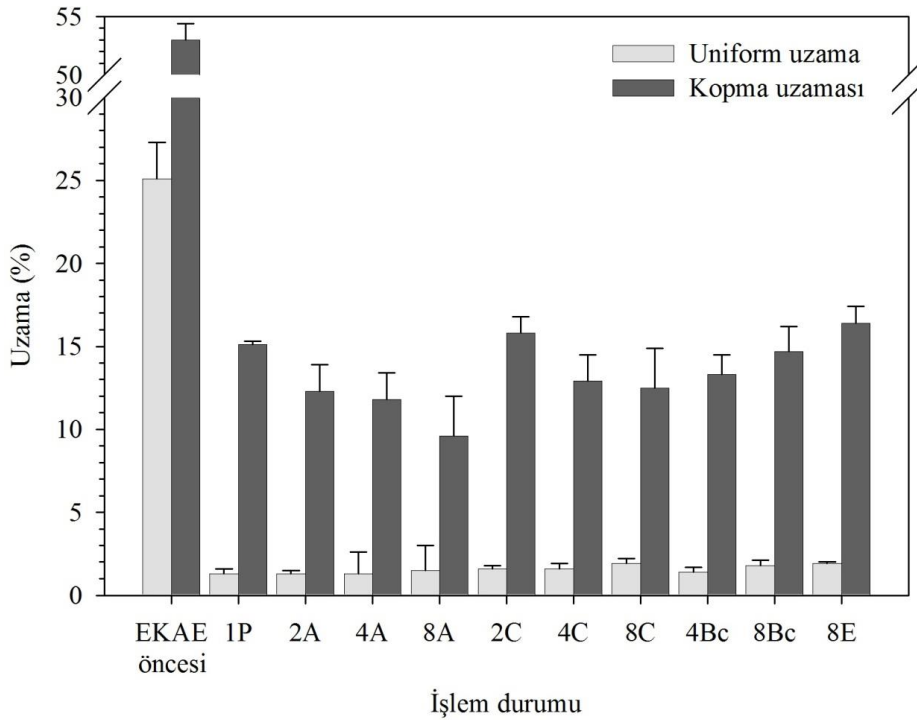
daha etkin olarak ortaya çıkmaktadır. Farklı rotalarda ve 8 paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen mukavemet değerleri karşılaştırıldığında, belirlenen en yüksek artışın rota-Bc'de uygulanan EKAE işlemi sonrası elde edildiği görülmektedir (Tablo 6 ve Şekil 44-45). Bunu sırasıyla rota-A, rota-E ve rota-C'de uygulanan EKAE işlemleri izlemektedir. Süneklik değerleri göz önüne alındığında ise rota-E'de uygulanan işlem sonrasında elde edilen uzama değerlerinin daha yüksek olduğu ve bunu sırasıyla rota-Bc, rota-C ve rota-A'nın takip ettiği dikkati çekmektedir (Tablo 6 ve Şekil 44-45).

Tablo 6. Kütlesel formda IF-çeliğine değişik rota ve paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrası söz konusu malzemede ölçülen temel mukavemet ve süneklik değerleri.

İşlem durumu		Mekanik özellikler			
EKAE rotası	Paso sayısı	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Üniform uzama (%)	Kopma uzaması (%)
	0	106±01	232±13	25,1±2,2	53,0±1,4
	1	406±15	446±08	1,3±0,3	15,1±0,2
Rota-A	2	525±18	528±21	1,3±0,2	12,3±1,6
	4	561±8	585±20	1,3±1,3	11,8±1,6
	8	646±11	724±13	1,5±1,5	9,6±2,4
Rota-C	2	479±08	529±20	1,6±0,2	15,8±1,0
	4	527±09	554±24	1,6±0,3	12,9±1,6
	8	568±08	601±20	1,9±0,3	12,5±2,4
Rota-Bc	4	571±06	623±15	1,4±0,3	13,3±1,2
	8	687±09	750±06	1,8±0,3	14,7±1,5
Rota-E	8	662±13	683±20	1,9±0,1	16,4±1,0



Şekil 44. Kütleli formdaki IF-çeliğinin akma ve çekme dayanımının farklı rotalarda uygulanan çok pasolu EKAET işlemi ile değişimi



Şekil 45. Kütleli formdaki IF-çeliğinin üniform uzama ve kopma uzaması değerlerinin farklı rotalarda uygulanan çok pasolu EKAET işlemi ile değişimi



### 3.2.1.2. Sac Formdaki IF-Çeliği

Sac formundaki IF-çeliğinin EKASE işlemi öncesinde ve farklı rota ve paso sayılarında uygulanan EKASE işlemi sonrasında, ekstrüzyon doğrultusu ile  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ 'lik açılarda çıkarılan örnekler ile yapılan çekme deneylerinden elde edilen gerilme-uzama eğrileri Şekil 46(a)-(f)'de gösterilmiştir. Söz konusu eğrilerden çıkarılan akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri Tablo 7'de, bu değerlerin işlem rotası ve uygulanan paso sayısına göre değişimini gösteren eğriler ise Şekil 47-49'da gösterilmiştir.

Şekil 46'da verilen gerilme-uzama eğrileri incelendiğinde, EKASE işlemi öncesi sac formdaki IF-çeliğinin, kütleli formdaki IF-çeliğine (Şekil 40-43) benzer bir eğri karakteristiği sergilediği görülmektedir. Buna göre, EKASE işlemi öncesinde IF-çeliği sacın geniş bir homojen deformasyon bölgesine sahip olduğu ve deformasyon sırasında pekleşme mekanizmasının etkin bir rol oynadığı söylenebilir. Farklı rota ve paso sayılarında uygulanan EKASE işlemi sonrasında ise bu eğri karakteristiğinin kütleli formdaki çelikte olduğu gibi büyük oranda değiştiği görülmektedir. Şöyle ki, EKASE işlemi uygulanmış durumdaki IF-çeliği sacın homojen deformasyon bölgesi büyük oranda daralmakta ve elde edilen uzamanın büyük bir bölümü homojen olmayan deformasyon bölgesinde boyun verme ile birlikte gerçekleşmektedir. Öte yandan, farklı yönlerde gerçekleştirilen çekme deneyleri ile elde edilen gerilme-uzama diyagramları eğri karakteristiği açısından önemli bir farklılık göstermemektedir (Şekil 46). Ancak elde edilen mekanik özelliklerde çok belirgin olmasa da rotaya bağlı bazı farklılıkların ortaya çıktığı söylenebilir (Şekil 47-49).

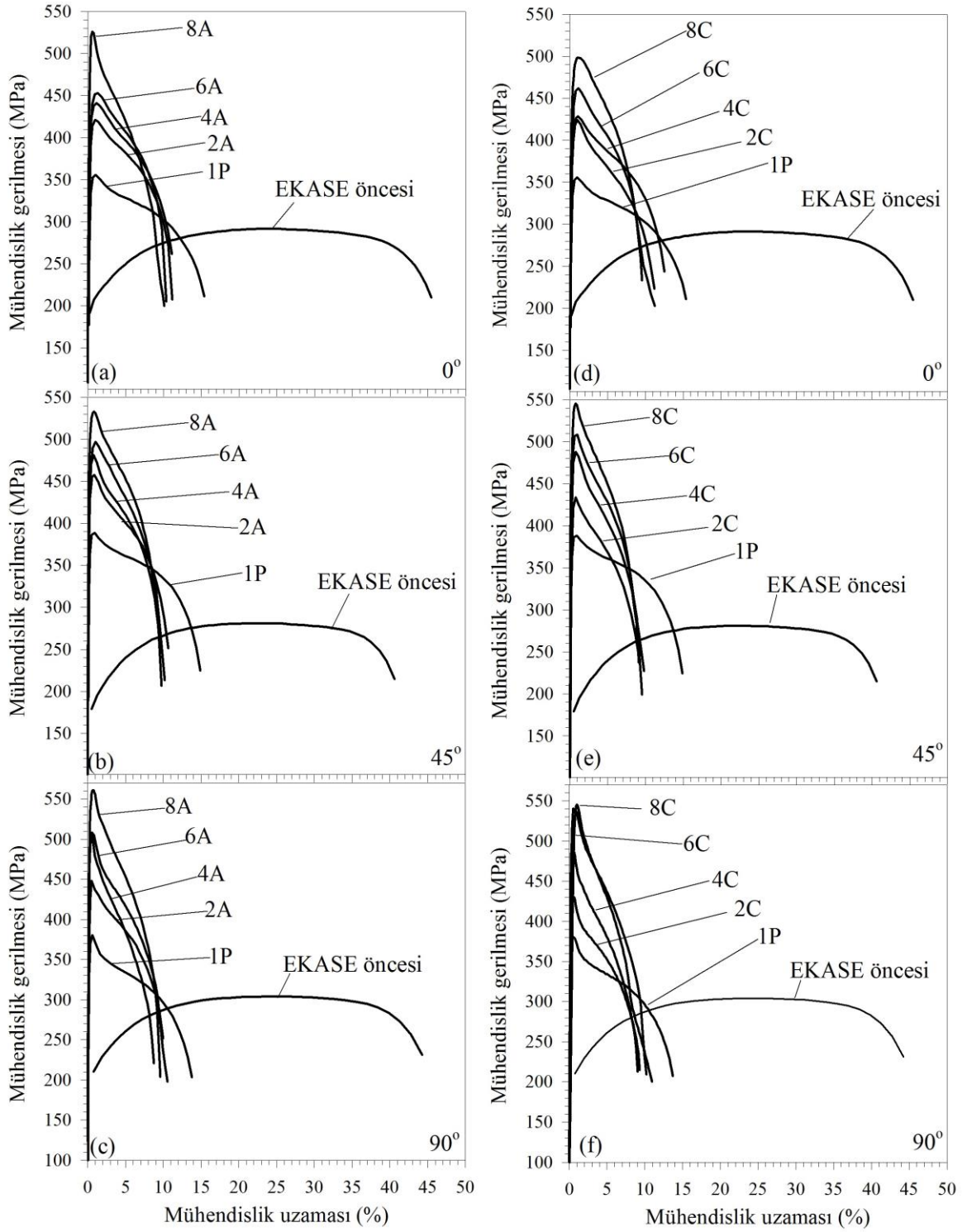
Sac formdaki IF-çeliğinin mukavemet ve süneklik değerlerinde çok pasolu EKASE işlemi sonrası önemli değişimler meydana gelmektedir (Tablo 7 ve Şekil 47-49). Uygulanan EKASE işlemi çeliğin dayanım değerlerini (akma ve çekme dayanımı), örneklerin çıkarıldığı yönden bağımsız olarak artırmakta, kopma uzaması değerini ise düşürmektedir. Ayrıca, çeliğin dayanım değerleri her iki rotada da artan paso sayısı ile devamlı olarak artmaktadır. Ancak, kütleli formdaki çeliğe benzer şekilde ilk pasolardaki dayanım artışı çok daha belirgin bir şekilde ortaya çıkarken, artış oranı ilerleyen paso sayılarında azalmaktadır. Nitekim EKASE işlemi öncesinde 194 MPa olarak belirlenen akma dayanımı, uygulanan bir pasoluk işlem sonrası yaklaşık %91 oranında artarak 372 MPa'a yükselmiştir. Rota-A'da uygulanan 2, 4, 6 ve 8 pasoluk işlemler sonrası artış

oranlar ise sırasıyla %113, %132, %142 ve %163 olarak gerçekleşmekte ve 8 paso sonrasında 500 MPa değerine ulaşmaktadır. Rota-C’de uygulanan 2, 4, 6 ve 8 pasoluk işlemler sonrası ise bu artış oranları sırasıyla %110, %126, %141 ve %155 olarak gerçekleşmiş ve 8 pasoluk işlem sonrasında 465 MPa değerini almıştır. İşlem öncesi ortalama 289 MPa olarak ölçülen çekme dayanımı değeri ise bir paso sonrasında %34 oranında artarak ortalama 388MPa değerine ulaşmıştır. Rota-A’da uygulanan 2, 4, 6 ve 8 pasoluk EKASE işlemi sonrası çekme dayanımı değerleri sırasıyla %50, %64, %72 ve %85 oranlarında artış göstermiştir. Bu artış rota-C’de uygulanan EKASE işlemi sonrası sırasıyla yaklaşık %50, %61, %74 ve %82 olarak gerçekleşmiştir. Buna göre rota-A ve rota-C’de 8 paso sayısında gerçekleştirilen EKASE işlemleri sonrasında, sac forma IF-çeliğinin çekme dayanımı değerleri sırasıyla 525 MPa ve 503 MPa olarak ölçülmüştür.

Öte yandan sac formundaki IF-çeliğinin kopma uzaması değeri farklı rota ve paso sayılarında uygulanan EKASE işlemi sonrasında azalmaktadır. Nitekim işlem öncesi ortalama %45 olan kopma uzaması değeri bir paso sonrası yaklaşık %15 değerine düşmektedir. Bu değer rota-A ve rota-C’de uygulanan çok pasolu EKASE işlemi sonrasında, bir paso sonrası kadar olmasa da, azalmaya devam etmektedir. Nitekim her iki işlem rotasında uygulanan 8 pasoluk EKASE işlemi sonrası bu değer yaklaşık %10 olarak ölçülmüştür.

EKASE işlemi uygulanmış sac formundaki IF-çeliğinin mekanik özelliklerinin çok belirgin olmasa da çekme yönüne bağımlı olduğu görülmüştür (Tablo 7 ve Şekil 47-49). Rota-A’da farklı paso sayılarında uygulanan işlem sonrası ekstrüzyon doğrultusuna paralel yönde (0°) elde edilen dayanım değerleri genel olarak diğer yönlerde elde edilen değerlerden daha düşük olduğu görülmüştür. Nitekim 8 paso sonrası 0°, 45° ve 90°’lik yönlerde elde edilen akma dayanımı değerleri sırasıyla 499 MPa, 529 MPa ve 539 MPa olarak belirlenmiştir. Çekme dayanımının yöne bağımlı olarak değişimi de akma dayanımındaki değişime benzerlik göstermektedir. Buna göre 8 paso sonrasında 0°, 45° ve 90° yönlerinde ölçülen çekme dayanımı değerleri sırasıyla 525 MPa, 530MPa ve 551 MPa olarak belirlenmiştir. Kopma uzaması değerlerinde gözlenen değişim ise dayanım değerlerindeki değişimine tersi yönde gelişmiştir. Nitekim 8 paso sonrasında 0°, 45° ve 90°’lik yönlerinde elde edilen kopma uzaması değerleri sırasıyla %11,4, %10,2, %10,3 olarak gerçekleşmiştir. Rota-C’de uygulanan EKASE işlemi sonrasında elde edilen mekanik özelliklerin çekme yönü ile değişimi de rota-A’da gerçekleştirilen işlem sonrası

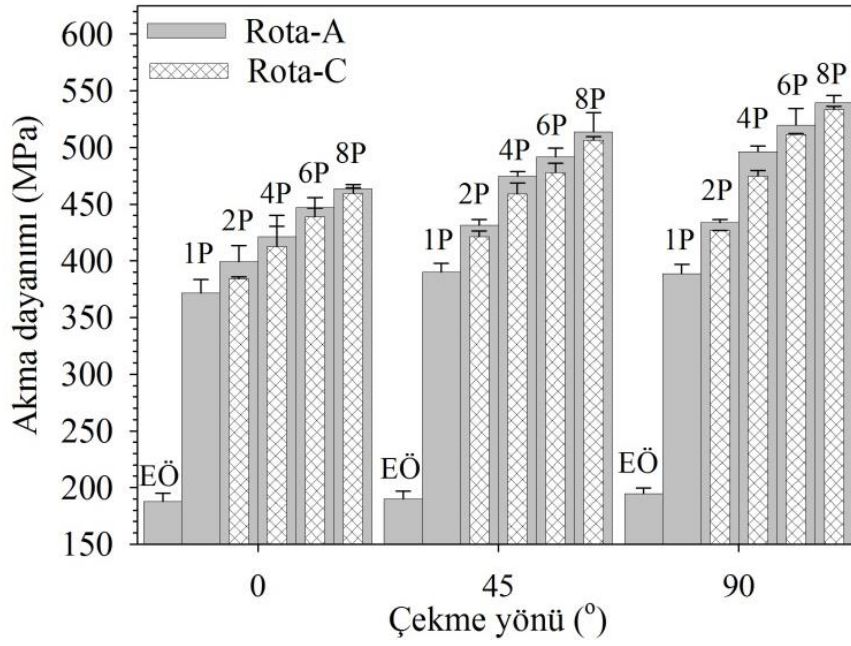
durum ile benzerlik göstermektedir. Buna göre, rota C'de uygulanan EKASE işlemi sonrasında ekstrüzyon doğrultusuna paralel yönde ( $0^\circ$ ) elde edilen dayanım değerlerinin genel olarak diğer yönlerde elde edilen değerlerden daha düşük, kopma uzaması değerlerinin ise daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Tablo 7 ve Şekil 47-49). Nitekim rota-C'de 8 pasoluk EKASE işlemi sonrası sac örneklerin  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $90^\circ$ 'lik yönlerinde elde edilen akma dayanımı değerleri sırasıyla 465 MPa, 516 MPa ve 536 MPa olarak, çekme dayanımı değerleri ise sırasıyla 503 MPa, 536 MPa, 550 MPa olarak ölçülmüştür. Aynı işlem koşulunda elde edilen kopma uzaması değerleri ise  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $90^\circ$ 'lik çekme yönlerine bağlı olarak sırasıyla %11,9, %9,6 ve %10,4 olarak belirlenmiştir.



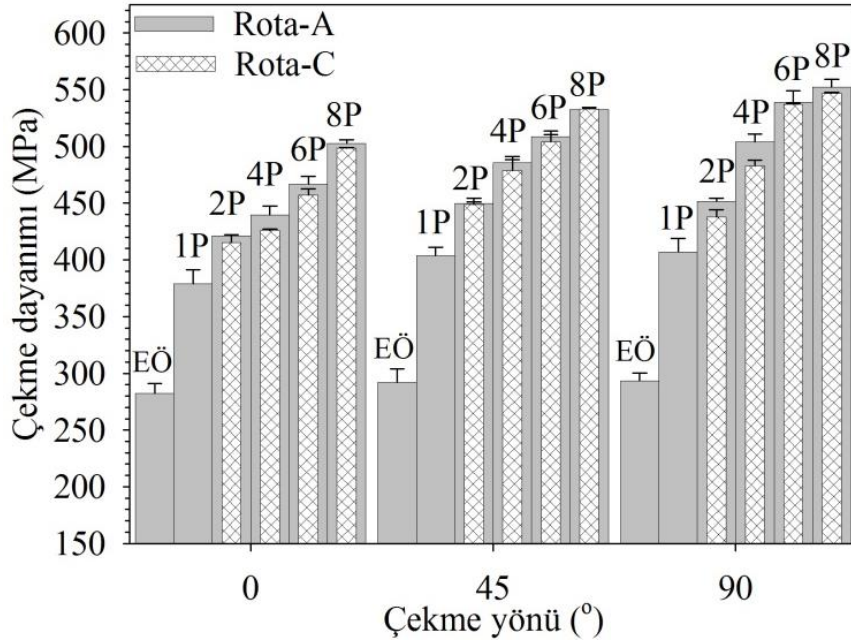
Şekil 46. IF-çeliğinin EKASE öncesi ve sonrası farklı doğrultularda sergilediği gerilme-uzama diyagramları: Rota-A (a) 0°, (b) 45°, (c) 90° ve rota-C (d) 0°, (e) 45°, (f) 90°

Tablo 7. Sac formundaki IF-çeliğinin işlem öncesi durum ile farklı rotalarda (rota-A ve rota-C) ve farklı pasolarda uygulanan EKASE işlemi sonrası sahip olduğu mukavemet ve süneklik değerleri

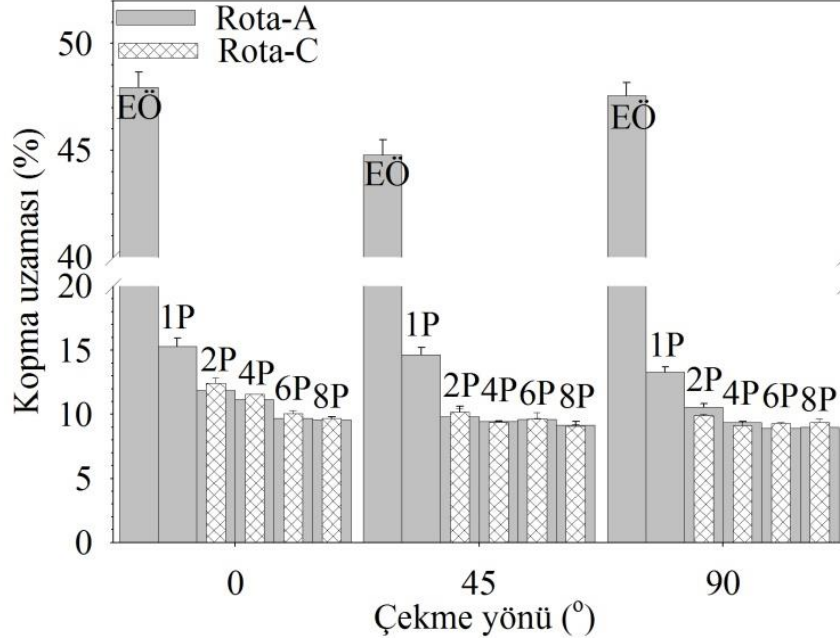
İşlem şartları	Örnek konumu	Çekme özellikleri		
		Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)
EKASE öncesi durum	0°	194±12	283±12	46,0±0,5
	45°	205±15	293±9	44,4±0,7
	90°	195±5	293±7	45,8±0,7
1P	0°	372±12	377±13	15,8±0,5
	45°	390±8	394±10	15,3±0,3
	90°	389±8	391±7	14,1±0,3
2A	0°	402±17	410±18	12,6±0,5
	45°	440±9	451±2	11,6±0,3
	90°	424±6	441±2	12,3±0,4
4A	0°	413±16	439±9	13,2±0,4
	45°	474±5	485±5	11,9±0,6
	90°	491±6	498±6	11,8±0,3
6A	0°	447±9	460±9	12,3±0,5
	45°	498±4	504±4	11,8±0,5
	90°	500±14	517±14	10,7±0,7
8A	0°	499±15	525±2	11,4±0,7
	45°	529±1	530±3	10,2±0,5
	90°	539±5	551±5	10,3±0,2
2C	0°	391±7	415±7	13,2±0,5
	45°	427±7	444±6	11,8±0,6
	90°	434±7	447±9	10,9±0,1
4C	0°	413±18	441±16	12,6±0,8
	45°	459±10	479±10	10,6±0,6
	90°	475±5	483±5	10,2±0,0
6C	0°	439±8	465±10	12,5±1,0
	45°	478±8	506±5	11,9±0,7
	90°	530±2	546±2	11,1±0,1
8C	0°	465±8	503±4	11,9±0,3
	45°	516±5	536±5	9,6±0,2
	90°	536±1	550±1	10,4±0,8



Şekil 47. Sac formundaki IF-çeliğine uygulanan EKASE işlemi sonrası elde edilen akma mukavemeti değerinin örneklerin çıkarıldığı yön, paso sayısı ve uygulanan rotaya göre değişimini gösteren diyagram (EÖ: EKASE öncesi)



Şekil 48. Sac formundaki IF-çeliğine uygulanan EKASE işlemi sonrası elde edilen çekme dayanımı değerinin örneklerin çıkarıldığı yön, paso sayısı ve uygulanan rotaya göre değişimini gösteren diyagram (EÖ: EKASE öncesi)



Şekil 49. Sac formundaki IF-çeliğine uygulanan EKASE işlemi sonrası elde edilen kopma uzaması değerinin örneklerin çıkarıldığı yön, paso sayısı ve uygulanan rotaya göre değişimini gösteren diyagram (EÖ: EKASE öncesi)

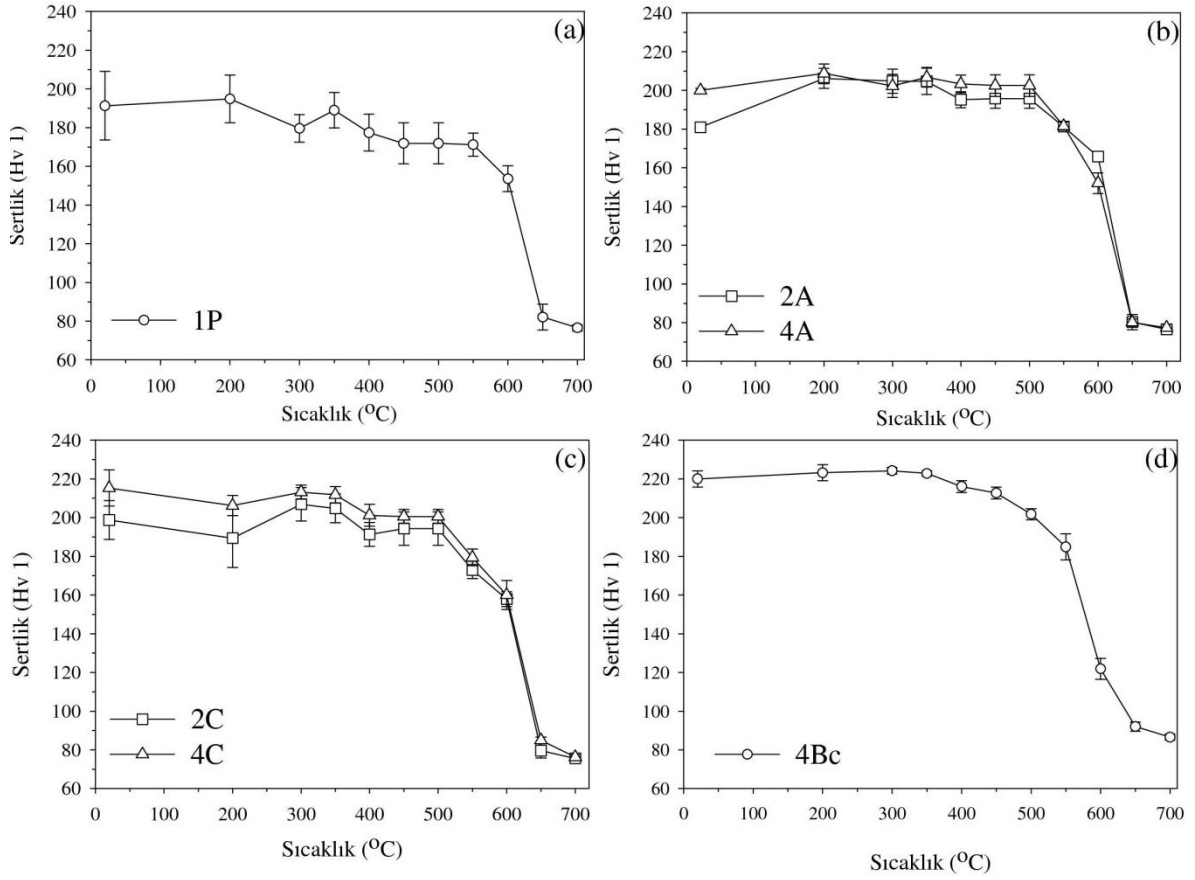
### 3.3. Isıl İşlem

#### 3.3.1. Termal Kararlılık

Kütlesel formdaki IF-çeliğinin bir paso, rota-A ve rota-C’de uygulanmış iki paso ve rota-A, rota-C ve rota-Bc’de uygulanan dört paso sonrası sergilemiş olduğu yeniden kristalleşme eğrileri Şekil 50(a)-(d)’de gösterilmiştir. Ayrıca, tüm rotalarda (rota-A, rota-C, rota-Bc ve rota-E) uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası elde edilen yeniden kristalleşme eğrileri ile bu eğrilerin seçilmiş noktalarına karşılık gelen içyapı resimleri Şekil 51-54’de gösterilmiştir. Bu eğrilerden yararlanılarak IF-çeliğinin sahip olduğu toparlanma, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi sıcaklık aralıkları da belirlenmiş ve bu değerler Tablo 8’de verilmiştir. Bu veriler incelendiğinde, IF-çeliğinin EKAE işlemi sonrası yeniden kristalleşme davranışının uygulanan rota ve paso sayısına göre belirgin

olmasa da küçük değişimler sergilediği görölmektedir. Genel olarak, bütün rotalarda paso sayısının artırılması ile yeniden kristalleşme başlangıç sıcaklığının düştüğü anlaşılmaktadır (Tablo 8). Nitekim bir pasoluk EKAE işleminin sonrası farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen ısı işlemler neticesinde ölçülen sertlik değerleri 550°C sıcaklığa kadar önemli bir değişim göstermemektedir (Şekil 50(a)). Bu durum, 550°C ve daha düşük sıcaklıklarda uygulanan bir saatlik ısı işlemler sonrasında içyapının toparlanma evresi içerisinde bulunduğunu göstermektedir. 550°C-650°C sıcaklık aralığında yapılan 1 saatlik ısı işlemler sonrasında ise sertlik değerlerinin artan tavlama sıcaklığı ile sürekli olarak azaldığı görölmektedir (Şekil 50(a)). Dolayısıyla bu sıcaklık aralığında yeniden kristalleşmenin etkili olduğu söylenebilir. 650°C'nin üzerindeki sıcaklıkta (700°C) yapılan tavlama işleminin ise sertlik değerinde önemli bir düşmeye neden olmadığı anlaşılmaktadır. Bu durum, 650 °C sıcaklıkta uygulanan 1 saatlik tavlama işlemi ile yapısal yeniden kristalleşmenin büyük oranda tamamlandığını göstermektedir. Bu nedenle bir paso sonrası uygulanan ısı işlemler sonucu bu malzeme için yeniden kristalleşme sıcaklığının 650°C olduğu söylenebilir. Bu sıcaklıktan sonra ise normal tane irileşme devresinin başlamış olduğu ölçülen sertlik değerlerinde gözlenen hafif azalmadan anlaşılmaktadır (Şekil 50(a)). Rota-A ve rota-C'de uygulanan 2 ve 4 pasoluk EKAE işlemleri sonrası ise yeniden kristalleşme başlangıç sıcaklığının belli oranda düştüğü, ancak yeniden kristalleşmenin tamamlandığı sıcaklıkta (yeniden kristalleşme sıcaklığının) ise önemli bir değişimin olmadığı dikkati çekmektedir. Nitekim yeniden kristalleşme başlangıç sıcaklığı her iki rotada uygulanan 2 ve 4 pasoluk EKAE işleminin sonrası yaklaşık 50 °C düşerek 500°C'ye indiği ilgili eğrilerden açıkça görölmektedir (Şekil 50(b)-(c) ve Tablo 8). Öte yandan, rota-Bc'de 4 paso sayısında uygulanan EKAE işleminin sonrasında ise yeniden kristalleşme başlangıç sıcaklığının diğer rotalarda aynı paso sayısında uygulanan EKAE işleminin sonrasında elde edilen değerden daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Nitekim bu durumda yeniden kristalleşme 450°C'de başlamaktadır (Şekil 50(d)).





Şekil 50. EKAЕ işlemi sonrası UİT yapıya hale getirilen kütleli formdaki IF-çeliğinin yeniden kristalleşme eğrileri: (a) Bir paso, (b) rota-A'da 2 ve 4 paso, (c) rota-C'de 2 ve 4 paso ve (d) rota-Bc'de 4 paso

Rota-A, rota-C, rota-Bc ve rota-E'de uygulanan 8 pasoluk EKAЕ işlemi sonrasında elde edilen yeniden kristalleşme eğrileri ve bu eğrilerde belirlenen noktalara karşılık gelen içyapı resimleri sırasıyla Şekil 51-54'de gösterilmiştir. Bu şekillerde verilen eğriler incelendiğinde, artan paso sayısının (artan deformasyon miktarının) özellikle rota-A'da gerçekleştirilen işlem sonrası yeniden kristalleşme başlangıç sıcaklığını düşürdüğü gözlenmektedir. Nitekim rota-A'da uygulanan 8 pasoluk işlem sonrasında yeniden kristalleşme başlangıç sıcaklığının 400°C olduğu görülmektedir (Şekil 51). Öte yandan, yeniden kristalleşme sıcaklığı ise, her bir rotada uygulanan 8 pasoluk işlemler sonrası da değişmemektedir. Nitekim bu değer 8 pasoluk işlem sonrası bütün rotalarda 650°C olarak belirlenmiştir (Şekil 51-54 ve Tablo 8).

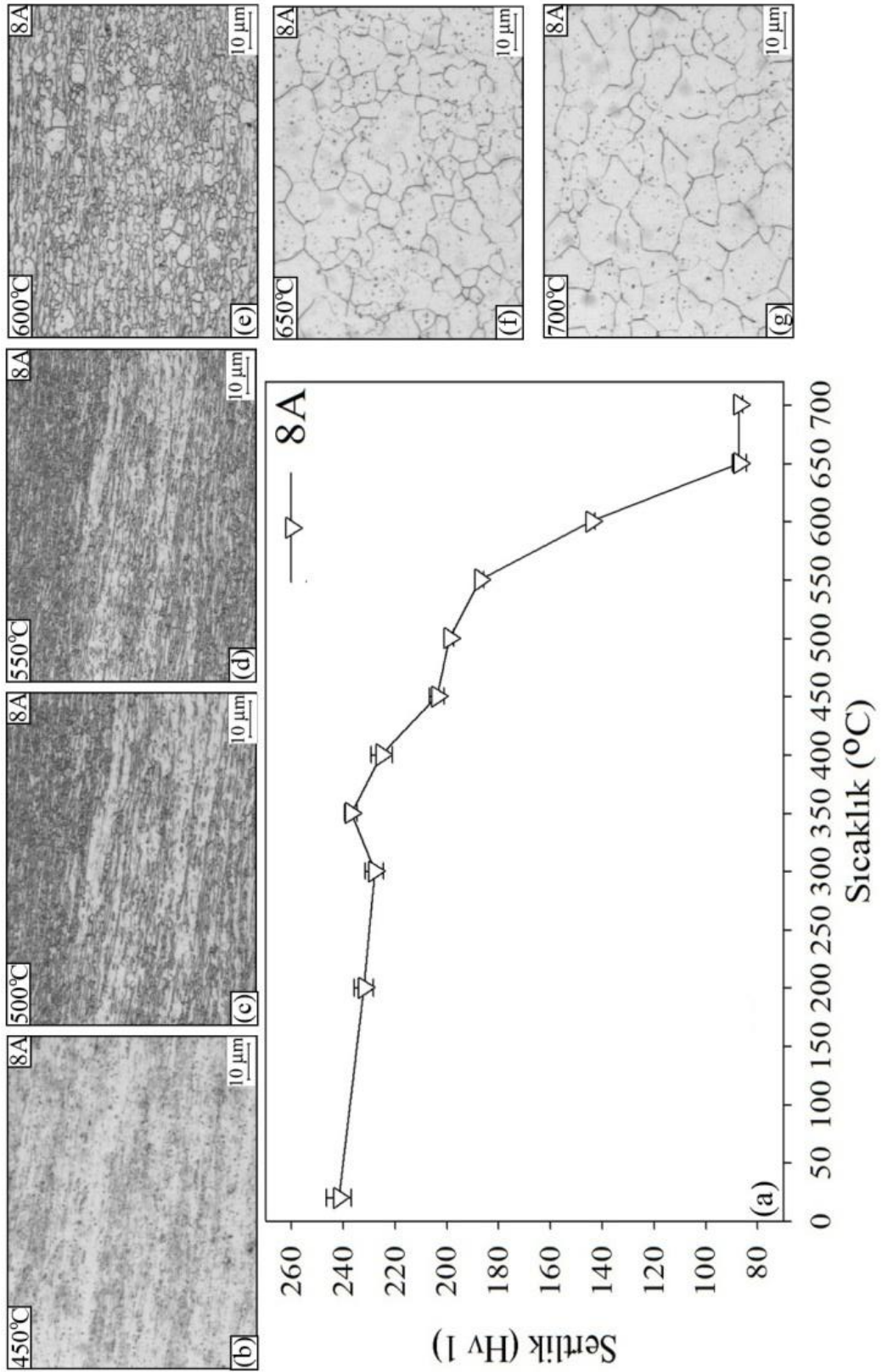
Rota-A'da 8 paso sayısında EKAE işlemi sonrası kütlesele formdaki IF-çeliğinin tavlama sırasında, toparlanma ve yeniden kristalleşmenin gerçekleştiği sıcaklık aralıkları sırasıyla 20-400°C ve 400-650°C olarak belirlenmiştir. Bu durumdaki IF-çeliğinin 650°C'den daha yüksek sıcaklıklarda tavlama durumunda ise tane irileşmesi ortaya çıkmaktadır (Şekil 51). Nitekim bu durum rota-A'da 8 paso uygulanmış IF-çeliğinin çeşitli sıcaklıklarda tavlama sonrası elde edilen içyapı resimlerinde de görülmektedir (Şekil 51(b)-(g)). Bu resimlerden, rota-A'da 8 paso yapılmış IF-çeliğinin 450 °C'de bir saat süre ile tavlama sonrasında yönlenmiş bantlı yapı içerisinde çekirdeklenmenin dolayısıyla yeniden kristalleşmenin başladığı görülmektedir (Şekil 51(b)). 450 °C - 550 °C sıcaklık aralığında uygulanan ısı işlemleri sonrasında ise bir taraftan çekirdeklenme yapı içerisinde yaygınlaşmakta diğer taraftan oluşmuş çekirdekler büyüme eğilimine girmektedir (Şekil 51(c)-(d)). Ayrıca, aynı yapıda hala yeniden kristalleşme sürecinin belirginleşmediği bölgelerin varlığı da dikkati çekmektedir (Şekil 51(c) ve (d)). Tavlama sıcaklığının 600°C olması durumunda ise içyapı büyük oranda yeniden kristalleşmekte ve bu yapıda iri ve ince taneler bir arada (kısmi bimodal yapı) bulunmaktadır (Şekil 51(e)). Ancak bu yapıda yönlenme etkisinin az da olsa hala mevcut olduğu söylenebilir. Rota-A'da 8 pasoluk EKAE işlemi uygulanmış çeliğin 650°C'de bir saat tavlama sonrasında içyapısının tamamen yeniden kristalleştiği görülmektedir (Şekil 51(f)). Nitekim bu ısı işlemi sonrası içyapıda deformasyon etkisi tamamen ortadan kalkmakta ve bütün yapı eş-eksenli yeni tanelerden oluşmaktadır. Dolayısıyla daha önce de belirtildiği gibi rota-A'da gerçekleştirilen 8 pasoluk işlem sonrası yeniden kristalleşmenin tamamlandığı sıcaklığın (yeniden kristalleşme sıcaklığı) 650°C olduğu söylenebilir. Bu sıcaklığın üzerinde uygulanan ısı işleminin ise yeniden kristalleşmiş tane yapısında çok belirgin olmasa da belli oranda irileşmeye (tane büyümesi) neden olduğu ilgili resimden görülmektedir (Şekil 51 (g)).

Rota-C'de 8 paso sayısında EKAE uygulanmış durumdaki çeliğin tavlama sırasında, toparlanma ve yeniden kristalleşmenin gerçekleştiği sıcaklık aralıkları sırasıyla 20-450°C ve 450-650°C olarak belirlenmiştir. Söz konusu durumdaki IF-çeliğinin 650°C'den daha yüksek sıcaklıklarda tavlama durumunda ise tane irileşmesinin başladığı görülmektedir (Şekil 52 ve Tablo 8 ). Bu durum hem sertlik eğrisinden, hem de belirtilen aralıklarda elde edilen içyapı resimlerinden görülmektedir (Şekil 52). Nitekim 450°C'de uygulanan 1 saatlik tavlama işlemi sonrası içyapıda önemli bir çekirdeklenme etkisi gözlenmemektedir (Şekil 52(b)). Tavlama sıcaklığının bu değerin üzerine çıkarılması

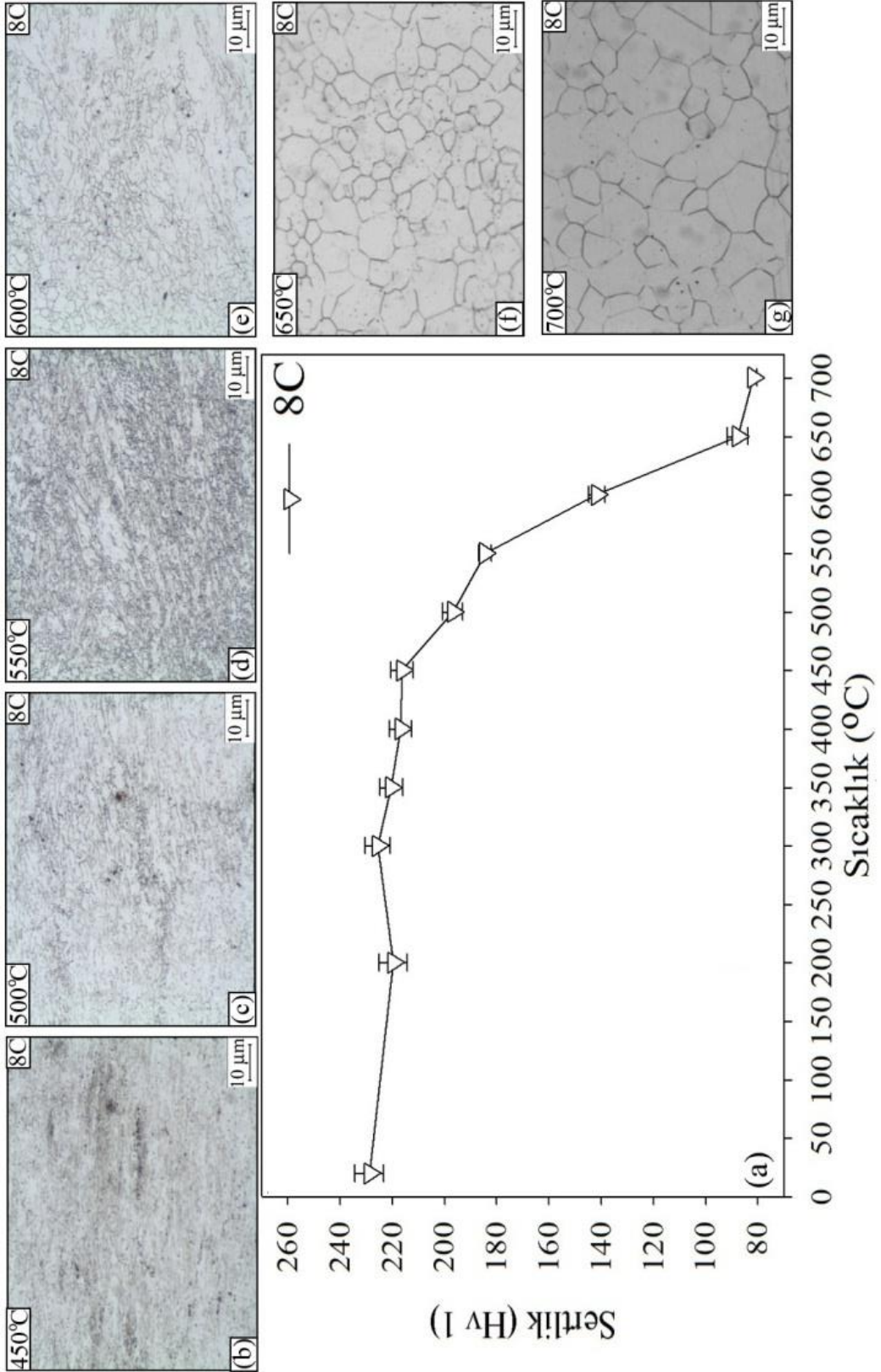
durumunda ise içyapıda yeniden kristalleşme emareleri olarak kabul edilen çekirdeklenme etkileri görülmeye başlanmaktadır. Şöyle ki, 500 °C ve 550 °C ısı işlem sıcaklıklarında gerçekleştirilen tavlama sonrası içyapıda bir taraftan çekirdeklenme devam ederken, diğer taraftan da eş-eksenli yeni tanelerin belirginleştiği dikkati çekmektedir (Şekil 52(c)-(d)). 600°C’de yapılan tavlama sonrası ise içyapının halen tam olarak yeniden kristalleşmediği ve bazı bölgelerde çekirdeklenmenin devam ettiği görülmektedir (Şekil 52(e)). Bu durum söz konusu uygulama rotasında diğer rotalarla karşılaştırıldığında yeniden kristalleşme davranışının nispeten daha yavaş geliştiğini göstermektedir. Tavlama sıcaklığının 650 °C olması durumunda ise yeniden kristalleşmenin tamamlandığı ve içyapının tamamen eş-eksenli yeni tanelerden oluştuğu ilgili optik resminden açıkça görülmektedir (Şekil 52(f)). Tavlama sıcaklığının daha da arttırılması ise içyapıdaki yeniden kristalleşen tanelerin büyümesine neden olmaktadır (Şekil 52(g)).

Rota-Bc ve rota-E’de uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası oluşan ÜİT yapılı IF-çeliğinin yeniden kristalleşme davranışının büyük oranda benzer karakterde olduğu görülmektedir. Nitekim her iki rota için toparlanma ve yeniden kristalleşmenin gerçekleştiği sıcaklık aralıkları sırasıyla 20-450°C ve 450-650°C olarak belirlenmiştir (Şekil 53-54 ve Tablo 8). Ayrıca, 650 °C’nin üzerindeki sıcaklıklarda tavlama işlemleri her iki durumdaki çelikte de tane irileşmesine neden olmaktadır. Bu benzerlik söz konusu rotaların uygulanış prensiplerinin ve bunun sonucunda elde edilen içyapısal özelliklerin yaklaşık aynı olmasından kaynaklanmaktadır. Nitekim, söz konusu içyapılar nispeten daha ince taneli ve eş-eksenli bir karakter sergilemektedir (Şekil 25-26). Ancak, diğer rotalara kıyasla rota-Bc sonrası daha ince tane yapısı elde edilmektedir (Tablo 5). Bu durum genel olarak sahip olunan iç enerji değerinin de yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Yüksek iç enerji ise yeniden kristalleşme başlangıç sıcaklığı ve üzerinde daha homojen ve hızlı bir çekirdeklenmeye ve ardından yeni tane oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 53(b)). Nitekim, tavlamanın 500°C-550°C aralığındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi durumunda içyapıdaki çekirdeklenmenin büyük oranda tamamlandığı ve yeni tane sınırlarının belirginleştiği ilgili optik resimlerden görülmektedir (Şekil 53(c)-(d)). Rota-E’de 8 pasoluk EKAE uygulanmış durumdaki çeliğin yeniden kristalleşme sürecinin rota-Bc’ye göre daha yavaş geliştiği söylenebilir. Nitekim, rota-E’de gerçekleştirilen işlem sonrası 450°C’de uygulanan tavlama içyapıda daha seyrek bir çekirdeklenme etkisine neden olmaktadır (Şekil 54(b)). Bu durumun 500 °C- 550 °C aralığında geçerli olduğu ilgili içyapı resimlerinden de anlaşılmaktadır (Şekil 54(c)-(d)). 8Bc ve 8E sonrası 600°C’de uygulanan

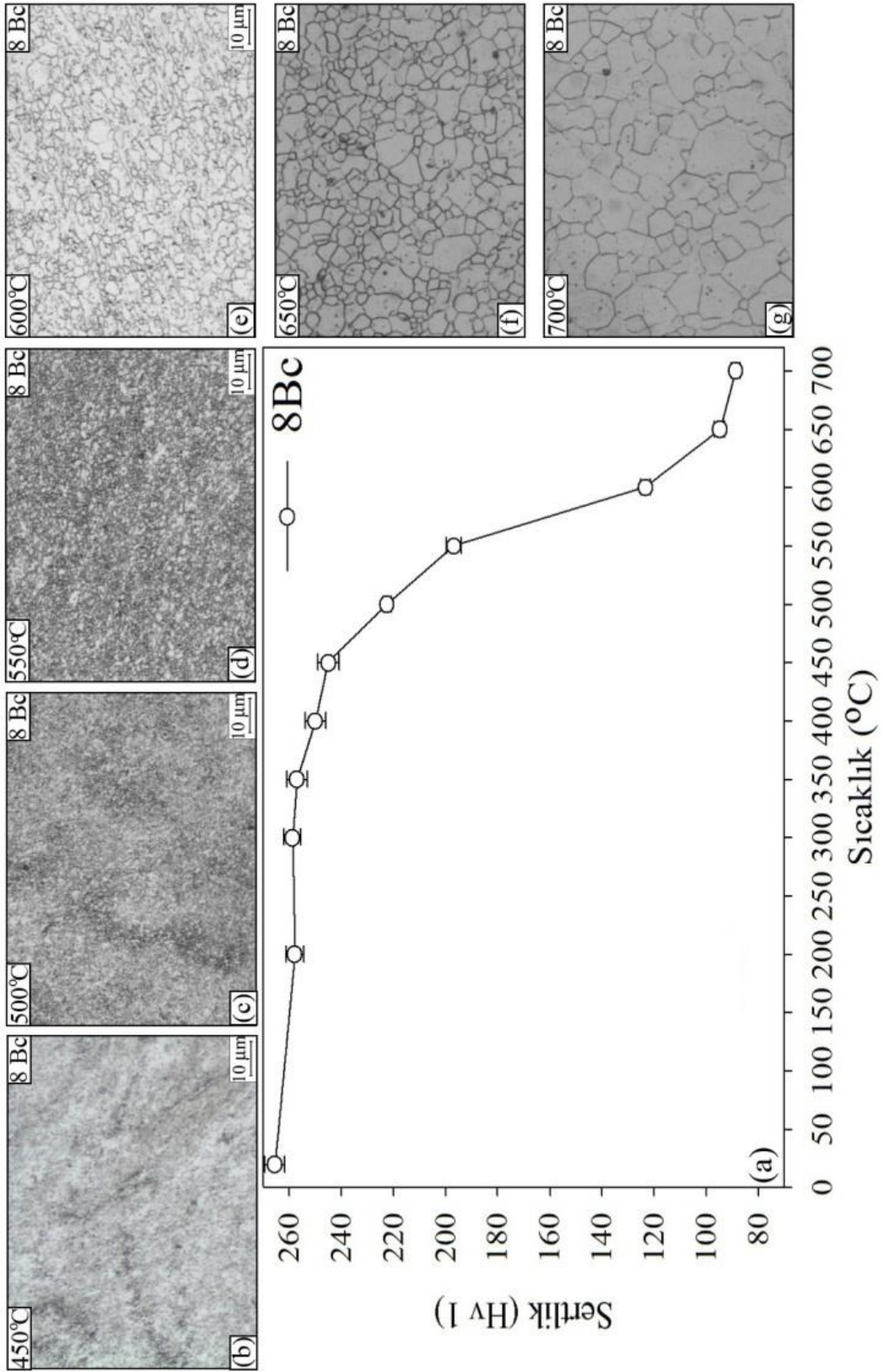
tavlama işlemleri ise yeniden kristalleşmenin büyük oranda tamamlanmasına ve içyapıda iri ve ince tanelerin birlikte bulunmasına neden olmaktadır (Şekil 53(e) ve Şekil 54(e)). 650 °C'de uygulanan 1 saatlik tavlamanın ise diğer rotalarda olduğu gibi 8Bc ve 8E sonrası da içyapının tamamen yeniden kristalleşmesine neden olduğu ilgili resimlerden gözlenmektedir (Şekil 53(f) ve Şekil 54(f)). Bu sıcaklık değerinin üzerinde gerçekleştirilen ısı işlemlerin ise içyapıda yeniden kristalleşen tanelerin büyüme sürecine girmesine neden olmaktadır (Şekil 53(g) ve Şekil 54(g)).



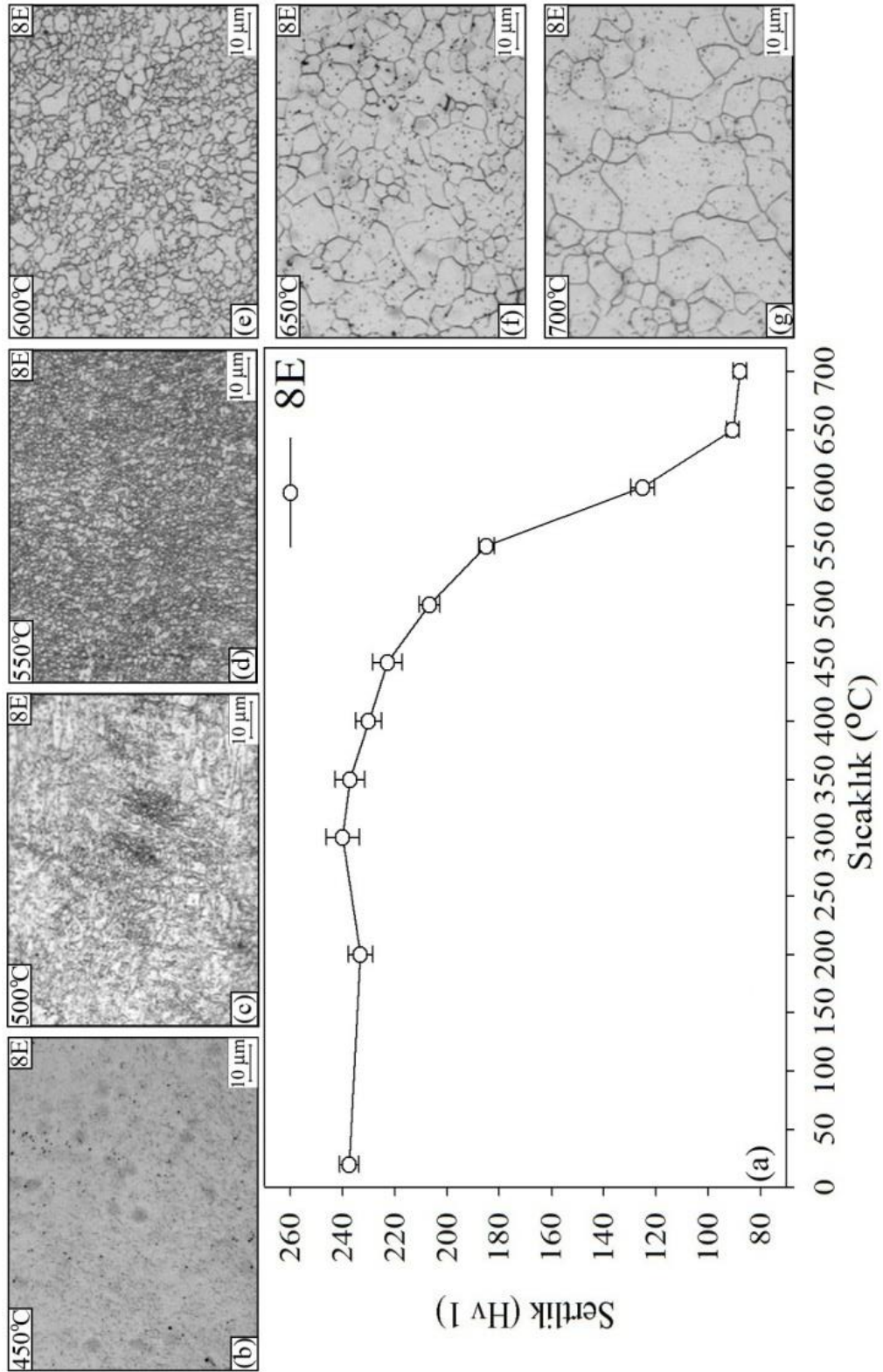
Şekil 51. (a) Rota-A'da 8 pasoluk EKAE işlemi uygulanmış ÜİT yapılı IF-çeliğinin yeniden kristalleşme eğrisi, (b)-(g) seçilen sıcaklık değerlerinde bir saat süreyle uygulanan ısıl işlem sonrası ortaya çıkan içyapıları gösteren optik resimler



Şekil 52. (a) Rota-C’de 8 pasoluk EKAЕ işlemi uygulanmış UİT yapılı IF-çeliğinin yeniden kristalleşme eğrisi, (b)-(g) seçilen sıcaklık değerlerinde bir saat süreyle uygulanan ısıl işlem sonrası ortaya çıkan içyapıları gösteren optik resimler.



Şekil 53. (a) Rota-Bc’de 8 pasoluk EKAİ işlemi uygulanmış durumdaki İF-çeliğinin yeniden kristalleşme eğrisi, (b)-(g) seçilen sıcaklık değerlerinde bir saat süreyle uygulanan ısıtım işlem sonrası ortaya çıkan içyapıları gösteren optik resimler.



Şekil 54. (a) Rota-E'de 8 pasoluk EKAЕ işlemi uygulanmış UİT yapılı çeliğin yeniden kristalleşme eğrisi, (b)-(g) seçilen sıcaklık değerlerinde bir saat süreyle uygulanan ısıл işlem sonrası ortaya çıkan içyapıları gösteren optik resimler



Tablo 8. Farklı rota ve paso sayılarında EKAE işlemi uygulanarak UİT yapılı hale getirilen IF-çeliğinde; toparlanma, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi davranışlarının etkin olduğu sıcaklık aralıkları

EKAE rotası	Paso sayısı	Toparlanma bölgesi sıcaklık aralığı (°C)	Yeniden kristalleşme bölgesi sıcaklık aralığı (°C)	Yeniden kristalleşme sıcaklığı (°C)
	1	20-550	550-650	650
Rota-A	2	20-500	500-650	650
	4	20-500	500-600	650
	8	20-400	400-650	650
Rota-C	2	20-500	500-650	650
	4	20-500	500-650	650
	8	20-450	450-650	650
Rota-Bc	4	20-450	450-650	650
	8	20-450	450-650	650
Rota-E	8	20-450	450-650	650

### 3.3.2. Yeniden Kristalleşme Kinetiği

Değişik rotalarda uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası UİT yapılı hale getirilen kütsel formdaki IF-çeliğinin 600°C’de gerçekleştirilen ısı işlemi sırasında sergilediği yeniden kristalleşme kinetiği incelenmiş ve elde edilen sonuçlar ve içyapı resimleri Şekil 55-58’de gösterilmiştir. Bu çalışma için 600°C’lik ısı işlem sıcaklığı daha önce gerçekleştirilen termal stabilite çalışmaları dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu çalışmadaki temel amaç, seçilen sıcaklıkta zamana bağlı kısmi yeniden kristalleşme/tane büyümesi sağlayarak iri ve ince tanelerin bir arada bulunduğu (bimodal) bir içyapı oluşturma ve bu sayede mukavemet-süneklik optimizasyonu sağlayabilmektedir. Çünkü literatürdeki çeşitli çalışmalar, içyapıda çok ince tanelerle nispeten daha iri tanelerin bir arada bulundurulmasının yüksek mukavemet ve aynı zamanda yeterli sünekliğin elde edilmesinde etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir [9, 63, 66, 68, 69, 118]. Şekil 55-58’de verilen zamana bağlı yeniden kristalleşme kinetiği eğrileri incelendiğinde, bütün rotalar için yeniden kristalleşmenin başlangıçta hızlı bir şekilde geliştiği, zaman ilerledikçe yeniden kristalleşme hızının düştüğü ve 120 dk sonra ise çok yavaş ilerlediği dikkati çekmektedir. Bu durumu farklı zaman aralıklarında alınan içyapı resimleri de desteklemektedir. Bu resimlerde, 30 dk ısı işlem süresine kadar içyapıda belli oranda yeniden kristalleşme sürecinin başladığı, ancak hala bu sürece katılmayan bölgelerin de

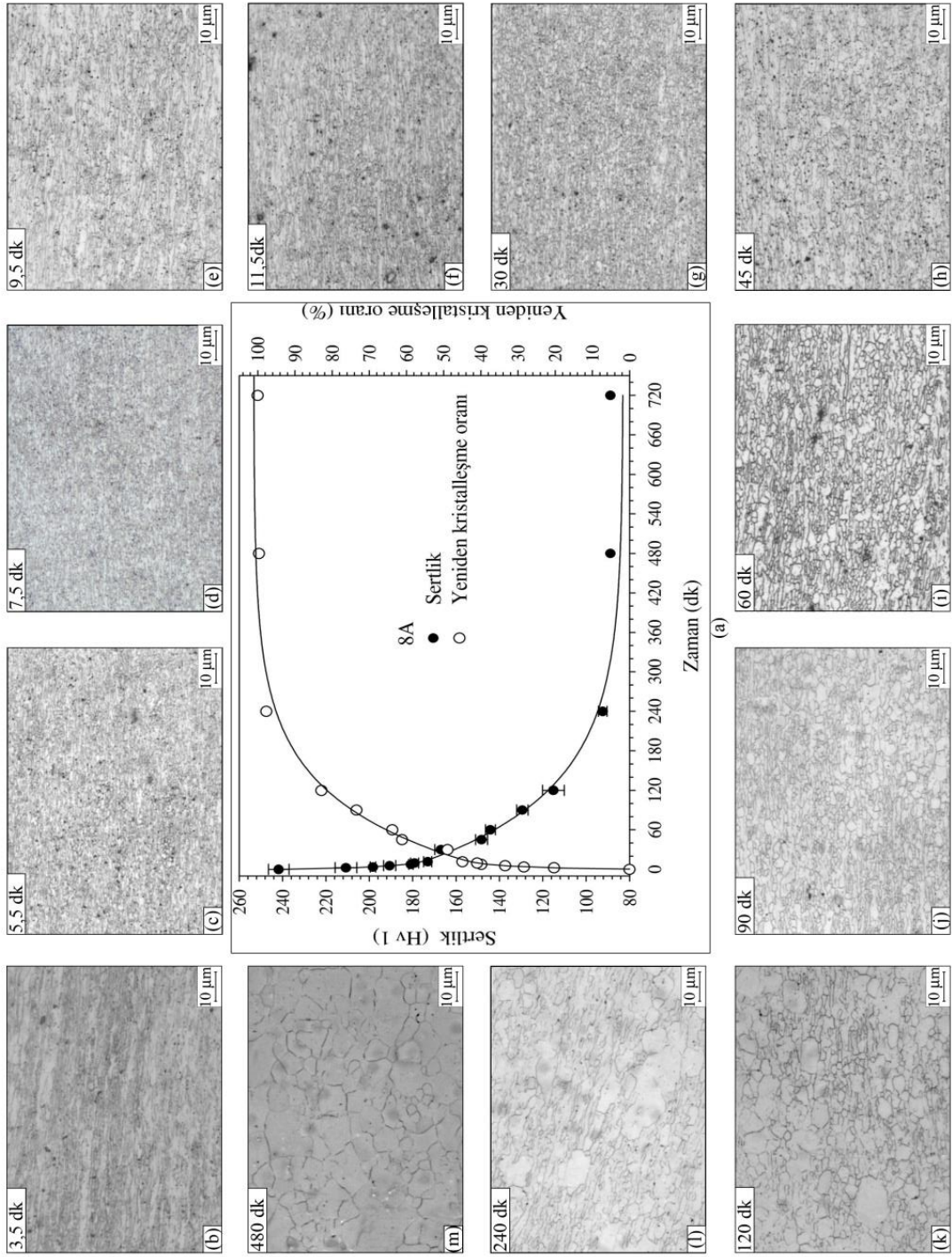
bulunduğu dikkati çekmektedir (Şekil 55(g)-58(g)). Dolayısıyla bu zaman süreci içerisinde içyapının daha çok toparlandığı ve yeniden kristalleşme için çekirdeklenme sürecinin başlamış olduğu söylenebilir. Tavlama süresinin 45 dakikaya çıkarılması durumunda ise çekirdeklenme sürecinin devam ettiği ve önceden çekirdeklenen yapıların ise tane oluşum sürecine devam ettikleri ilgili resimlerden görülmektedir (Şekil 55(h)-58(h)). 600°C’de uygulanan 60 dk’lık tavlama sonrası ise içyapıda çekirdeklenmenin büyük oranda tamamlandığı ve yeni tanelerin oluşum süreçlerinin devam ettiği dikkati çekmektedir. Nitekim yeni oluşan tanelerin optik resimlerde belirgin bir şekilde görünür duruma gelmesi bu sonucu doğrulamaktadır (Şekil 55(i)-58(i)). Bu durum 90 dk’lık tavlama süresi sonrası da çok fazla değişmemekte, ancak bu süre sonunda içyapıdaki deformasyon etkisi büyük oranda ortadan kalkmaktadır (Şekil 55(j)-58(j)). Tavlama süresinin 120 dk olması durumunda ise yeniden kristalleşme sürecinin büyük oranda tamamlandığı ilgili resimlerden anlaşılmaktadır (Şekil 55(k)-58(k)). Ayrıca, bu tavlama süresi ile birlikte içyapının belli oranda farklılaşmaya başladığı ve içyapının nispeten iri taneler ile ince tanelerin birlikte bulunduğu bir forma dönüştüğü ilgili optik resimlerden açıkça görülmektedir (Şekil 55(k)-(l)-Şekil 58(k)-(l)). Bu durum rota-E’de gerçekleştirilen 8 pasoluk işlem sonrası uygulanan 120 dk’lık tavlama ile çok daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır (Şekil 58(k)). Nitekim verilen optik resimler yakından incelendiğinde, söz konusu içyapılarda tanelerin boyutsal saçılımlarının çok geniş bir aralıkta olduğu görülmektedir (Şekil 55(k)-58(k)). Bu türden bir içyapının 8Bc sonrası uygulanan ısıtma işlem sonrası nispeten daha erken süreçlerde (90 dk) başladığı söylenebilir (Şekil 57(j)). Tavlama işleminin 240 dk ve bunun üzerindeki sürelerde uygulanması durumunda içyapının yeniden kristalleşme sürecini tamamladığı ve belli oranda tane irileşmesi sürecine geçildiği görülmektedir (Şekil 55(l)-58(l) ve Şekil 55(m)-58(m)).

Öte yandan, 600°C’de farklı zaman periyotlarında gerçekleştirilen ısıtma işlemler sonrası elde edilen verilerden yararlanılarak içyapıda meydana gelen yeniden kristalleşme oranının zamana bağlı değişimi ( $X(t)$ ) aşağıda verilen bağıntıdan yararlanılarak belirlenmiştir [119, 120]

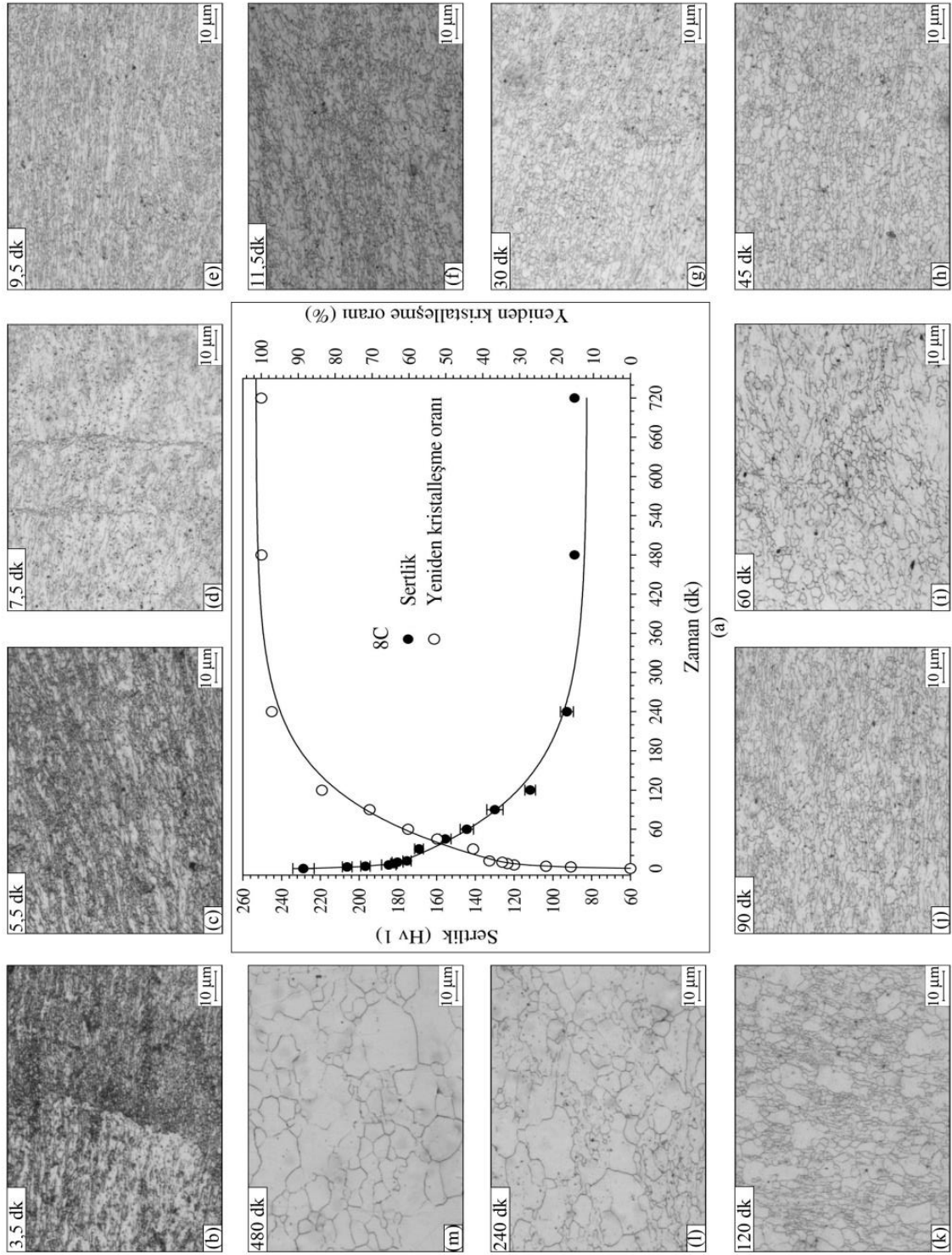
$$X(t) = \frac{H_{\max} - H_t}{H_{\max} - H_{\min}} \quad (4)$$

Bu bağıntıda;  $H_{\max}$  8 paso sonrasında ve ısıtma işlem öncesi ( $t=0$ ) çeliğin sahip olduğu maksimum sertlik değerini,  $H_{\min}$  çeliğin tamamen yeniden kristalleşmiş haldeki minimum

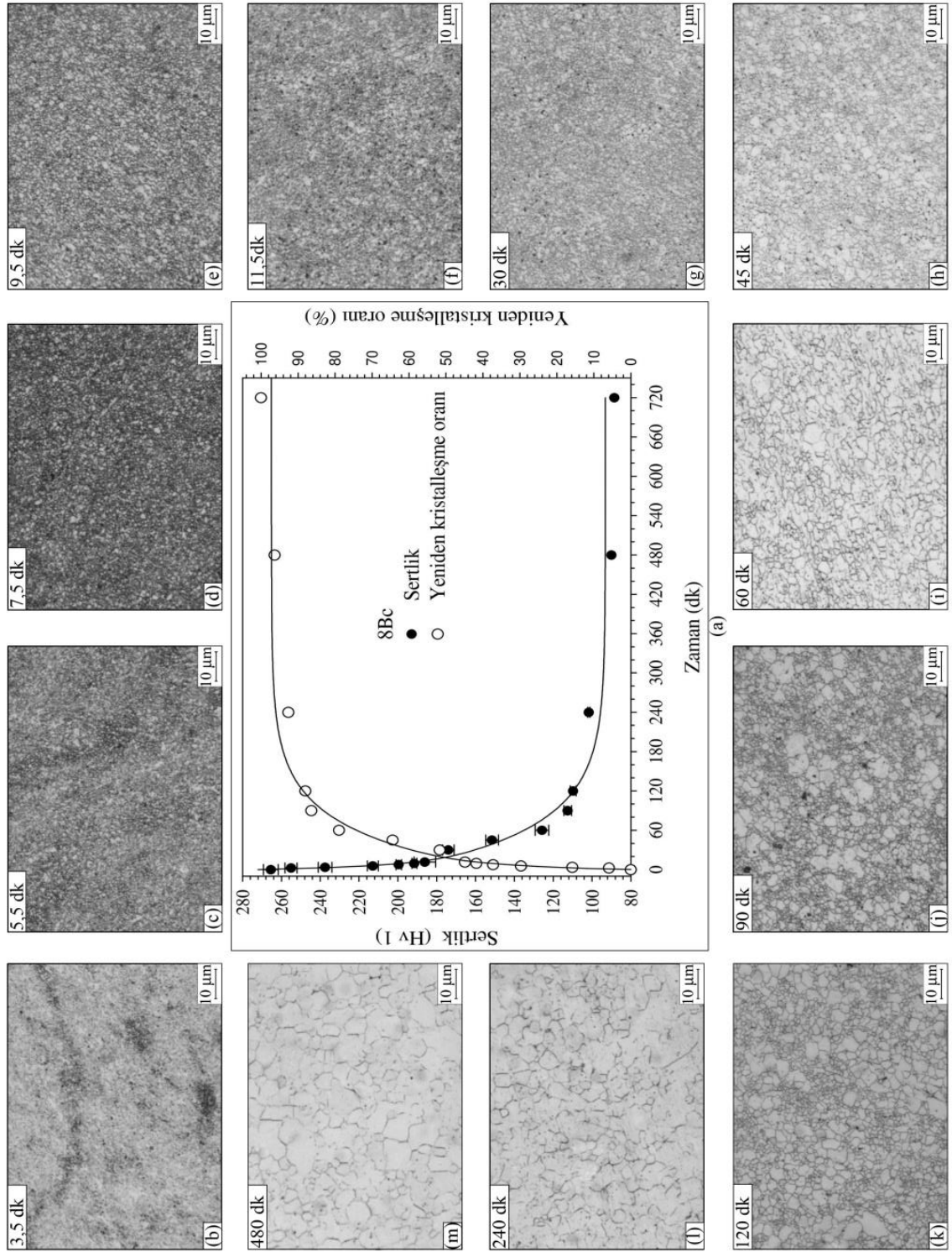
sertlik değerini ve  $H_t$  ise her hangi bir (t) anındaki sertlik değerini vermektedir. Bu bağını kullanarak elde edilen yeniden kristalleşme oranını veren eğriler ise (Şekil 55(a)-58(a))'da sertlik değişim eğrileriyle birlikte verilmiştir. Şekil 59'da ise farklı rotalarda uygulanan 8 pasoluk EKAE işleminin sonrasında elde edilen eğrilerin karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Şekil 55(a)-58(a) ve Şekil 59'da verilen eğriler incelendiğinde, 600°C'de farklı zamanlarda ortaya çıkan yeniden kristalleşmenin başlangıçta hızlı bir şekilde ortaya çıkıp artan tavlama süresi ile azaldığı görülmektedir. Özellikle, %90'lık yeniden kristalleşme oranı sonrası ise yeniden kristalleşmenin çok yavaş bir şekilde devam ettiği izlenmektedir. Bununla birlikte uygulanan EKAE rotasının yeniden kristalleşme kinetiği üzerinde belli oranda etkili olduğu görülmektedir. Şekil 59'dan, rota-A ve rota-Bc'de 8 paso sayısında uygulanan EKAE işleminin sonrasında elde edilen yeniden kristalleşme hızının diğer rotalara göre daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Yeniden kristalleşme rota-C'de uygulanan 8 pasoluk işlem sonrasında ise en düşük hızda gerçekleşmektedir. Öte yandan, 8E sonrası elde edilen yeniden kristalleşme hızının ise 8C'ye göre yüksek, ancak 8A ve 8Bc'ye göre ise düşük olduğu gözükmektedir.



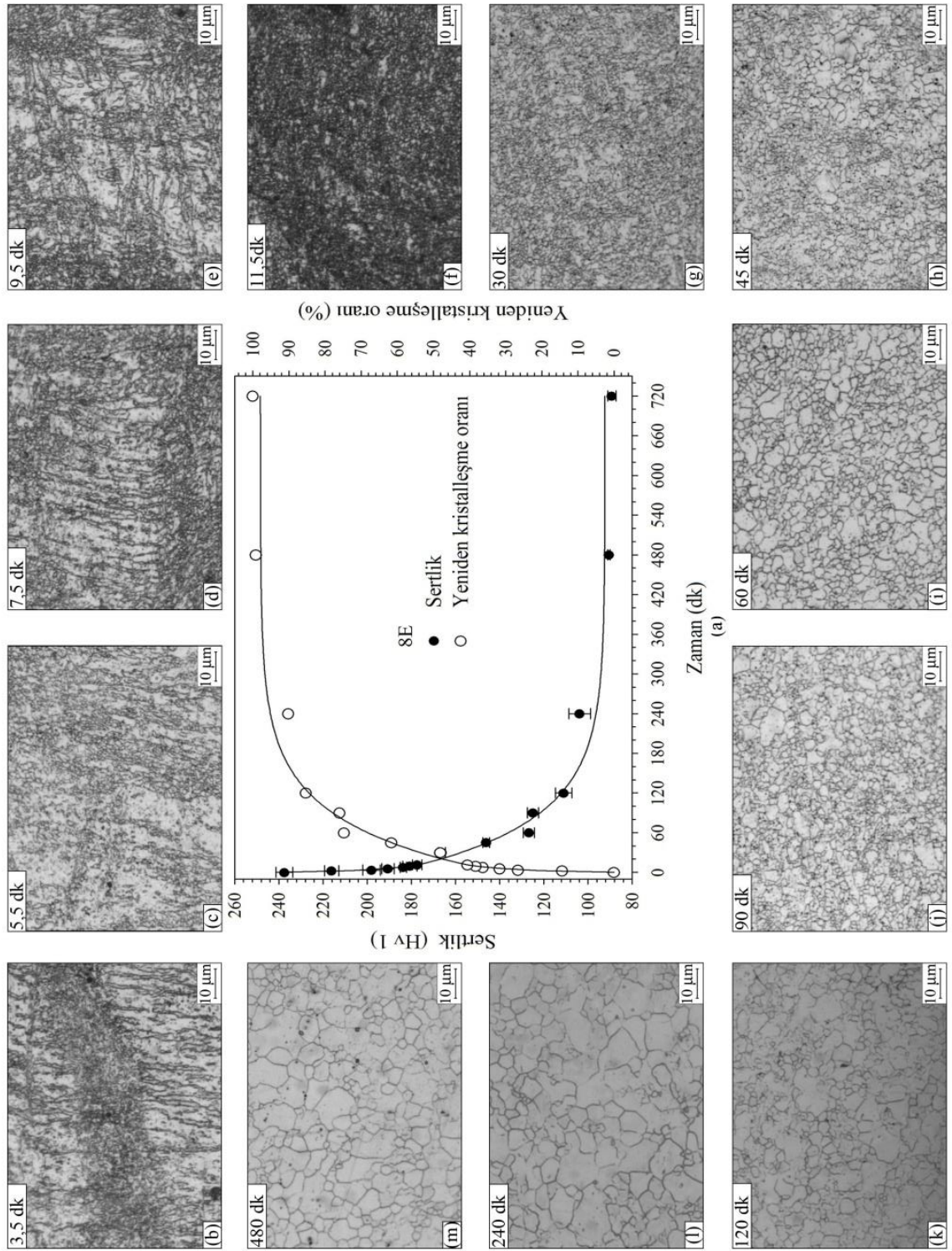
Şekil 55. (a) Rota-A’da uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası elde edilen ÜİT yapılı IF-çeliğinin sertliğinin ve yeniden kristalleşme oranının 600°C’de uygulanan ısıl işlem zamanına göre değişimini gösteren eğriler. (b)-(m) Aynı malzemeye 600 °C’de ve farklı sürelerde uygulanan ısıl işlemler sonrası elde edilen içyapıları gösteren optik resimler



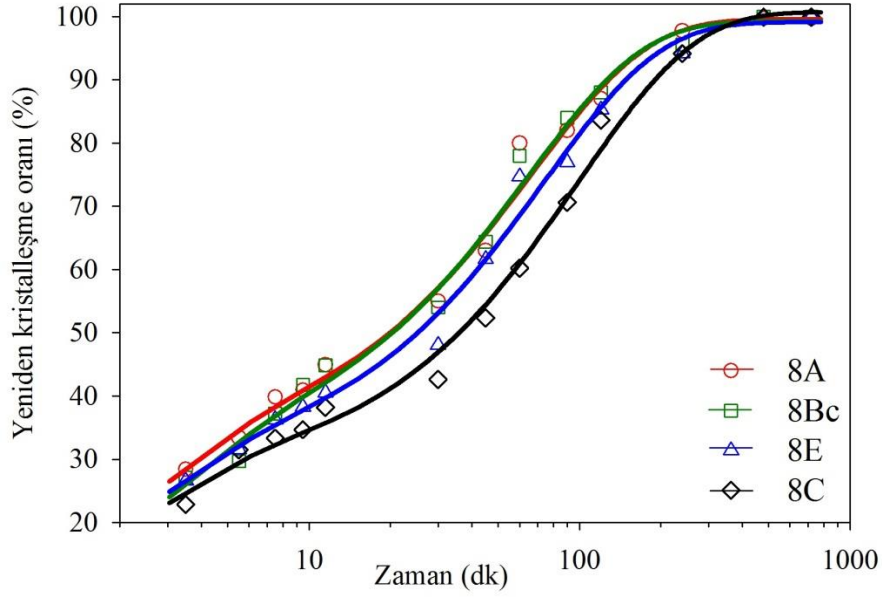
Şekil 56. (a) Rota-C’de uygulanan 8 pasoluk EKAЕ işlemi sonrası elde edilen UİT yapılı IF-çeliğinin sertliğinin ve yeniden kristalleşme oranının 600°C’de uygulanan ısıl işlem zamanına göre değişimini gösteren eğriler. (b)-(m) Aynı malzemeye 600 °C’de ve farklı sürelerde uygulanan ısıl işlemler sonrası elde edilen içyapıları gösteren optik resimler



Şekil 57. (a) Rota-Bc’de uygulanan 8 pasuluk EKAЕ işlemi sonrası elde edilen ÜİT yapıları IF-çeliğinin sertliğinin ve yeniden kristalleşme oranının 600°C’de uygulanan ısıt işlem zamanına göre değişimini gösteren eğriler. (b)-(m) Aynı malzemeye 600 °C’de farklı sürelerde uygulanan ısıt işlemler sonrası elde edilen içyapıları gösteren optik resimler



Şekil 58. (a) Rota-E’de uygulanan 8 pasoluk EKAЕ işlemi sonrası elde edilen UİT yapılı IF-çeliğinin sertliğinin ve yeniden kristalleşme oranının 600°C’de uygulanan ısıl işlem zamanına göre değişimini gösteren eğriler. (b)-(m) Aynı malzemeye 600 °C’de farklı sürelerde uygulanan ısıl işlemler sonrası elde edilen içyapıları gösteren optik resimler



Şekil 59. Farklı rotalarda uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrasında 600°C'de uygulanan ısıl işlem zamanının yeniden kristalleşme oranına etkisini gösteren eğriler

IF-çeliğine uygulanan EKAE işlemi sonrasında en uygun mukavemet ve süneklik özellikleri 8E şartında yapılan EKAE işlemi sonrası elde edilmiştir. Ayrıca, bu durumda yeniden kristalleşme hızının nispeten daha düşük olması, farklı ısıl işlem tasarımlarıyla çok daha uygun mukavemet-süneklik değerlerinin elde edilebileceğini göstermektedir. Bu nedenle gerek 8E durumunda ve gerekse 8E sonrası farklı sıcaklık ve sürelerde uygulanan ısıl işlemler sonrası ortaya çıkan içyapıların daha detaylı bir şekilde analiz edilmesi gereği ortaya çıktı. Bu kapsamda, ısıl işlemler öncesi ve belli şartlarda uygulanan ısıl işlemler sonrası EBSD incelemeleri yapıldı ve elde edilen içyapı resimleri Şekil 60-64'de gösterildi. Ayrıca, tane boyutu ve tane sınırı açılarını gösteren diyagramlar da ilgili şekillerde verilmiştir. Şekil 60(a)'da verilen EBSD resmi incelendiğinde, söz konusu çeliğin 8E sonrası ortalama 0,9  $\mu\text{m}$  tane boyutuna sahip eş-eksenli bir yapı sergilediği gözükmektedir. Tane boyutu dağılımını gösteren diyagram incelendiğinde ise, tanelerin yaklaşık %52'sinin boyut olarak 1  $\mu\text{m}$ 'nin altında olduğu ortaya çıkmaktadır (Şekil 60(b)). Ayrıca, bu tanelerin büyük bir bölümünün de birbirinden geniş açılı sınırlarla ayrıldığı dikkati çekmektedir. Nitekim, 8E sonrası içyapıda geniş açılı tane sınırları (GATS) oranının yaklaşık % 62 mertebesinde olduğu söylenebilir (Şekil 60(c)). Burada dikkati çeken bir konu ise EBSD resimlerine dayalı olarak elde edilen tane boyutu ile daha önce TEM resimlerine göre

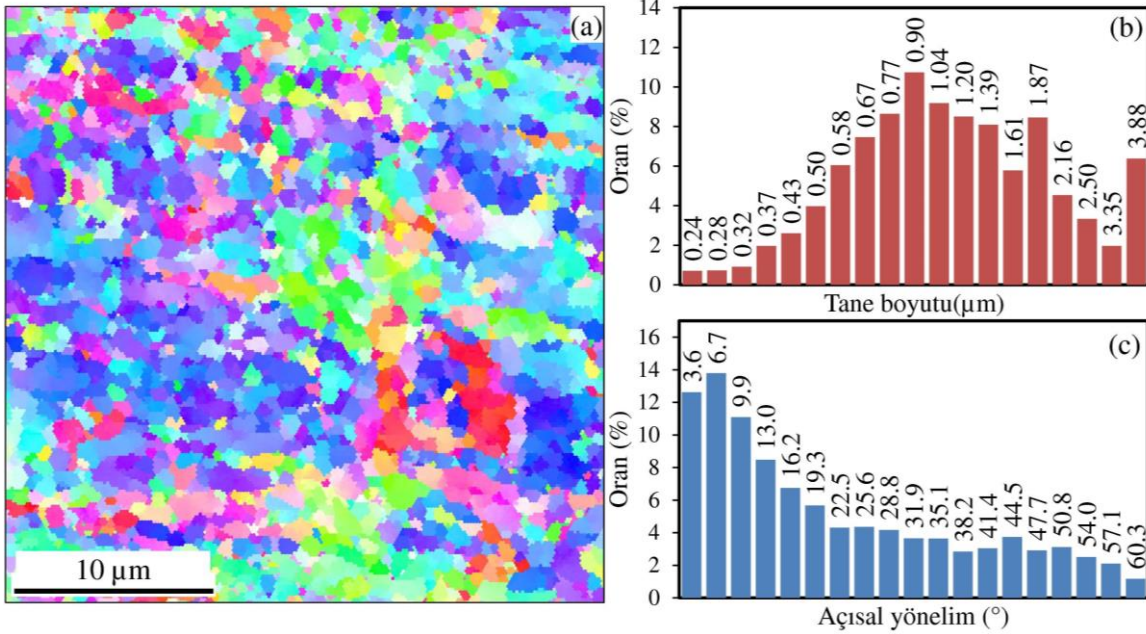


belirlenen tane boyutu değerleri arasındaki farktır. Şöyle ki, EBSD resimlerine dayalı olarak belirlenen ortalama tane boyutu  $0,9 \mu\text{m}$  iken, TEM resimlerinden elde edilen tane boyutu değeri ise  $0,5 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Bu durum TEM yönteminin ayırt etme gücünün daha yüksek olmasına bağlı olarak açıklanabilir. Nitekim TEM ile elde edilen içyapı resimlerinde, kristalografik yönelime göre ortaya çıkan çok hassas kontrast farklılıkları bile ayırt edilebilmekte ve ilgili resimlere yansıtılmaktadır. Ayrıca, TEM nispeten daha dar bölgelerde görüntüleme yapabilirken, EBSD yönteminde ise çok daha geniş bir bölge inceleme alanı olarak seçilebilmektedir. Buna bağlı olarak da çok küçük yönelim farkları gibi bazı ayrıntılarının bu yöntemle tam olarak algılanması mümkün olmayabilir. Literatürdeki çalışmalarda da vurgulanan bu durum, UİT yapılı malzemeler gibi çok ince taneler içeren yapılarda belli oranda ölçüm farklarının da ortaya çıkmasına neden olmaktadır. [111]

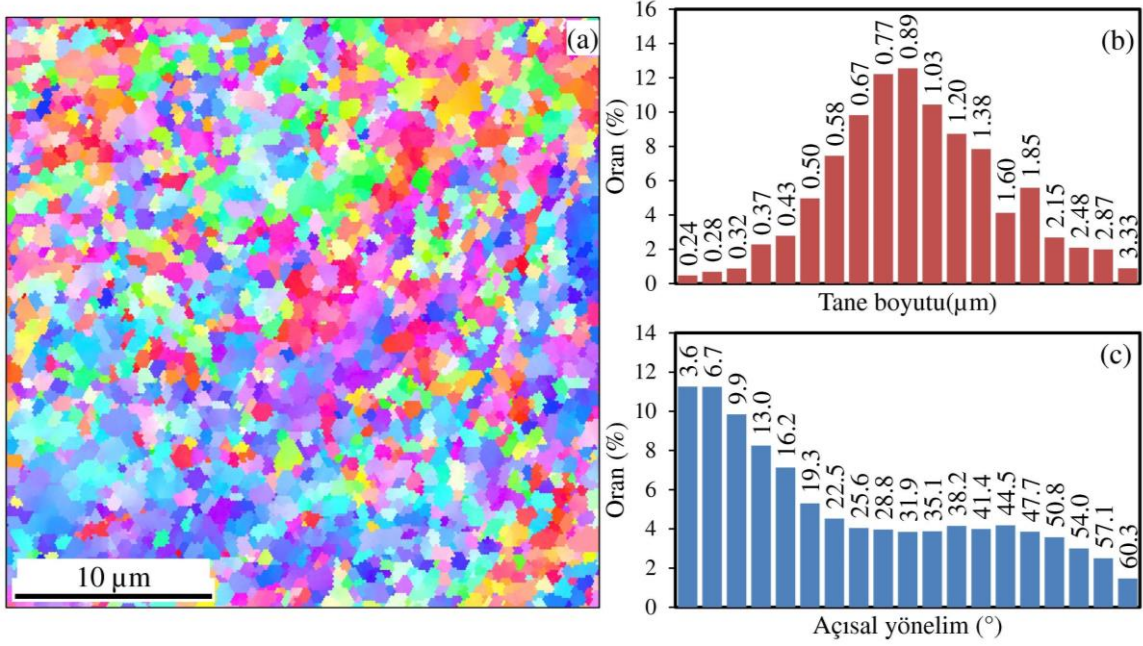
Şekil 61(a)'da verilen EBSD resmi incelendiğinde,  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 60 dk uygulanan ısıtma işleminin içyapıya ait tane boyutu ve tane boyutu dağılımı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı ve bu işlem sonrası ortalama tane boyutunun yaklaşık  $0,95 \mu\text{m}$  olduğu belirlenmiştir (Şekil 61(a)-(b)). Bu sonuçlar, 8E şartlarında EKAE işlemi uygulanmış çeliğe  $500^\circ\text{C}$ 'de 60 dk süre ile uygulanan ısıtma işleminin içyapıda henüz yeniden kristalleşmeyi başlatmadığını göstermektedir. Ancak, tane sınırlarının açılma yönelimlerinin dağılım oranları incelendiğinde, GATS oranının bir miktar artış göstererek % 52'den % 67'ye yükseldiği anlaşılmaktadır (Şekil 61(c)). Bu sonuçlar yukarıda verilen ısıtma kararlılık çalışmalarında elde edilen sonuçlar ile uyum içerisindedir.

Söz konusu çeliğe  $600^\circ\text{C}$ 'de 11,5 dk süre ile uygulanan EKAE işleminin içyapıda bazı tanelerin yeniden kristalleşerek büyümesine neden olduğu ilgili EBSD resimlerinden görülmektedir (Şekil 62(a)). Nitekim içyapıdaki ortalama tane boyutu, ısıtma işlem öncesi duruma göre önemli oranda artarak  $4,3 \mu\text{m}$  değerini almıştır. Tane boyutunun yapıdaki dağılımını gösteren grafikler incelendiğinde, tanelerin yaklaşık %14'ünün  $1 \mu\text{m}$ 'den daha küçük boyuta sahip oldukları, ancak bu değer üzerinde de önemli oranda tanelerin bulunduğu dikkati çekmektedir. Nitekim, tanelerin yaklaşık % 50'sinin  $1-5 \mu\text{m}$  tane boyutu aralığında olduğu ve yaklaşık % 36'sının ise  $5 \mu\text{m}$ 'nin üzerinde tane boyutuna sahip olduğu ilgili diyagramdan anlaşılmaktadır (Şekil 62(b)). Öte yandan söz konusu içyapıdaki tane sınırlarına ait açılma yönelim farkı oranının da ısıtma işlem öncesi duruma göre artarak, GATS oranının % 67'ye yükseldiği görülmektedir (Şekil 62(b)). Bu tavlama sıcaklığında tavlama süresinin 30 dk'ya çıkarılması durumunda ise yeniden kristalleşmenin içyapıya

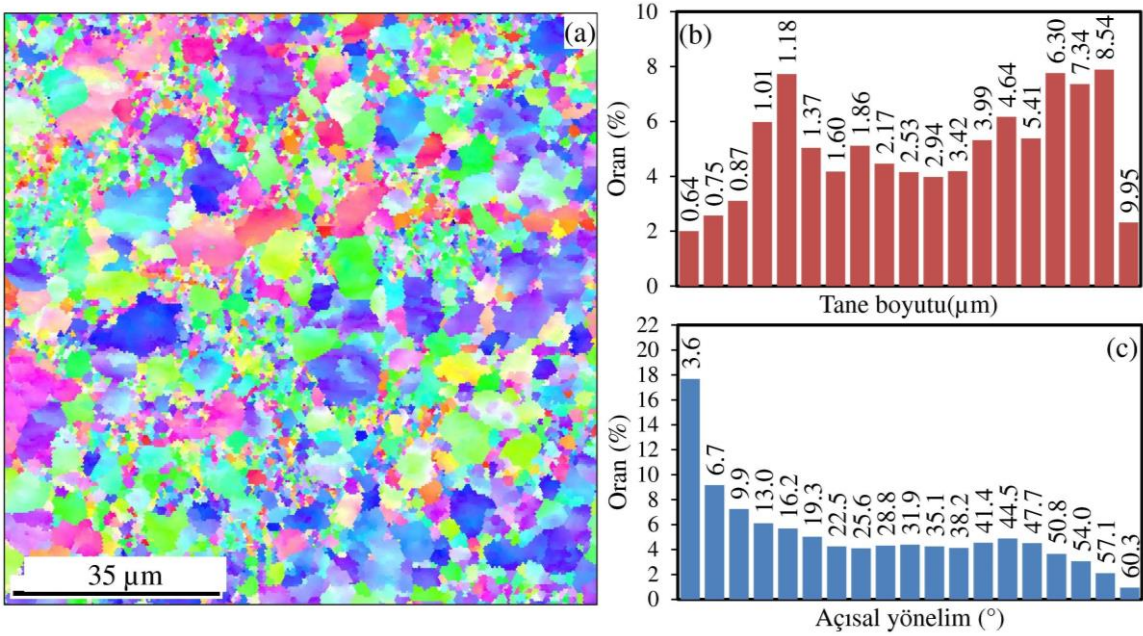
hakim olmaya başladığı söylenebilir (Şekil 63(a)). Nitekim, bu durumda ortalama tane boyutu değeri  $7,2 \mu\text{m}$ 'ye ulaşmaktadır (Şekil 63(a)-(b)). Ayrıca, tane boyutu dağılımı açısından bakıldığında,  $6,5 \mu\text{m} - 12,3 \mu\text{m}$  boyutuna sahip tanelerin daha yoğun olarak içyapıda buldukları, ancak hala bu yapıda mikron altı büyüklüğündeki tanelerin de mevcut olduğu dikkati çekmektedir (Şekil 63(b)). Ayrıca, tane sınırlarının içyapıdaki açılal yönelim oranlarının da  $11,5 \text{ dk}$ 'da yapılan ısıl işlem sonrası duruma göre bir miktar daha artarak, bu yapıdaki GATS oranının % 70'e ulaştığı görülmektedir. Tavlama süresinin daha da artırılarak  $60 \text{ dk}$ 'ya çıkarılması durumunda ise içyapıdaki mikron altı mertebelerdeki tanelerin büyüme sürecine girdiği ve ortalama tane boyutu değerinin de  $9,1 \mu\text{m}$  olduğu ilgili EBSD resminden anlaşılmaktadır (Şekil 64(a)-(b)). Nitekim, yapıdaki tanelerin yaklaşık %78'inin boyutunun  $5,4 \mu\text{m} - 12,1 \mu\text{m}$  aralığında olması ve boyutu  $1 \mu\text{m}$ 'den küçük olan tanelerin oranının ise %1,7 gibi düşük bir değer alması bu sonucu doğrulamaktadır. Öte yandan, söz konusu tanelerin yaklaşık %75'inin ise GATS ile birbirinden ayrıldıkları dikkati çekmektedir (Şekil 64(c)).



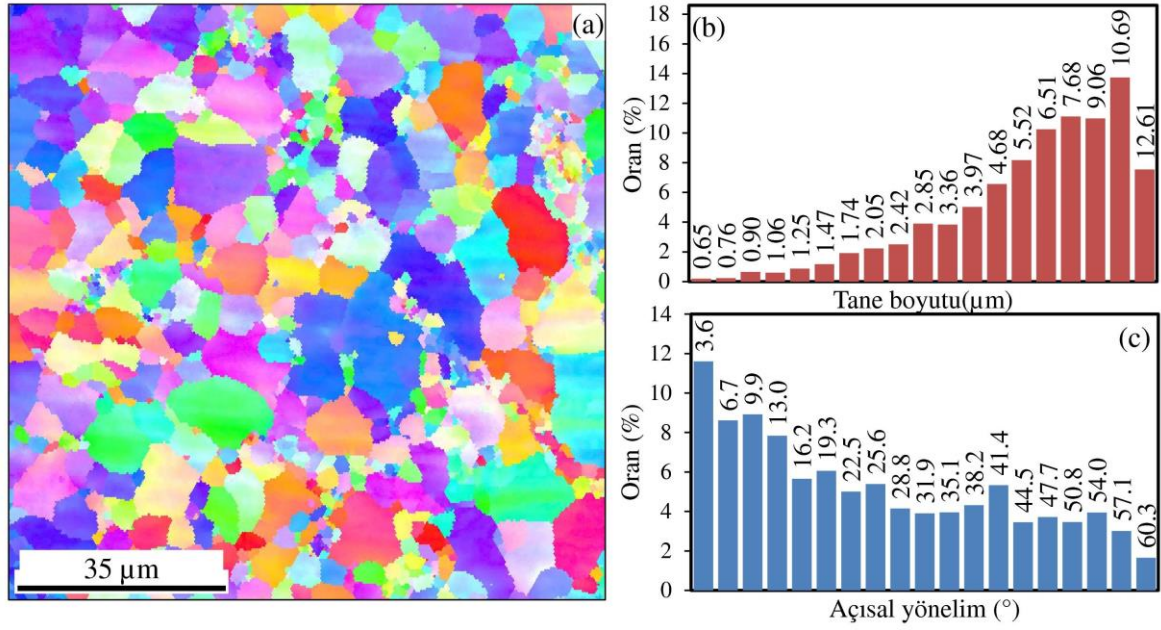
Şekil 60. (a) Rota-E'de 8 paso sayısında uygulanan EKA işlemi sonrası IF-çeliğinde ortaya çıkan içyapıya ait EBSD resmi, (b) tane boyutunun içyapıda oransal dağılımı ve (c) tane sınırı açılal yöneliminin oransal dağılımı



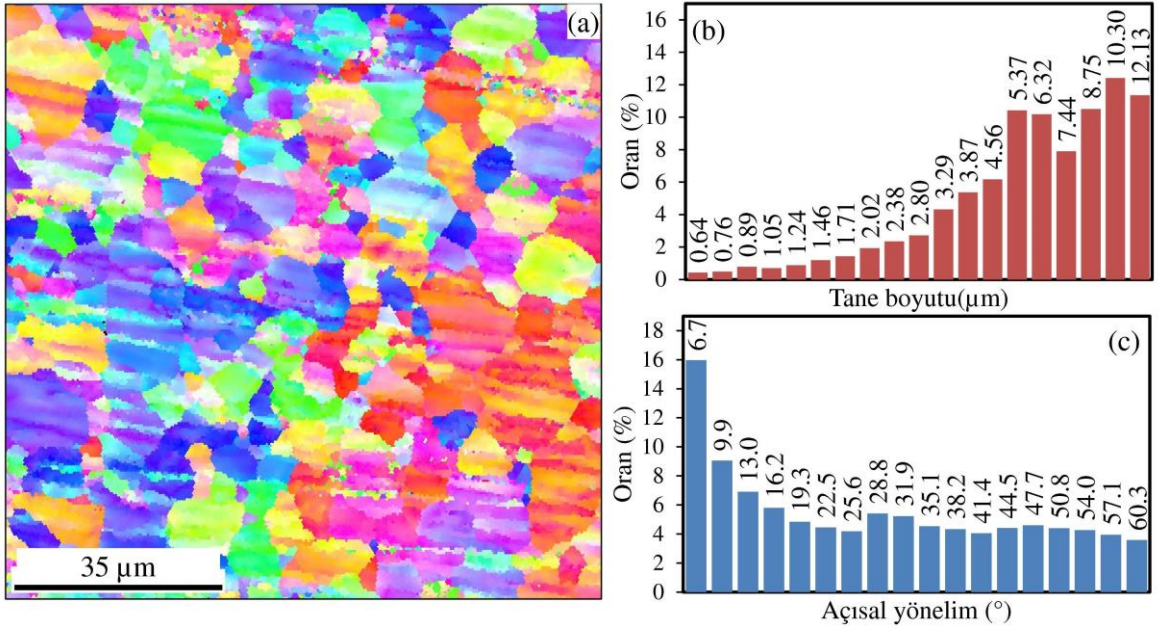
Şekil 61. (a) Rota-E’de 8 paso sayısında EKAЕ işlemine tabi tutulan IF-çeliğinin 500°C’de 60 dk tavllanması sonrasında elde edilen EBSD resimleri, (b) tane boyutunun içyapıda oransal dağılımı ve (c) tane sınırı açısal yöneliminin oransal dağılımı



Şekil 62. (a) Rota-E’de 8 paso sayısında EKAЕ işlemine tabi tutulan IF-çeliğinin 600°C’de 11,5 dk. tavllanması sonrasında elde edilen EBSD resimleri, (b) tane boyutunun içyapıda oransal dağılımı ve (c) tane sınırı açısal yöneliminin oransal dağılımı



Şekil 63. (a) Rota-E’de 8 paso sayısında EKAЕ işlemine tabi tutulan IF-çeliğinin 600°C’de 30 dk. tavllanması sonrasında elde edilen EBSD resimleri, (b) tane boyutunun içyapıda oransal dağılımı ve (c) tane sınırı açısal yöneliminin oransal dağılımı



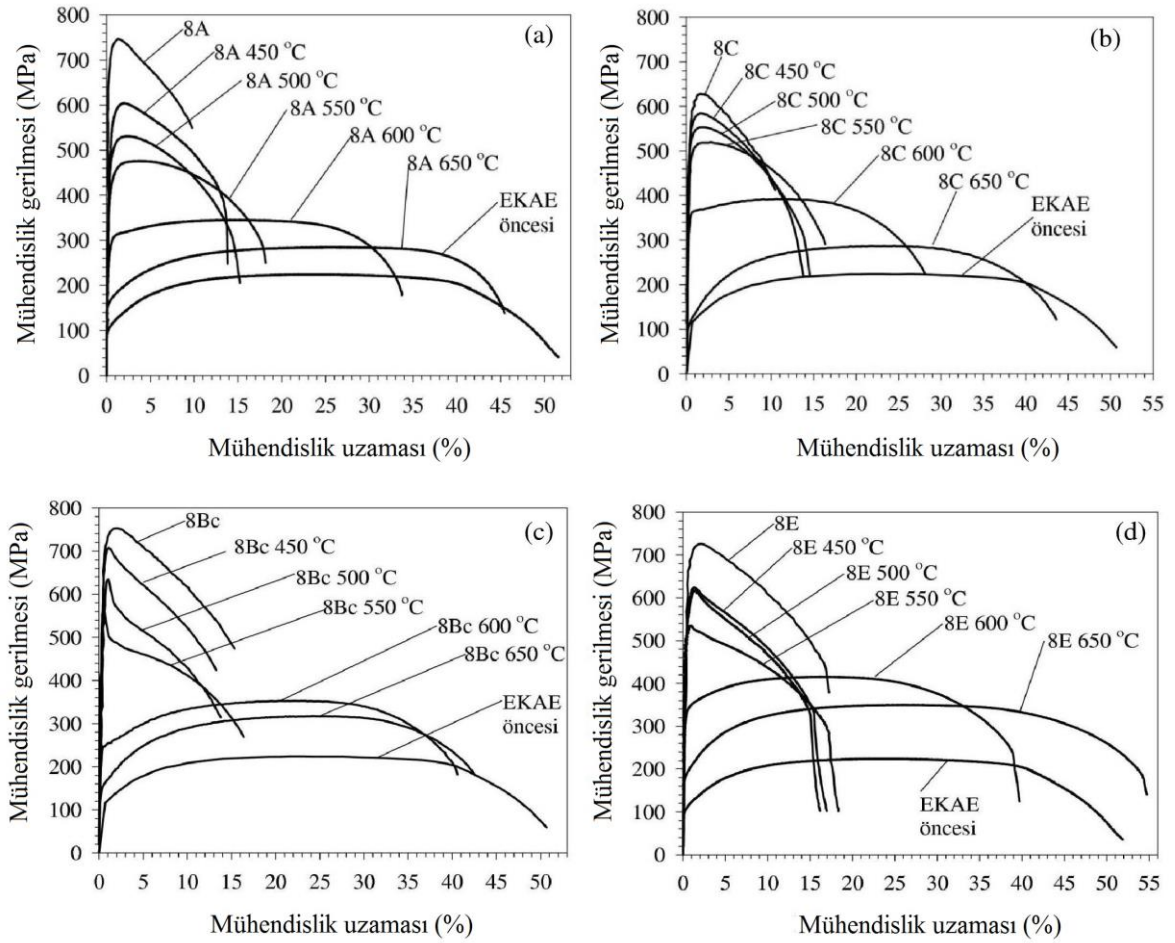
Şekil 64. (a) Rota-E’de 8 paso sayısında EKAЕ işlemine tabi tutulan IF-çeliğinin 600°C’de 60 dk. tavllanması sonrasında elde edilen EBSD resimleri, (b) tane boyutunun içyapıda oransal dağılımı ve (c) tane sınırı açısal yöneliminin oransal dağılımı

### 3.3.3. Isıl İşlem-Mekanik Özellik İlişkisi

Farklı rotalarda 8 pasoluk EKAE işlemi uygulanmış alaşımların farklı sıcaklıklarda 1 saatlik tavlama sonrası sergilediği gerilme-uzama eğrileri Şekil 65’de gösterilmiş, bu eğrilerden elde edilen mukavemet ve süneklik değerleri ise Tablo 9’da özetlenmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde, bütün rotalarda genel olarak artan sıcaklıkla birlikte mukavemet değerlerinin düştüğü, ancak süneklik değerlerinin ise arttığı görülmektedir. Mukavemet-süneklik optimizasyonuna yönelik olan bu çalışmalara 450 °C ve daha yüksek sıcaklıklarda uygulanan ısıl işlemlerle başlanmıştır. Çünkü elde edilen yeniden kristalleşme eğrileri (Şekil 51-54) bu sıcaklığa kadar toparlanma haricinde önemli bir yapısal ve sertlik değişiminin olmadığını göstermektedir. Verilen diyagramlardan, kütleli formdaki IF-çeliğinin 450°C-550°C arasında tavlama sonrasında elde edilen gerilme-uzama eğrilerinin önemli bir değişime uğramadığı ve EKAE sonrasında elde edilen gerilme-uzama karakteristiğini büyük ölçüde yansıttığı görülmektedir. Nitekim söz konusu eğrilerin akma noktası sonrasında sınırlı bir üniform uzama gösterdikten sonra boyun vererek koptuğu görülmektedir (Şekil 65). Ancak bu deformasyon karakteristiği 600°C’de bir saat süre ile uygulanan EKAE işlemi sonrasında önemli oranda değişmektedir (Şekil 65). Nitekim farklı rotalarda EKAE uygulanmış IF-çeliğinin 600°C’de 1 saat tavlama sonrasında sergilediği gerilme-uzama eğrilerinin önemli ölçüde üniform deformasyon bölgesi içerdiği dikkati çekmektedir. Başka bir deyişle, işlem sonrası malzemenin homojen bölgedeki şekillendirilebilirlik özelliği artmakta ve malzeme yeniden deformasyon sertleşme özelliği gösterir duruma gelmektedir. Bu numunelere 650°C’de uygulanan ısıl işlemin ise bu eğilimin daha da artmasına neden olmuştur (Şekil 65).

Farklı rotalarda 8 paso sayısında uygulanan EKAE işlemi ile üretilmiş UİT yapıları IF-çeliğinin 450°C-650°C sıcaklık aralığında tavlama sonrasında elde edilen akma dayanımı ve çekme dayanımının artan tavlama sıcaklığı ile sürekli olarak azaldığı, kopma uzamasının ise sürekli olarak arttığı anlaşılmıştır (Tablo 9). Kopma uzamasında görülen bu değişim, 8A ve 8C sonrası üniform uzamada da gözlenmektedir. Ancak, rota-Bc ve rota-E’de uygulanan işlem sonrasında elde edilen üniform uzama değerleri tavlama sıcaklığı ile devamlı artış göstermemektedir (Tablo 9). Nitekim 8Bc ve 8E durumunda sırasıyla %1,8 ve %1,9 olan üniform uzama değeri, 450°C’de uygulanan 1 saatlik ısıl işlem sonrasında %1,1 ve %1,4 değerine düşmüştür (Tablo 9). Üniform uzamada görülen bu azalma 500°C ve 550°C’de uygulanan bir saatlik tavlama sonrasında da devam etmektedir (Tablo 9).

Nitekim 550°C’de uygulanan bir saatlik ısı işlem sonrasında elde edilen üniform uzama değerleri, rota-Bc ve rota-E’de %0,6 ve %0,9 olarak ölçülmüştür (Tablo 9). 600°C’de bir saat süre ile uygulanan tavlama işlemi sonrasında ise rota-Bc ve rota-E’de elde edilen üniform uzama ani bir artış göstererek %22 ve %16,3 değerine ulaşmaktadır (Tablo 9). Uygulanan rotalar arasında bir karşılaştırma yapıldığında, 600°C’de uygulanan 1 saatlik ısı işlem sonrası en optimum mukavemet-süneklik özelliklerinin rota-E’de elde edildiği söylenebilir. Nitekim 8E sonrasında 600°C sıcaklıkta 1 saat süre ile uygulanan tavlama sonrasında 320 MPa akma mukavemeti, 416 MPa çekme mukavemeti, %16,3 üniform uzama ve %40 kopma uzaması değerleri elde edilmiştir. 8Bc şartında uygulanan EKAE işlemi sonrasında aynı şartlarda tavlanan çeliğin 241 MPa akma mukavemeti, 353 MPa çekme mukavemeti, % 22 üniform uzama ve % 41 kopma uzaması değerlerini aldığı görülmektedir (Tablo 9). Öte yandan, 8A ve 8C sonrasında aynı şartlar uygulanan tavlama ile hem mukavemet hem de süneklik değerlerinin 8E sonrası uygulanan durumdan daha düşük olduğu görülmektedir (Tablo 9). Nitekim 8A ve 8C’de elde edilen çekme dayanımı sırasıyla 345 MPa ve 392 MPa, üniform uzama değerleri ise sırasıyla %15 ve %11 olarak belirlenmiştir (Tablo 9). 650°C’de uygulanan 1 saatlik ısı işlem sonrası ise bütün rotalarda mukavemet ve süneklik değerlerinin işlem öncesi duruma yaklaştığı görülmektedir (Tablo 9). Nitekim 8A, 8C, 8Bc ve 8E şartlarında EKAE uygulanmış çeliğin 650 °C’de tavlama sonrasında akma dayanımı değerleri sırasıyla, 166 MPa, 111 MPa, 149 MPa ve 200 MPa olarak belirlenmiştir (Tablo 9). Aynı şartlardaki çekme dayanımı değerleri ise yine sırasıyla 285 MPa, 287MPa, 318 MPa ve 350MPa olarak belirlenmiştir (Tablo 9). Söz konusu şartlarda elde edilen üniform uzama ve kopma uzaması değerleri ise bütün uygulama rotalarında sırasıyla yaklaşık %25 ve %45 değerlerine ulaşmıştır (Tablo 9). Bu durum, söz konusu tavlama şartlarında yeniden kristalleşmenin büyük oranda tamamlanmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 51-54).



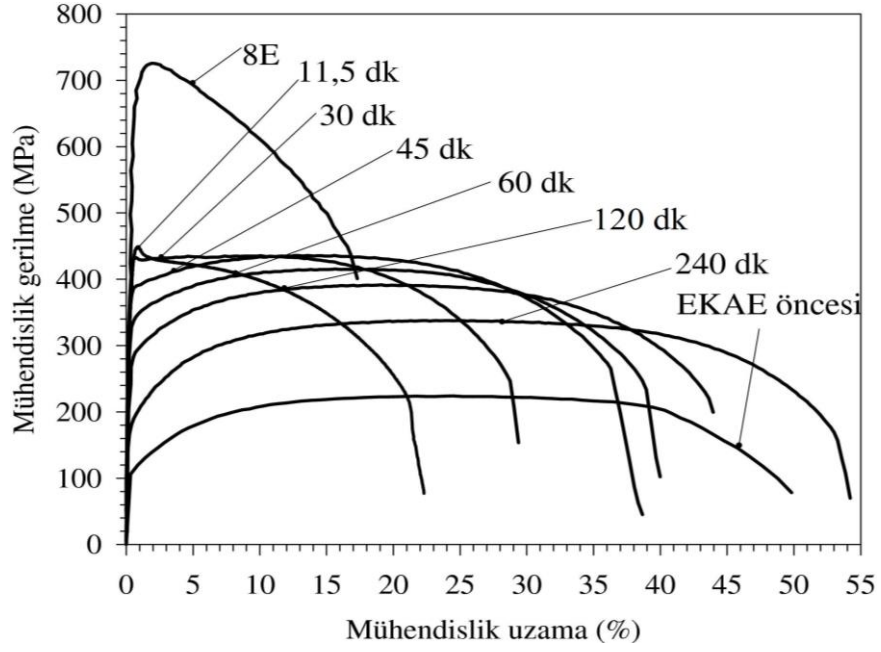
Şekil 65. Farklı rotalarda 8 pasoluk EKAET işlemi sonrası farklı sıcaklıklarda 1 saat süreyle uygulanan ısıl işlemlerin kütesel formdaki IF-çeliğinin gerilme-uzama davranışına etkisini gösteren diyagramlar: (a) Rota-A, (b) rota-C, (c) rota-Bc ve (d) rota-E

EKAET işlemi sonrası oluşturulan UİT yapıları IF-çeliğinde daha etkin bir mukavemet-süneklik optimizasyonu sağlayabilmek ve uygulama açısından daha anlamlı sonuçlar sunabilmek için 600°C’de farklı zaman adımları seçilerek de ısıl işlemler yapıldı. Bu sıcaklık değerinin ve zaman adımlarının belirlenmesinde yukarıdaki bölümde verilen temel ısıl işlem çalışmalarından yararlandı. Ayrıca derinlemesine yapılan bu çalışma için en uygun ısıl kararlılık ve yeniden kristalleşme kinetiği davranışı sergileyen işlem durumu olan 8E kullanıldı. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen gerilme-uzama eğrileri Şekil 66-67’de gösterilmiş, bu diyagramlardan elde edilen temel mukavemet ve süneklik değerleri ise Tablo 9’da verilmiştir. Şekil 66 ve Şekil 67’de verilen eğriler incelendiğinde, başlangıçta mukavemet değerlerinin çok hızlı düştüğü ve daha sonra bu düşüşün yavaşlayarak devam ettiği görülmektedir. Mukavemet değerlerindeki hızlı

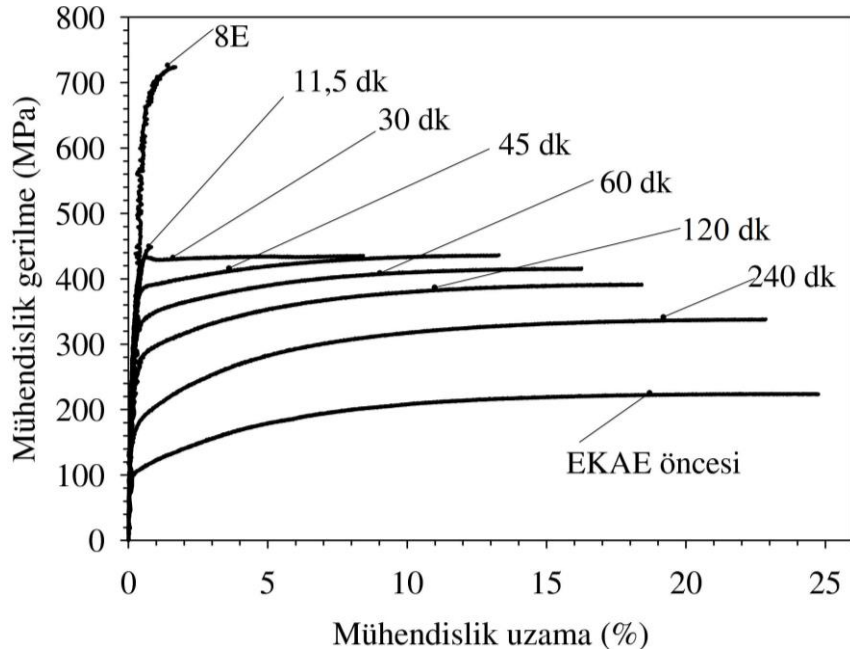
düşüşün ilk 10 dakikalık süre içinde çok daha etkin olduğu dikkati çekmektedir. Bu sonuç, aynı şartlarda elde edilen sertlik değişimiyle de uyum göstermektedir (Şekil 58). Öte yandan, mukavemet değerlerindeki azalmayla birlikte süneklik değerleri de (toplam ve üniform uzama) hızlı bir şekilde toparlanmaktadır. Ayrıca, ısı işlem zamanına bağlı olarak gerilme-uzama eğrisinin karakteristiği de değişmektedir. Nispeten kısa sürelerde uygulanan ısı işlemler sonrasında çok az bir homojen deformasyon bölgesi sergileyen eğriler, ısı işlem zamanı arttırıldıkça geniş bir homojen deformasyon bölgesine (deformasyon sertleşme bölgesi) doğru geçiş göstermektedir (Şekil 66-67). Nitekim 11,5 dk sonrasında elde edilen gerilme uzama eğrisi EKAЕ sonrasında elde edilen karakteristik özellikleri sergilemekte ve yetersiz deformasyon sertleşme davranışı göstermektedir (Şekil 66-67). Ancak 30 dk sonrasında elde edilen eğride ise deformasyon sertleşme davranışı görülmektedir (Şekil 66-67). Elde edilen deformasyon davranışı mukavemet-süneklik optimizasyonu açısından incelendiğinde, 600°C’de 45 dk süreyle uygulanan ısı işlem sonrası 376 MPa’lık akma dayanımı, 425 MPa’lık çekme dayanımı, %13,7 üniform uzama ve %40,2’lik kopma uzaması değerinin ortaya çıktığı görülmektedir (Tablo 9). Aynı sıcaklıkta bir saatlik tavlama sonrasında, 320 MPa akma mukavemeti, 416 MPa çekme mukavemeti, %16,3 üniform uzama ve %40 kopma uzaması değerleri elde edilmiştir (Tablo 9). Tavlama süresinin daha da artırılması durumunda ise mukavemet değerlerinin azalmaya ve süneklik değerlerinin ise artmaya devam ettiği görülmektedir. Nitekim, 240 dk’lık ısı işlem sonrası bile pek çok uygulama için orijinal duruma göre hala avantajlı özellikler ortaya çıkmaktadır. Nitekim söz konusu şartlarda uygulanan ısı işlem sonrasında, 176 MPa akma dayanımı, 337 MPa çekme dayanımı ve yaklaşık %55,9 kopma uzaması değeri elde edilmiştir (Tablo 9).

Yukarıda verilen sonuçlar, UİT yapılı IF-çeliğinin hem yeterince mukavemetli hem de deformasyonla şekillendirilebilir olması için işlem sonrası uygun bir ısı işleminin yeterli olabileceğini göstermektedir. Ayrıca, uygulayıcının isteğine göre bu özelliklerin geniş bir yelpazede karşılanması da yine işlem sonrası uygulanacak ısı işlemlerle mümkün olabilmektedir.





Şekil 66. 600°C'de uygulanan ısıl işlem zamanının rota-E'de 8 pasoluk EKAE işlemi uygulanmış (8E) UİT yapılı IF-çeliğinin gerilme-uzama diyagramına etkisini gösteren eğriler



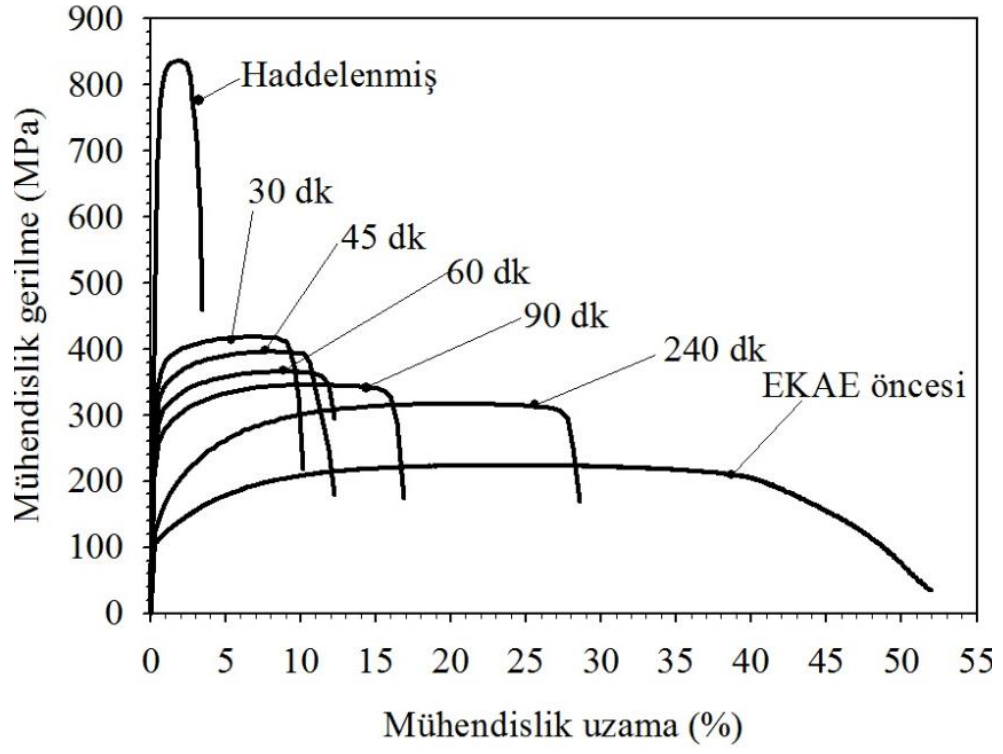
Şekil 67. 600°C'de uygulanan ısıl işlem zamanının rota-E'de 8 pasoluk EKAE işlemi uygulanmış (8E) UİT yapılı IF-çeliğinin gerilme-uzama diyagramının homojen deformasyon bölgesine etkisini gösteren eğriler

Tablo 9. Çeşitli EKAE rotalarında gerçekleştirilen 8 pasoluk işlem sonrası farklı sıcaklık ve farklı zaman adımlarında ısıl işleme tabi tutulmuş ÜİT yapıllı İF-çeliğinin mukavemet ve süneklik değeri

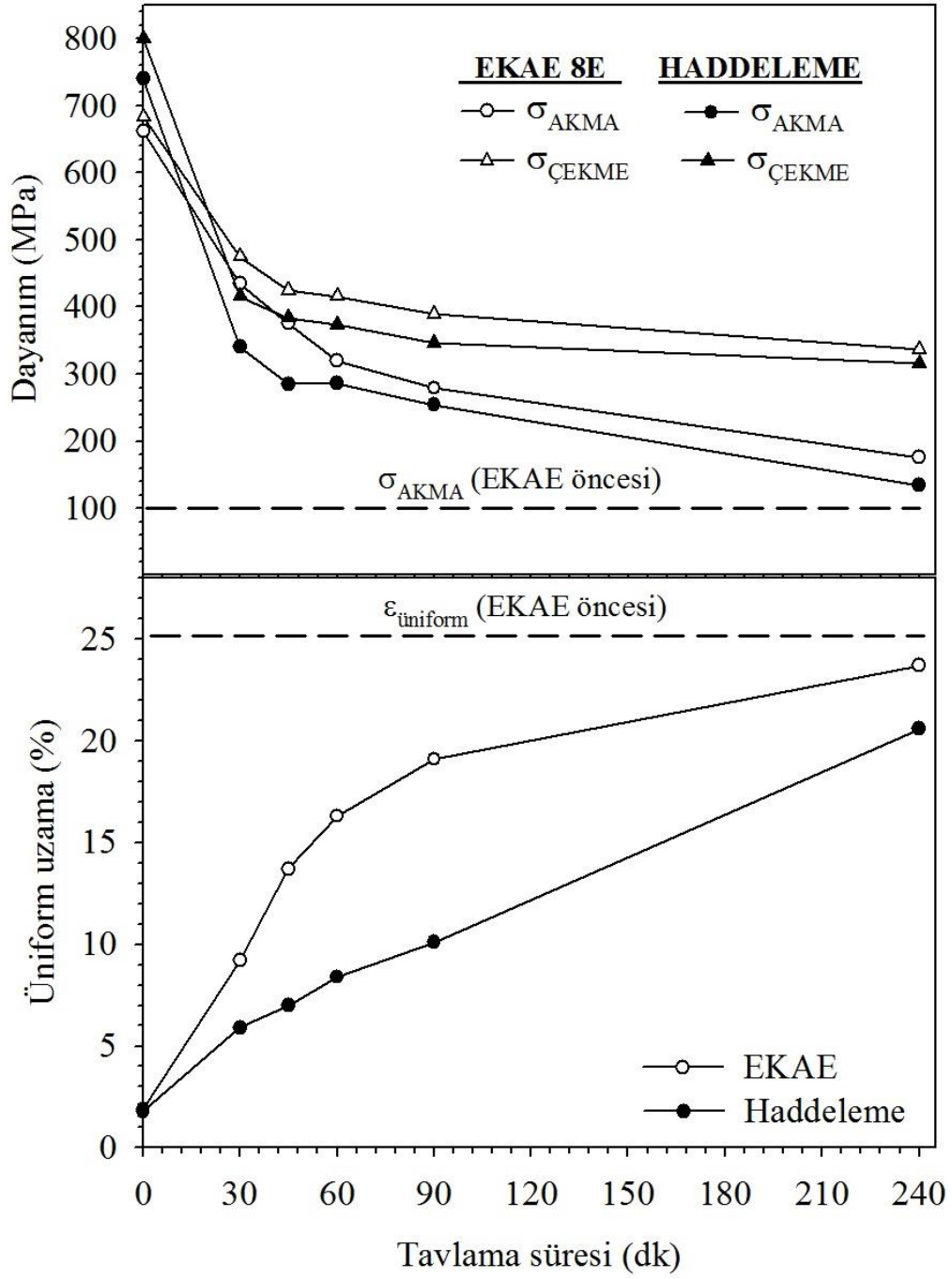
EKAE rotası ve paso sayısı	Isıl işlem sıcaklığı (°C)	Isıl işlem süresi (dk)	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Uniform uzama (%)	Kopma uzaması (%)
EKAE öncesi	-	-	106	291	22,3	42,5
8A	450	60	551	605	1,9	13,8
	500		417	531	2,2	15,2
	550		385	476	3,8	18,2
	600		260	345	15,2	33,8
	650		166	285	25,6	45,6
8C	450		547	585	1,6	13,9
	500		497	554	1,9	14,6
	550		454	520	2,4	16,6
	600		339	392	11,0	28,4
	650		111	287	24,0	45,1
8Bc	450		656	709	1,1	13,3
	500		633	636	1,0	13,9
	550		557	558	0,6	16,6
	600		241	353	22,0	40,9
	650		149	318	24,4	45,5
8E	450		563	623	1,4	17,9
	500		550	616	1,2	17,3
	550		507	534	0,9	19,7
	600		320	416	16,3	40,0
	650		201	350	27,1	55,4
	600	11,5	431	449	0,8	21,4
	600	30	425	435	9,2	31,4
	600	45	376	425	13,7	40,2
	600	120	279	390	19,1	48,4
	600	240	176	337	23,7	55,9

Bu çalışmalarda elde edilen özellik değişimleri ile klasik haddeme sonuçlarının da karşılaştırılması endüstriyel kullanım açısından önemli gözükmektedir. Bu nedenle, İF-çeliği çeşitli deformasyon oranlarında haddelenerek elde edilen çekme deneyi sonuçları Şekil 68’de verilmiştir. Şekil 69’da ise bu eğrilerden elde edilen mekanik özellikler ile aynı şartlarda EKAE sonrasında tavlanmış durumdaki örneklerden elde edilen mekanik özelliklerin karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Şekil 69 incelendiğinde, haddelenmiş durumdaki İF-çeliğinin sergilediği gerilme-uzama eğrilerinin karakteristiği ile EKAE işlemi sonrasında elde edilen eğrilerin karakteristik özellikleri benzerlik göstermektedir.

Nitekim soğuk haddelenmiş durumdaki IF-çeliği sınırlı bir üniform deformasyon bölgesi sergilemektedir. Haddeme sonrasında tavlanan IF-çeliğinin sergilediği eğri karakteristiği de EKAE sonrasında uygulanan tavlama sonrasında elde edilen eğri karakteristiğine bezemektedir. Nitekim haddeme sonrasında uygulanan tavlama ile üniform deformasyon bölgesinde genişleme, mukavemet değerlerinde azalma ve süneklik değerlerinde ise artma görülmektedir. Şekil 69 incelendiğinde ise, %90 oranlarında uygulanan haddeme sonrasında elde edilen mukavemet değerlerin EKAE işleminden daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Nitekim haddelenmiş durumdaki IF-çeliğinin akma dayanımı 740 MPa, çekme dayanımı, 800 MPa olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte haddelenmiş durumdaki IF-çeliğinin %1,8 olan üniform deformasyon oranının EKAE sonrasındaki durumla yakın olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 69). EKAE ve haddeme sonrasında uygulanan tavlamanın mukavemet değerlerinde etkileri incelendiğinde, EKAE sonrası uygulanan tavlama işleminden elde edilen mukavemet değerlerinin, haddeme sonrasında aynı sıcaklık ve sürede uygulanan tavlama ile elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 69). Benzer şekilde, EKAE işlemi sonrasında tavlanan numunelerin üniform uzama değerleri, haddeme sonrasında aynı sıcaklık ve sürede tavllanmış durumdan daha yüksektir. Bu durum UİT yapılı çeliğe uygulanan tavlama sonrasında elde edilen mukavemet ve süneklik değerlerinin haddeme sonrasında elde edilen mukavemet ve süneklik değerlerinden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Buna göre EKAE işleminin mekanik özelliklerin optimizasyonu konusunda daha avantajlı bir yöntem olduğu söylenebilir.



Şekil 68. Kütlesel formda IF-çeliğinin haddelenmiş ve haddeleme sonrası 600°C sıcaklıkta farklı sürelerde tavlanmış durumdaki gerilme-uzama eğrileri



Şekil 69. 600°C sıcaklıkta farklı sürelerde uygulanan tavlamanın haddelenmiş ve rota-E'de 8 paso sayısında EKAЕ uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin mekanik özellikleri

### 3.4. Şekillendirilebilirlik

Farklı rota ve paso sayılarında uygulanan EKAE işlemiyle UİT yapıları hale getirilmiş IF-çeliğine uygulanan Erichsen testleri sonrasında elde edilen kuvvet (F) - çökme (X) eğrileri Şekil 70(a)-74(a)'da gösterilmiştir. Bu eğrilerden, örneğe uygulanan deformasyonun çeşitli kademelerde gerçekleştiği görülmektedir. Söz konusu deformasyon kademelerinde F-X eğrisinin eğiminde belirgin değişikliklerin olması bu fikri doğrulamaktadır. Bu deformasyon kademelerinin gerçekleştiği bölgelerin daha doğru bir şekilde tespit edilebilmesi için uygulanan kuvvetin çökmeye göre türevi alınarak elde edilen eğrilerin türevinin ( $dF/dX$ ) X'e göre değişimi Şekil 70(b)-Şekil 74(b)'de gösterildi. Bu eğrilerden, EKAE öncesi durumdaki IF-çeliğinin kuvvet-çökme eğrisi iki eksenli eğilme (0-a), membran şekil değişimine geçiş (a-b), membran şekil değiştirme (b-c) ve deformasyon lokalizasyonu (c-d) olmak üzere dört temel deformasyon kademesi içerdiği belirlendi (Şekil 70-74). İki eksenli eğilme kademesinde örnek önce elastik deformasyona uğramakta sonra ise plastik deformasyona geçiş gerçekleşmektedir. Bu bölgede plastik deformasyona geçiş, örnek yüzeyine zımbanın temas ettiği bölgede ortaya çıkan akma bölgesi ile başlamaktadır. Bu bölge zımbanın ilerlemesi ile hem radyal doğrultuda (örnek yüzeyinde) hem de sac kalınlığı boyunca genişleyerek bütün kesite yayılmaktadır [121, 122]. Bu kademe,  $dF/dX$ -X eğrisi veya F-X eğrisinin eğimi artan çökme ile birlikte "a" noktasına kadar sürekli azalmaktadır (Şekil 70-74). Bu noktadan "b" noktasına kadar devam eden kısımda ise F-X eğrisinin eğimi ( $dF/dX$ -X) artmaktadır. Bu açıdan "a"- "b" aralığı bir geçiş bölgesi özelliği taşımaktadır. Dolayısıyla, bu noktalar arasında örnekte ortaya çıkan plastik deformasyon biçim değiştirerek, "iki eksenli eğilme" biçiminden "membran şekil değişimine" dönüşmektedir. Bunu takip eden "b"- "c" noktaları arasında ise plastik deformasyon tamamen "membran şekil değişimi" ile gerçekleşmektedir [122]. Bu deformasyon kademesinde, artan çökme miktarı ile birlikte yarım küre biçimine dönüşen örneğin duvarlarında iki eksenli çekme gerilmeleri altında inceleme gerçekleşmektedir. Bu bölgede (membran şekil değişim bölgesi) zımba kuvveti (F) çökmeye bağlı olarak artarken,  $dF/dX$  değeri ise artan zımba hareketi ile hafif bir artış sergilemektedir (Şekil 70-74). Bu durum, söz konusu deformasyon aşamasında örnek kalınlığının sürekli azalması ile zımba kuvvetinde meydana gelmesi beklenen azalmanın pekleşme ile dengelendiğini göstermektedir. Dolayısıyla bu bölgedeki deformasyonun, malzemenin pekleşme kabiliyeti ile doğrudan ilişkili olduğu anlaşılmaktadır [121, 122].

Membran şekil değişimi kademesi sonrasında ise (“c”-“d” arası) F-X eğrisinin eğiminin giderek azaldığı görülmektedir [122]. Bu durumun membran şekil değişimi sırasında gerçekleşen plastik deformasyon nedeniyle ortaya çıkan deformasyon lokalleşmesine (çekme eğrisindeki boyun verme bölgesi gibi) bağlı olduğu düşünülmektedir. Deformasyonun son aşamasında (“d” noktasından sonra) ise örnekte çatlak oluşumu ve ilerlemesi ile yırtılma meydana gelmektedir (Şekil 70-74) [121, 122].

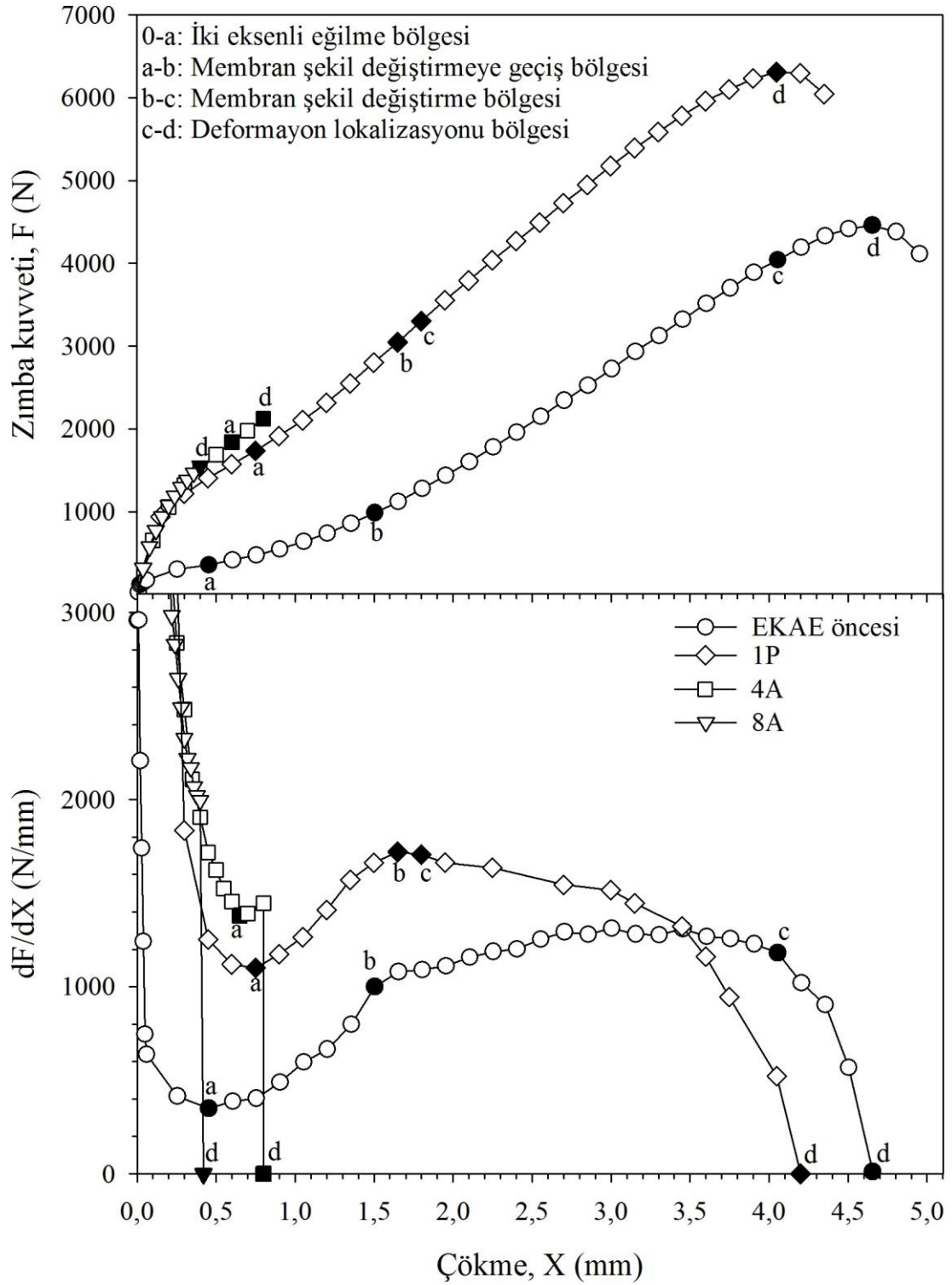
IF-çeliğinde ortaya çıkan kuvvet-çökme eğri karakteristiği uygulanan EKAE işlemiyle büyük oranda değişmektedir. Bir paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen F-X eğrisi incelendiğinde, bu eğrinin EKAE öncesi durumla yaklaşık benzer bir karakteristik sergilediği görülmektedir. Ancak EKAE işlemi sonrası elde edilen mukavemet artışı, F-X eğrisinin de daha yüksek zımba kuvveti mertebelerinde seyretmesine neden olmaktadır (Şekil 70). Bir paso sayısında uygulanan işlem sonrasında zımba kuvvetinde görülen bu artış, bütün deformasyon kademelerinde de belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Öte yandan, bir pasoluk EKAE işlemi sonrası meydana gelen toplam çökme miktarı (X) ise azalmaktadır. Ayrıca bir pasoluk EKAE işlemi deformasyon kademeleri üzerinde de belli oranda etkili olmaktadır. Şöyle ki, söz konusu örnekte elde edilen  $dF/dX-X$  eğrisi membran şekil değiştirme kademesine kadar EKAE öncesi durum ile benzer bir karakter sergilemektedir (Şekil 70(b)). Ancak bu benzerlik membran şekil değişimi bölgesine girildiğinde (“b”-“c” bölgesi) büyük oranda ortadan kalkmaktadır. Nitekim, EKAE öncesi durumda membran şekil değiştirme bölgesindeki eğrinin eğimi belli oranda artış gösterirken, bir pasoluk işlem sonrası aynı bölgedeki eğrinin eğimi ( $dF/dX-X$  eğrisi) kırılma gerçekleşinceye kadar azalma davranışı göstermektedir (Şekil 70(b)).

Rota-A’da uygulanan çok pasolu EKAE işlemi sonrasında elde edilen F-X uzama eğrileri incelendiğinde, Erichsen testinden elde edilen sünekliğin (çökme) artan paso sayısı ile azaldığı görülmektedir. Nitekim, rota-A’da 4 ve 8 paso sayısında uygulanan işlem sonrasında yırtılmanın membran şekil değiştirme bölgesinin hemen başlangıcında ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 70(b)). Bu durum rota-A’da uygulanan EKAE işleminde artan paso sayısı ile birlikte membran şekil değişimi ile gerçekleşen plastik deformasyonun azaldığını ve 8 paso sonrasında ise neredeyse hiç gerçekleşmediğini göstermektedir. Başka bir deyişle, artan paso sayısı ile birlikte yırtılma çok küçük çökme miktarlarında aniden gerçekleşmektedir.

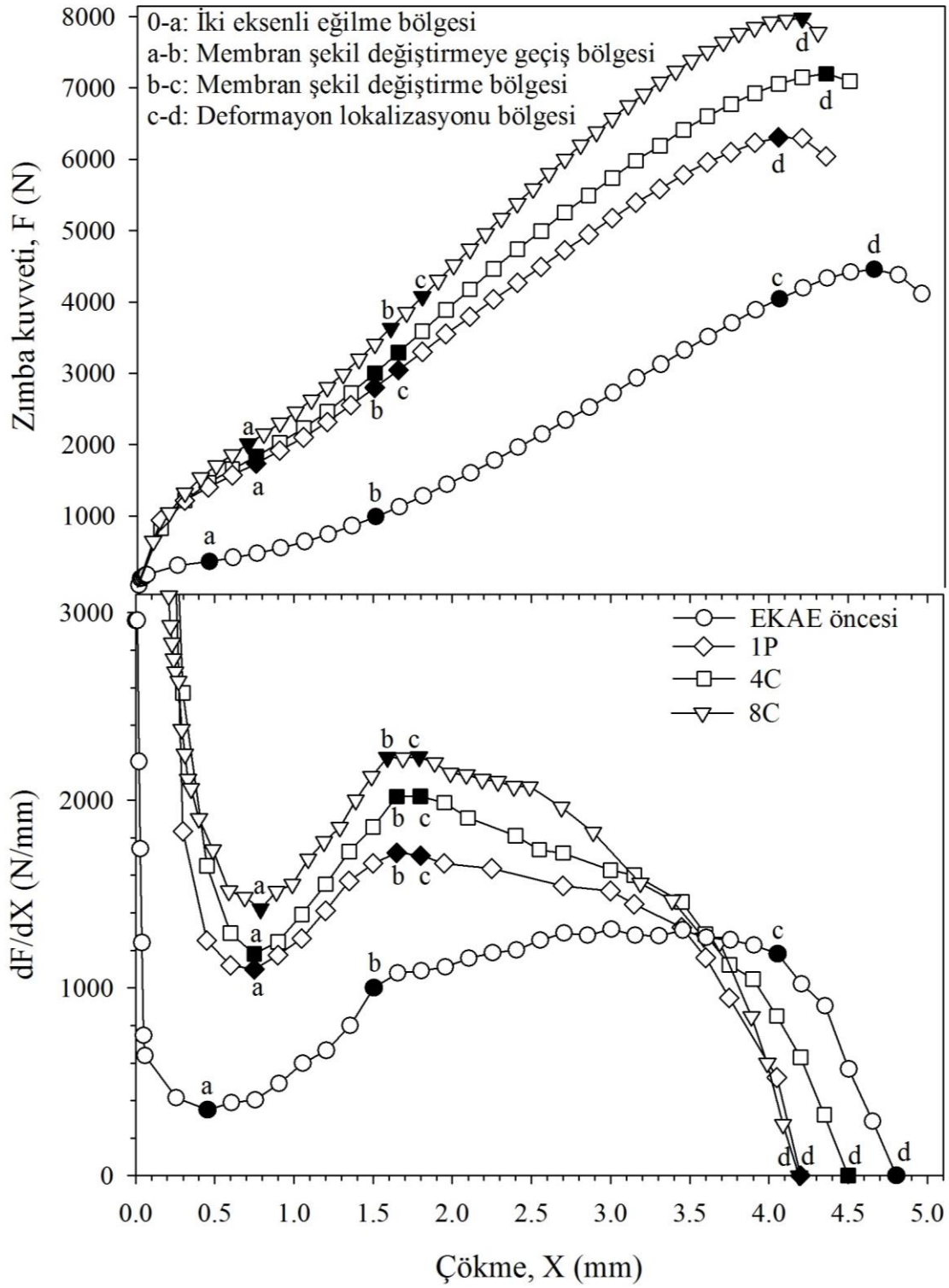
Rota-A'da uygulanan EKAE işleminden farklı olarak, rota-C, rota-Bc ve rota-E'de gerçekleştirilen çok pasolu EKAE işlemleri sonrası elde edilen F-X eğri karakteristiği bir paso sonrası elde edilen eğri karakteristiği ile benzerlik göstermektedir. Başka bir deyişle, söz konusu rotalarda artan paso sayısı ile çeliğin F-X eğri karakteristiğinde önemli bir değişime olmamaktadır. Nitekim, Şekil 71(a)-(b), Şekil 72(a)-(b) ve Şekil 73(a)-(b) incelendiğinde, elde edilen F-X eğrisinin türevinin bir pasoda olduğu gibi membran şekil değiştirme bölgesinde devamlı olarak azalma eğiliminde olduğu dikkati çekmektedir. Ancak davranış üzerinde uygulama rotasının belli oranda etkili olduğu söylenebilir. Şöyle ki, rota-Bc'de artan paso sayısı ile birlikte  $dF/dX-X$  eğrilerinin membran şekil değiştirme bölgesinde daha keskin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Benzer durum, rota-E'de 8 paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen eğride de görülmektedir (Şekil 73(b)). Nitekim söz konusu eğrinin eğimi bir paso sonrasında elde edilen eğri eğiminden farklı olarak çok daha keskin bir şekilde azalarak sıfır noktasına ( F-X eğrisinin “d” ile gösterilen tepe noktası) ulaşmaktadır. Buna göre rota-Bc ve rota-E'de uygulanan EKAE işlemi sonrasında, F-X eğrisinin eğiminde görülen azalma etkisinin artan paso sayısı ile radikal bir şekilde arttığı söylenebilir. Bu durum rota-C'de uygulanan çok pasolu EKAE işlemi sonrasında ise bu kadar belirgin bir şekilde ortaya çıkmamakta ve farklı paso sayılarında elde edilen  $dF/dX-X$  eğrileri yaklaşık benzer özellikler sergilemektedir.

Farklı rotalarda 8 paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen F-X eğrileri ile  $dF/dX-X$  eğrilerinin karşılaştırılması Şekil 74'de verilmiştir. Söz konusu eğriler incelendiğinde, diğer rotalardan farklı olarak rota-A'da 8 paso sayısında uygulanan işlem sonrasında kırılmanın membran şekil değişimi bölgesine geçiş (“a”-“b”) sırasında gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Diğer rotalarda ise kırılma membran şekil değiştirme bölgesinin sonunda (“d” noktasından sonra) gerçekleşmektedir. Yukarıda da açıklandığı gibi bu bölgede  $dF/dX$  değeri artan çökme ile birlikte azalmaktadır.

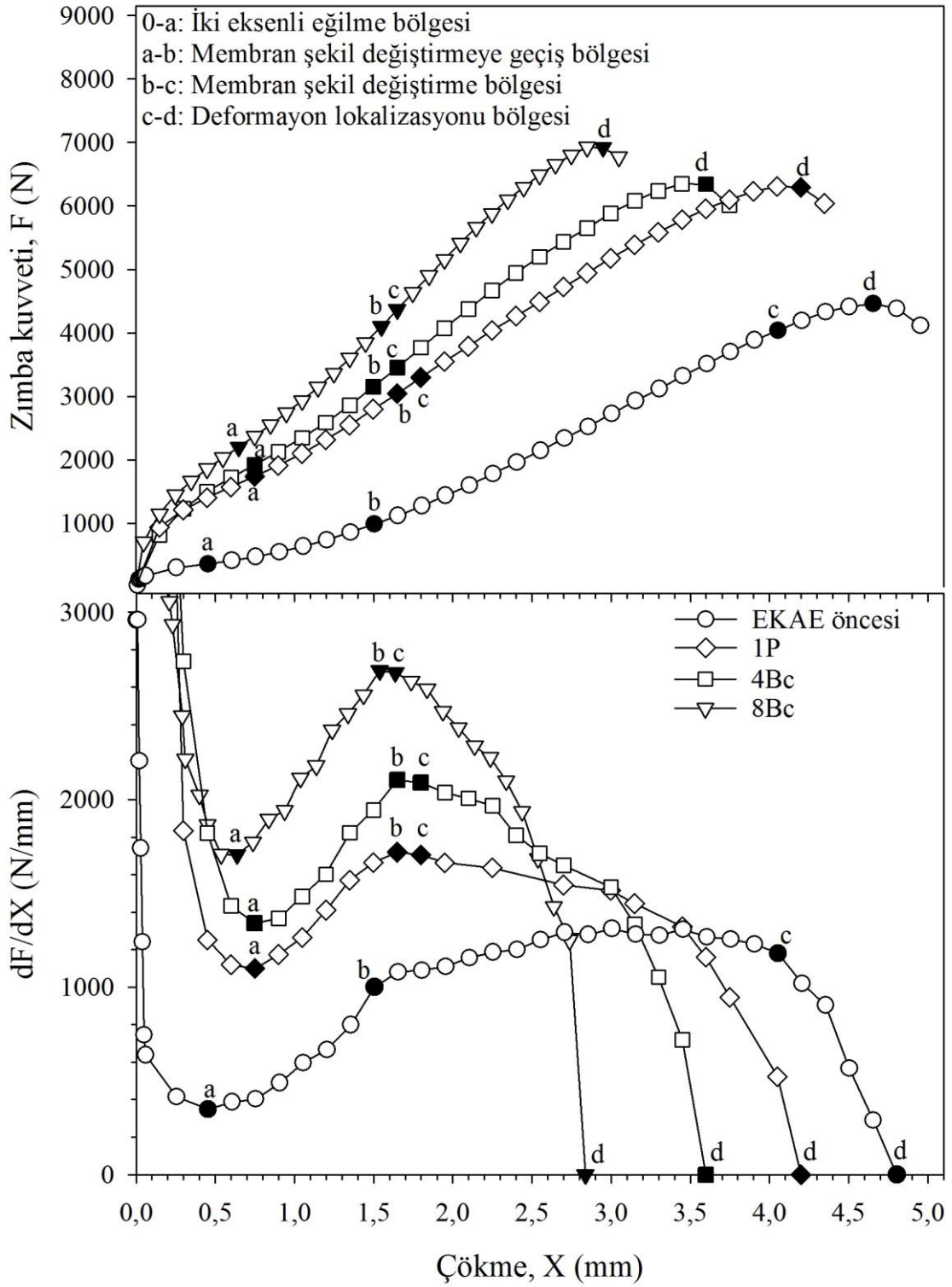




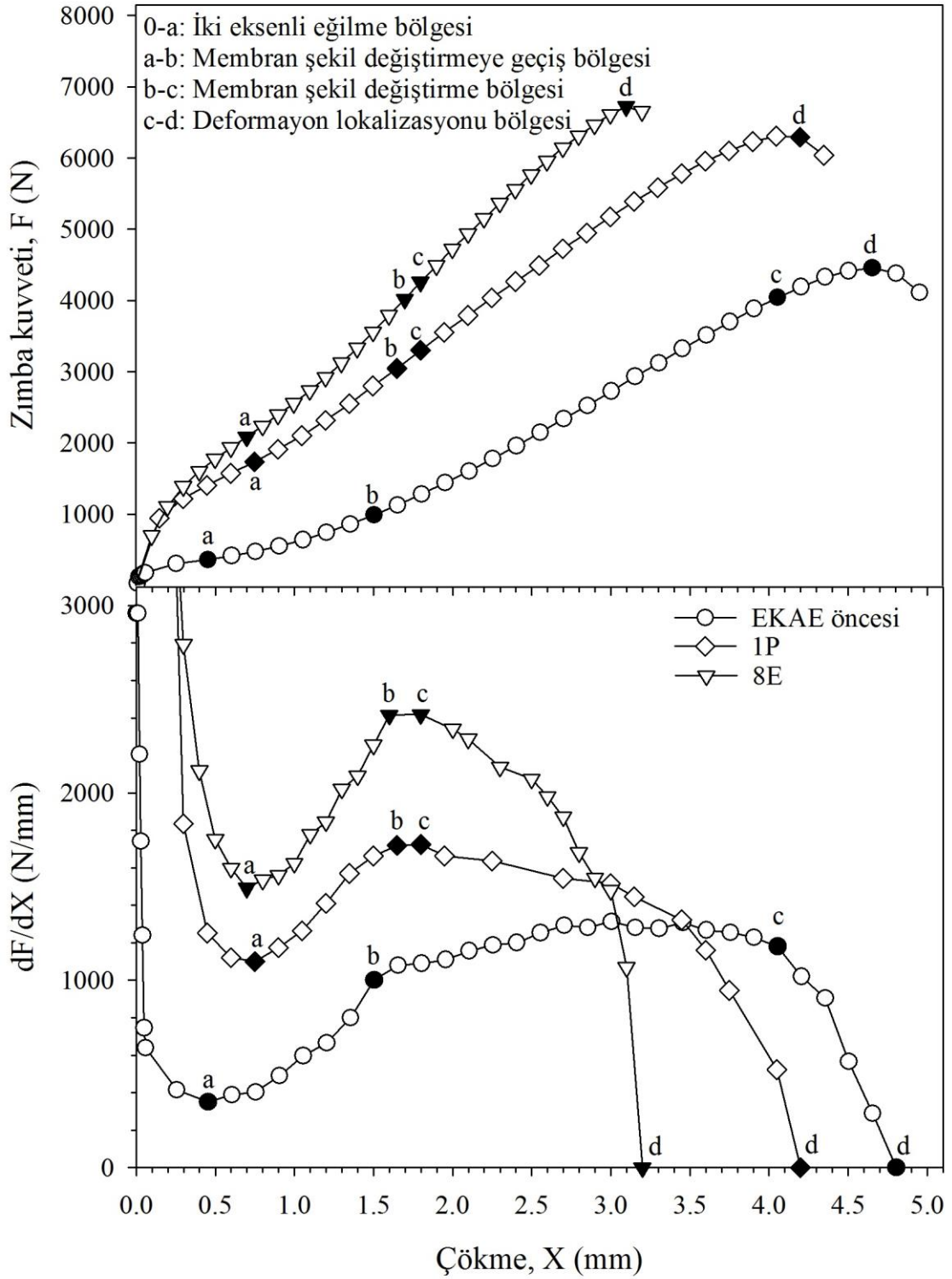
Şekil 70. (a) Rota-A'da ve farklı paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrası gerçekleştirilen Erichsen testlerinden elde edilen kuvvet (F)-çökme miktarı (X) eğrileri ve (b) bunlardan türetilen ve farklı deformasyon bölgelerini yansıtan dF/dX-X değişim grafikleri



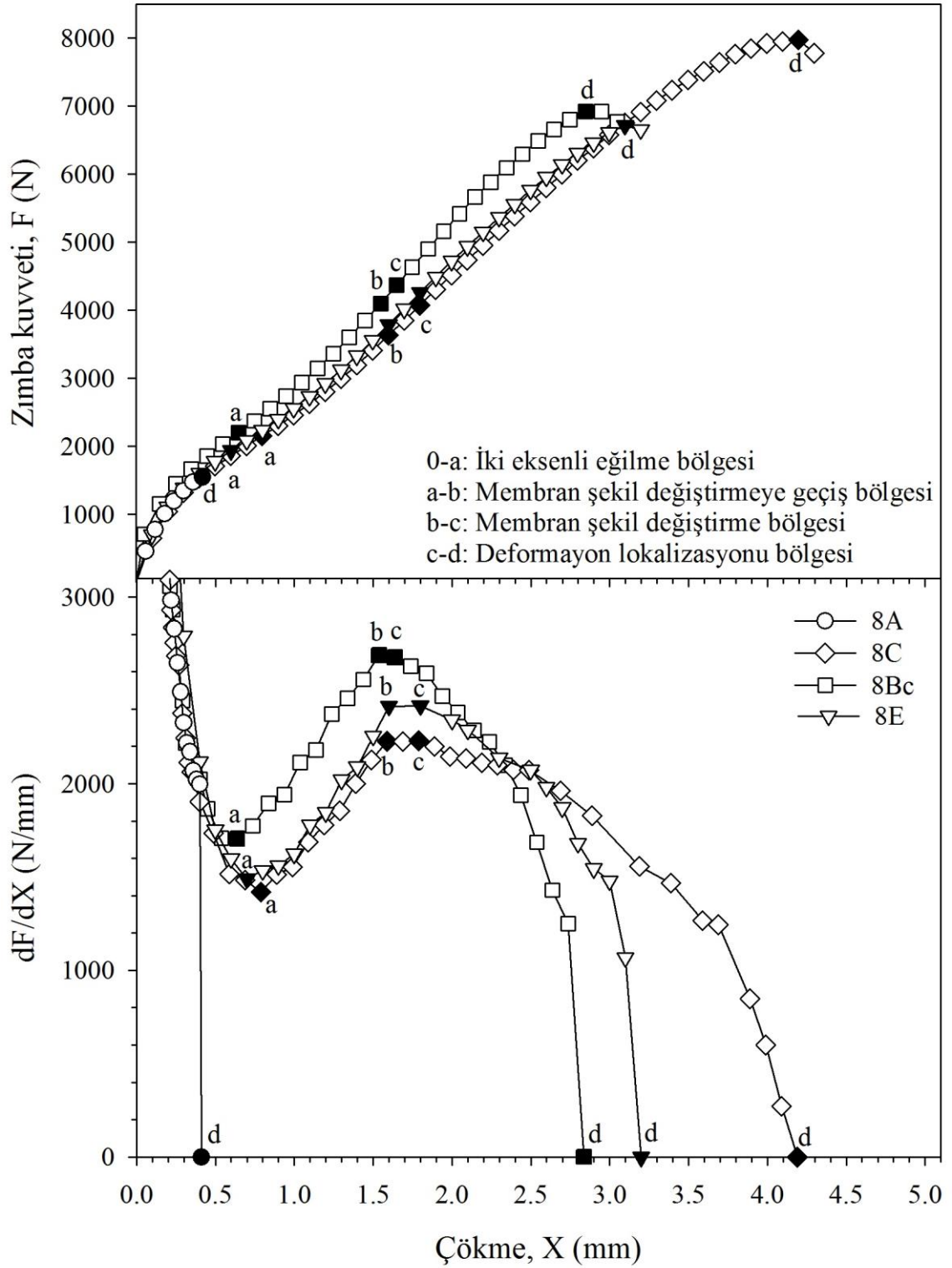
Şekil 71. (a) Rota-C’de ve farklı paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrası gerçekleştirilen Erichsen testlerinden elde edilen kuvvet (F)-çökme miktarı (X) eğrileri ve bunlardan türetilen ve (b) farklı deformasyon bölgelerini yansıtan  $dF/dX$ -X değişim grafikleri



Şekil 72. (a) Rota-Bc'de ve farklı paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrası gerçekleştirilen Erichsen testlerinden elde edilen kuvvet (F)-çökme miktarı (X) eğrileri ve bunlardan türetilen ve (b) farklı deformasyon bölgelerini yansıtan  $dF/dX$ -X değişim grafikleri



Şekil 73. (a) Rota-E’de ve farklı paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrası gerçekleştirilen Erichsen testlerinden elde edilen kuvvet (F)-çökme miktarı (X) eğrileri ve bunlardan türetilen ve (b) farklı deformasyon bölgelerini yansıtan  $dF/dX$ -X değişim grafikleri



Şekil 74. (a) Farklı rotalarda uygulanan 8 paso sayısında EKAIE işlemi sonrası gerçekleştirilen Erichsen testlerinden elde edilen kuvvet (F)-çökme miktarı (X) eğrileri ve bu eğrilerden türetilen ve (b) farklı deformasyon bölgelerini yansıtan  $dF/dX$ -X değişim grafikleri

EKAE öncesi ve sonrası durumlardaki kütleli formdaki IF-çeliğine uygulanan Erichsen testlerinden elde edilen kuvvet-çökme eğrilerinden (Şekil 70(a)-73(a)) Erichsen indeksi ( $E_i$ ) ve Erichsen indeksindeki kuvvet değerleri ( $F_{Ei}$ ) belirlenerek olarak Tablo 10'da verilmiştir. Söz konusu değerler incelendiğinde, EKAE öncesi durumda 4,8 mm olarak ölçülen  $E_i$  değeri uygulanan bir pasoluk EKAE işlemi sonrasında bir miktar azalarak 4,2 mm değerine düştüğü anlaşılmaktadır.  $E_i$ 'ye karşılık gelen kuvvet değeri ( $F_{Ei}$ ) ise EKAE öncesi durumda 4605 N iken, bu değer bir paso sonrası artarak 6383 N'a yükselmiştir. Rota-A'da uygulanan 4 ve 8 pasoluk EKAE işlemi sonrasında ise  $E_i$  değeri artan paso sayısı ile azalarak 0,6 mm ve 0,4 mm değerlerini almıştır. Aynı şartlarda uygulanan EKAE işlemi sonrasında  $F_{Ei}$  değeri artan paso sayısı ile sürekli azalarak sırasıyla 1770N ve 1375 N değerlerini almıştır (Tablo 10).

Rota-C'de uygulanan çok pasolu EKAE işlemi sonrasında da  $E_i$  değeri artan paso sayısı ile birlikte azalmaktadır. Ancak, bu azalma rota-A'da gözlenen kadar belirgin bir şekilde ortaya çıkmamaktadır (Tablo 10). Nitekim rota-C'de 4 ve 8 paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen  $E_i$  değerleri sırasıyla 3,6 mm ve 3,9 mm olarak ölçülmüştür. Bu değerlere karşılık gelen kuvvet bileşenleri ( $F_{Ei}$ ) ise sırasıyla 7249 N ve 7883 N olarak belirlenmiştir (Tablo 10). Rota-Bc'de uygulanan EKAE işlemi de şekillendirilebilirlik özellikleri açısından rota-C'ye benzer bir etki göstermiştir. Nitekim söz konusu rotada gerçekleştirilen EKAE işlemi sonrası  $E_i$  değeri artan paso sayısı ile azalarak 4 ve 8 pasolar sonrası sırasıyla 4,2 mm ve 2,9 mm değerlerini almıştır. Bu işlem rotasında ölçülen  $F_{Ei}$  değerleri ise aynı paso sayıları için sırasıyla 8306N ve 6810N olarak belirlenmiştir (Tablo 10). Rota-E'de 8 paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen  $E_i$  ve  $F_{Ei}$  değerleri ise sırasıyla 2,9 mm ve 6167 N olarak belirlenmiştir.

Farklı rotalarda uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası ölçülen değerler karşılaştırıldığında, en yüksek  $E_i$  değerinin rota-C, en düşük  $E_i$  değerinin ise rota-A sonrası uygulanan Erichsen testlerinden elde edildiği söylenebilir. Rota-Bc ve rota-E'de uygulanan EKAE işlemleri sonrası elde edilen  $E_i$  değerlerinin ise rota-C'de uygulanan işlem sonrasında elde edilen değerlerden biraz daha düşük olduğu görülmektedir. İlgili işlem şartlarında elde edilen  $F_{Ei}$  değerlerine bakıldığında ise, en yüksek değer rota-C'de uygulanan 8 pasoluk işlem sonrası ortaya çıktığı, en düşük değer ise rota-A'da 8 paso sayısında gerçekleştirilen işlem sonrası olduğu söylenebilir. Rota-Bc ve rota-E'de gerçekleştirilen işlemler sonrası ölçülen  $F_{Ei}$  değerlerinin ise rota-C'de gerçekleştirilen işlem sonrası elde edilen değere göre biraz daha düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 10. Farklı rota ve paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrasında gerçekleştirilen Erichsen testinden elde edilen *Erichsen İndeksi (Ei)* ve bu indekse karşılık gelen *yük (F<sub>Ei</sub>)* değerleri

İşlem durumu		Erichsen indeksi, E <sub>i</sub> (mm)	Erichsen indeksindeki kuvvet, F <sub>Ei</sub> (N)
Rota	Paso sayısı		
EKAE öncesi	0	4,8±0,3	4605±525
-	1	4,2±0,2	6386±77
Rota-A	2	3,9±0,8	6685±400
	4	0,6±0,3	1770±575
	8	0,4±0,2	1375±241
Rota-C	2	3,7±0,9	7186±24
	4	3,6±0,5	7249±545
	8	3,9±0,2	7883±135
Rota-Bc	4	4,2±0,1	8306±278
	8	2,9±0,4	6810±214
Rota-E	8	2,9±0,1	6167±811

Erichsen deneyleri sonrası elde edilen yüzey özellikleri, gerek şekillendirilebilirlik ve gerekse yüzey kalitesi hakkında önemli bilgiler vermektedir. Bu nedenle, EKAE öncesi ve farklı rota ve paso sayılarında uygulanan EKAE işlemleri sonrası Erichsen testi uygulanan örneklerin yüzeyleri SEM yardımıyla incelendi ve elde edilen seçilmiş yüzey görünümleri Şekil 75-83'de gösterildi. Şekil 75'de verilen resimler incelendiğinde, işlem öncesi şartlarda Erichsen deneylerine tabi tutulan örnek yüzeylerinde daha belirgin plastik deformasyon etkilerine dayalı izlerin ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 75(a)-(b)). Söz konusu izler özellikle iri taneli çeliklerin derin çekilmesinde ortaya çıkan ve “portakal kabuğu etkisi” olarak da adlandırılan bir tarzda meydana gelmiştir [123, 124]. Bu etki, şekil verme sırasında iri taneler arasındaki kristalografik yönlenme farklılıklarından kaynaklanmakta ve bu farklılık çok eksenli gerilme altında taneler arasındaki deformasyon uyumsuzluğuna neden olmaktadır [123] (Şekil 75(b)-(c)). Nitekim komşu iki tane arasında bulunan yönlenme farkı nedeniyle, serbest yüzeyde bulunan tanelerin deformasyonu aynı büyüklükte olmamaktadır [123, 124]. Bu ise serbest yüzeydeki tanelerin yüzeyleri arasında belli oranda seviye farkının oluşmasına neden olup yüzey pürüzlülüğünü artırmaktadır [124].

Öte yandan, işlem öncesi durumda uygulanan Erichsen testi sırasında çatlak oluşumu ve ilerlemesi incelendiğinde, çatlakların tane içerisinde ve çevresel olarak ilerledikleri ilerlediği ilgili SEM resimlerinden anlaşılmaktadır (Şekil 75(b)). Dolayısıyla, işlem öncesi iri taneli çelik örneklerde çatlak oluşumu büyük oranda dislokasyon etkileşimi ve/veya

birikimi ile gerçekleştiği sonucu çıkarılabilir. Nitekim çatlakların ilerlediği tanede oluşan deformasyon bantları da bu sonucu desteklemektedir (Şekil 75(b) ve (e)).

Uygulanan EKAE işlemi sonrası oluşan ÜİT yapısı, Erichsen deneyi sonrası oluşan yüzey morfolojisinde de önemli değişimlere neden olmaktadır. Şekil 76(a)'da görüldüğü gibi, bir paso sonrası deformasyonun genellikle zımba ile örnek yüzeyinin temas ettiği bölgeye yakın kısımlarda ortaya çıkmakta ve örneğin Erichsen kalıbına tutturulduğu flanşa yakın bölgelerde ise önemli bir deformasyon etkisine bağlı yüzey değişimi görülmemektedir. Bu durum EKAE işlemi sonrasında F-X ve dF/dX-X eğrilerinde de görülen deformasyon lokalizasyonu nedeniyle ortaya çıkmış olabilir. Nitekim, Şekil 76 (b)'de verilen SEM resimlerinde açıkça görüldüğü gibi, bir pasoluk işlem sonrası uygulanan Erichsen testi sırasında örnek yüzeyinde önemli oranda kayma bandı oluşmaktadır. Ayrıca, bu kayma bantlarının örneğin belli bölgelerinde yoğunlaştığı ve çatlakların da bu bölgelerde oluşarak ilerlediği dikkati çekmektedir (Şekil 76(a)). Bu tür oluşum ise deformasyonunun homojen olarak gerçekleşmediğine işaret etmektedir.

Uygulanan bir pasoluk EKAE işleminden farklı olarak rota-A'da uygulanan 4 pasoluk işlem sonrasında Erichsen örneğinin yarım küre haline deforme olamadığı görülmektedir (Şekil 77(a)). Nitekim, söz konusu örnek yüzeyindeki çatlakların zımbanın temas ettiği orta bölgede başlayarak Y doğrultusu boyunca kenarlara doğru ilerlediği dikkati çekmektedir (Şekil 77(b)). Aynı durum 8A şartındaki örneğe uygulanan Erichsen testi sonrasında da daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır (Şekil 78(a)). Bu örneklerin yüzeylerinde plastik deformasyonun sadece çatlak ucundaki bölgelerde belirgin olarak gerçekleşmesi, ancak diğer bölgelerin başlangıçtaki parlatılmış hallerini korumaları bu sonucu doğrulamaktadır.

Rota-C'de uygulanan çok pasolu EKAE işlemi sonrasında ise Erichsen örneklerinin yüzey görünüşleri incelendiğinde, morfolojik özelliklerinin tüm yüzey boyunca homojen olmadığı anlaşılmaktadır (Şekil 79-80). Bu durum bir paso sonrası uygulanan Erichsen örneklerinin yüzey özellikleri ile de benzerlikler göstermektedir. Nitekim rota-C'de uygulanan EKAE işlemi sonrası gerçekleştirilen Erichsen deneyleri sırasında da deformasyonun genellikle zımba ile temas eden bölgelere yakın kısımlarda daha etkin bir şekilde gerçekleşmektedir. Flanşa yakın bölgelerde ise belirgin bir deformasyon etkisi görülmemektedir. Ayrıca, deformasyonun gözlemlendiği bölgelerde ise önemli oranda kayma bandı oluşumu göze çarpmaktadır (Şekil 79-80).

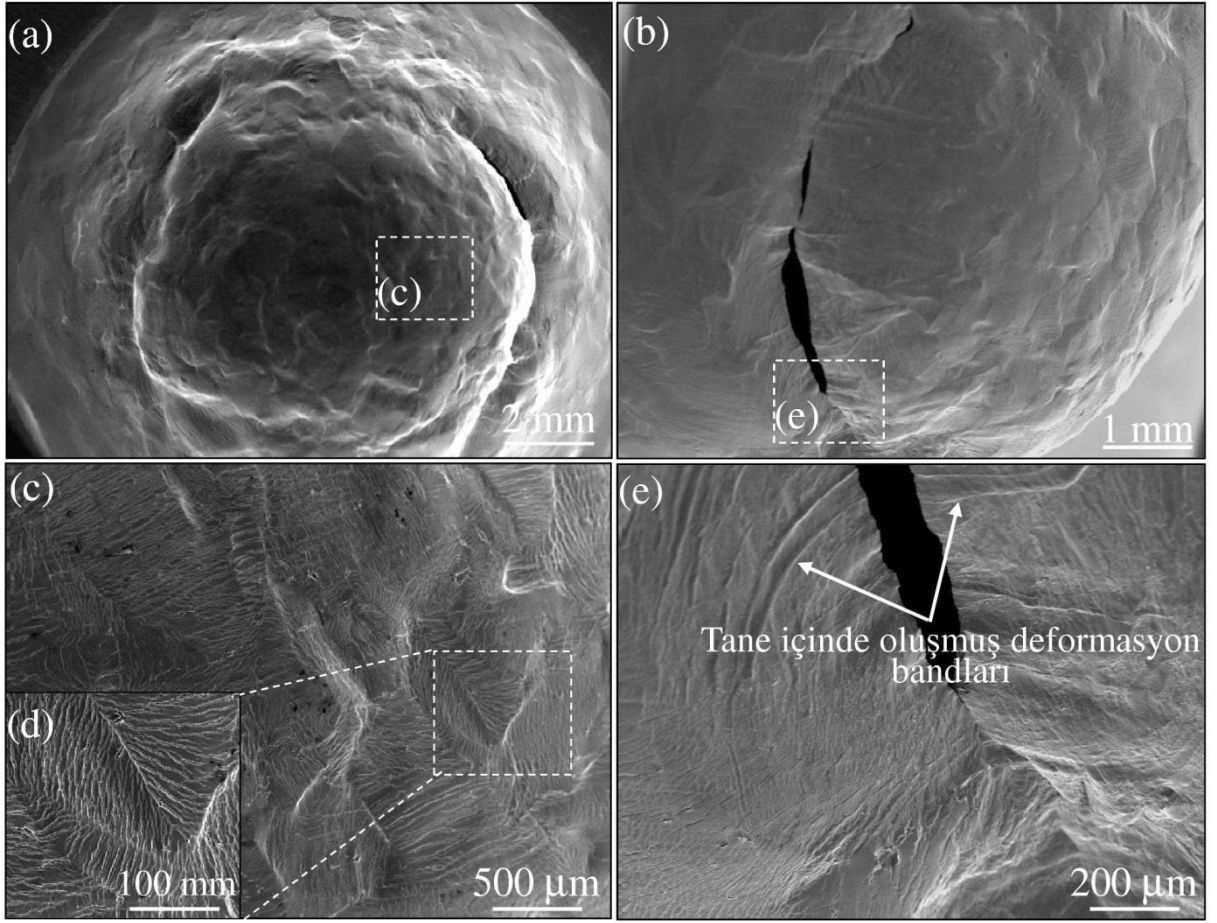


Rota-Bc'de 4 ve 8 pasoluk ve rota-E'de 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası uygulanan Erichsen testleri ile ortaya çıkan yüzey görünümleri sırasıyla Şekil 81, Şekil 82 ve Şekil 83'de verilmiştir. Bu resimler incelendiğinde, bu şartlarda elde edilen yüzey görünümlerinin birbirlerine benzedikleri dikkati çekmektedir. Bu benzerlik rota-C şartlarında elde edilen yüzey görünümlerle de uyumluluk göstermektedir. Nitekim ilgili tüm yüzey resimlerinde belirgin bir deformasyon bandı oluşumu ve buna bağlı olarak homojen deforme olmamış yüzey görünümü ön plana çıkmaktadır (Şekil 81(a)-(b)-83(a)-(b))

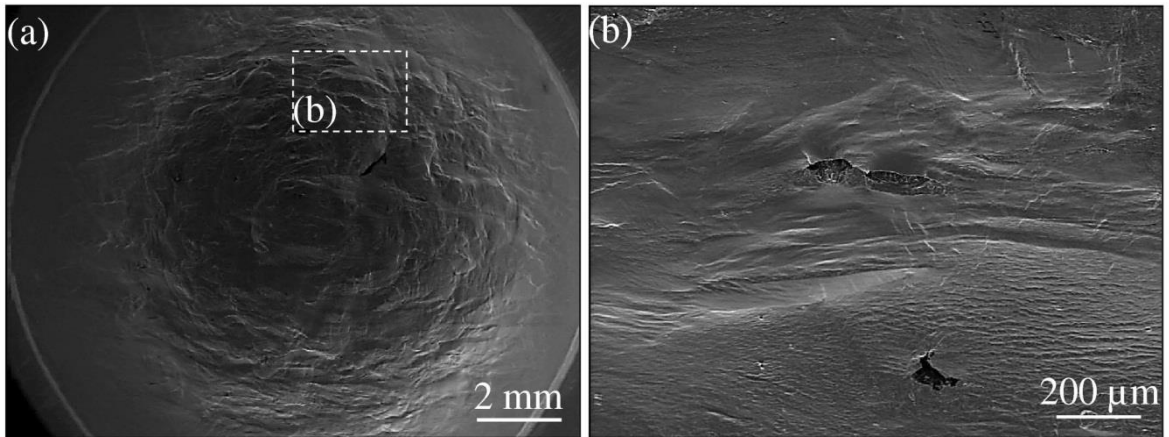
Erichsen testinde ki deformasyon davranışının daha iyi anlaşılabilmesi için, işlem öncesi ve farklı rotalarda 8 paso sayısında EKAE işlemi uygulanmış şartlardaki örneklerin Erichsen testi sonrasındaki kesit görünümleri Şekil 84'de verilmiştir. EKAE öncesi durumdaki numunenin kalınlığı uygulanan Erichsen testi sonrasında önemli oranda incelenerek 0,9 mm'den 0,55 mm'ye düşmüştür. Kalınlığın örnek boyunca dağılımında önemli oranda homojen olarak gerçekleştiği dikkati çekmektedir. Ancak, numunenin zımba ile temas ettiği tepe bölgelerde ölçülen kalınlığın diğer bölgelere kıyasla daha yüksek olduğu da dikkati çekmektedir (Şekil 84(b)). Bu durum, söz konusu bölgedeki örnek-zımba temasının neden olduğu sürtünme etkilerinden kaynaklanmaktadır. Bu etkiler, söz konusu bölgede, numunenin iki eksene çekme gerilmeleri altında şekil değişimini engelleyen bir etkide bulunmaktadır [123]. Farklı rotalarda 8 pasoluk EKAE işlemi uygulanmış durumdaki örneklerin kalınlıklarındaki değişimin çok sınırlı bir şekilde gerçekleştiği dikkati çekmektedir. Nitekim, 8A şartındaki numunenin Erichsen testi sonrasında neredeyse hiç incelme sergilemeyerek deney öncesindeki 0,9 mm olan örnek kalınlığını deney sonrasında da korumaktadır (Şekil 84(b)). Buna göre 8A şartındaki örneğin Erichsen testinde, kalınlık boyunca deformasyonun neredeyse hiç gerçekleşmediği sonucuna varılabilir. Başka bir deyiş ile söz konusu numunenin yetersiz  $E_i$  değerinin (0,4 mm) daha çok çatlak oluşumu ile gerçekleştiği sonucu çıkarılabilir. Bu sonuç, söz konusu örneğin yüzey özellikleri ile de uyumluluk göstermektedir.

8C, 8Bc ve 8E şartlarındaki örneklere uygulanan Erichsen testi sonrasındaki kesit görünümleri incelendiğinde, kalınlık dağılımının örnek boyunca homojen olmadığı anlaşılmaktadır. Numune boyunca kalınlık değişimleri incelendiğinde, her üç işlem rotasında da, zımba ile temas halinde bulunan tepe bölgede kalınlık azalmasının sınırlı bir şekilde ortaya çıktığı söylenebilir. Nitekim, bu temasın görüldüğü bölgede, 8C, 8Bc ve 8E şartlarındaki örneklerin kalınlıkları sırasıyla, 0,75mm, 0,85 mm ve 0,90 mm olduğu görülmektedir. Öte yandan temas bölgesinin hemen yakınında ise örnek kalınlığının

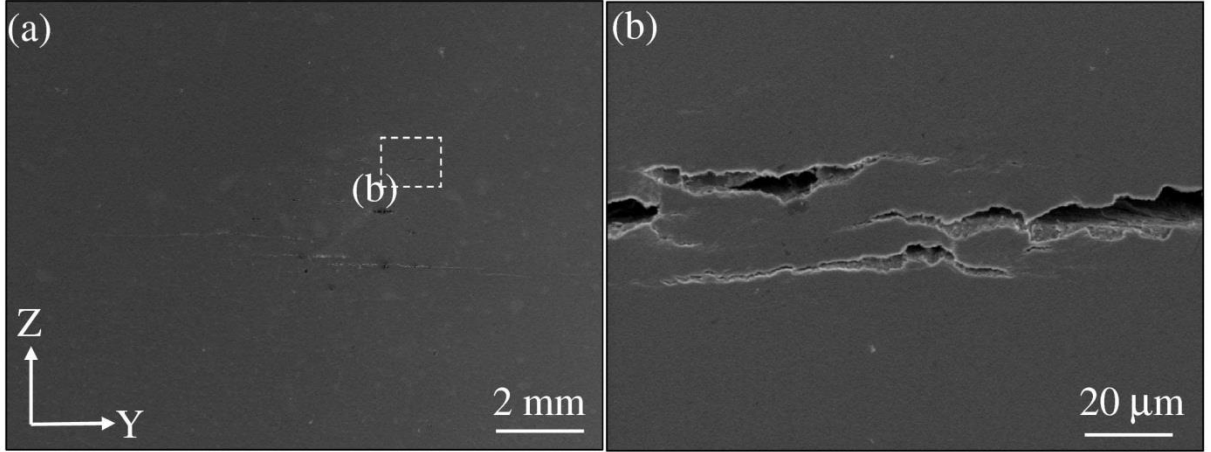
önemli oranda azaldığı dar bir bölge dikkati çekmektedir. Test öncesinde 0,9 mm olan kalınlık, 8C, 8Bc ve 8E şartındaki numunelerin bu bölgesindeki sırasıyla, 0,5mm, 0,75mm ve 0,8 mm değerlerini almaktadır. Numunelerin kalıba tutturulduğu flanş kısmına yakın bölgelerdeki örnek kalınlığının ise değişim göstermediği dikkati çekmektedir. Nitekim her üç işlem şartında da deney öncesindeki 0,9 mm kalınlığın flanşa yakın bölgede değişim sergilememektedir. Örnek kalınlıklarının örnek boyunca değişimleri, Bu durum söz konusu şartlarda örneklerin Erichsen testi sonrasında sergiledikleri yüzey özellikleri ile de uyum göstermektedir. Nitekim, 8Bc, 8C ve 8E şartlarındaki örneklerin yüzey morfolojilerinin incelendiği bölümde de ayrıntılı bir şekilde anlatılan lokalize deformasyon davranışının örnek boyunca kalınlık değişiminde de belirgin bir şekilde görüldüğü söylenebilir. Nitekim, örnek yüzeyinde lokal deformasyon bantlarının görüldüğü kısımda, örnek kalınlığında önemli oranda incelmektedir. Öte yandan numunede yüzey morfolojisinde değişim görülmeyen flanşa yakın bölgelerde, kalınlık değişimi de ortaya çıkmamaktadır.



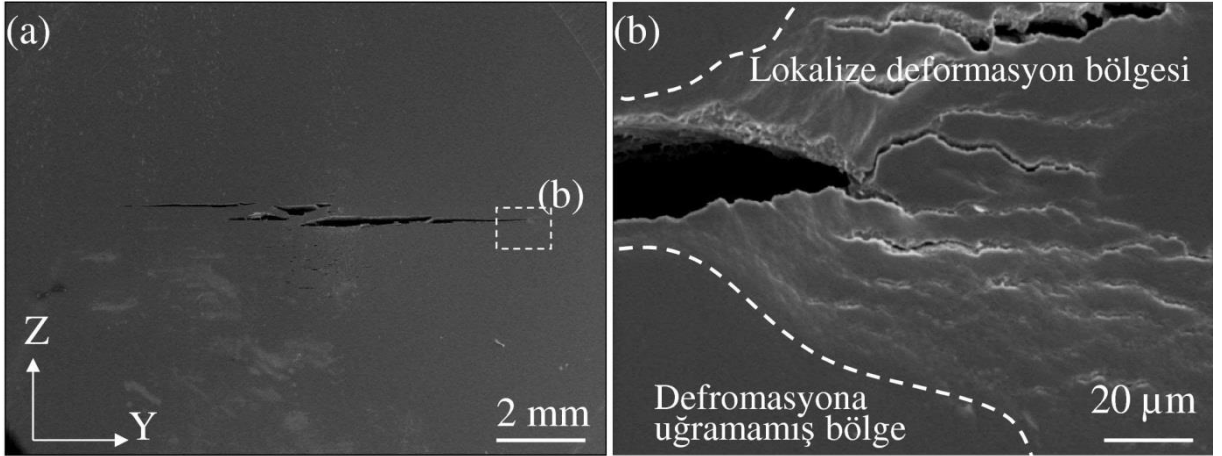
Şekil 75. EKAE öncesi durumdaki örneklerin Erichsen testi sonrası sergiledikleri yüzey morfolojisini gösteren farklı büyütmelerdeki SEM resimleri: (a) Portakal kabuğu oluşumunu da gösteren genel görünüm, (b) yırtılma bölgesinin görünümü, (c)-(d) taneler arasındaki kristalografik yönelim farklarına bağlı olarak ortaya çıkan yüzey çatlakları görünüm ve (e) çatlak ilerleme bölgesinin görünümü



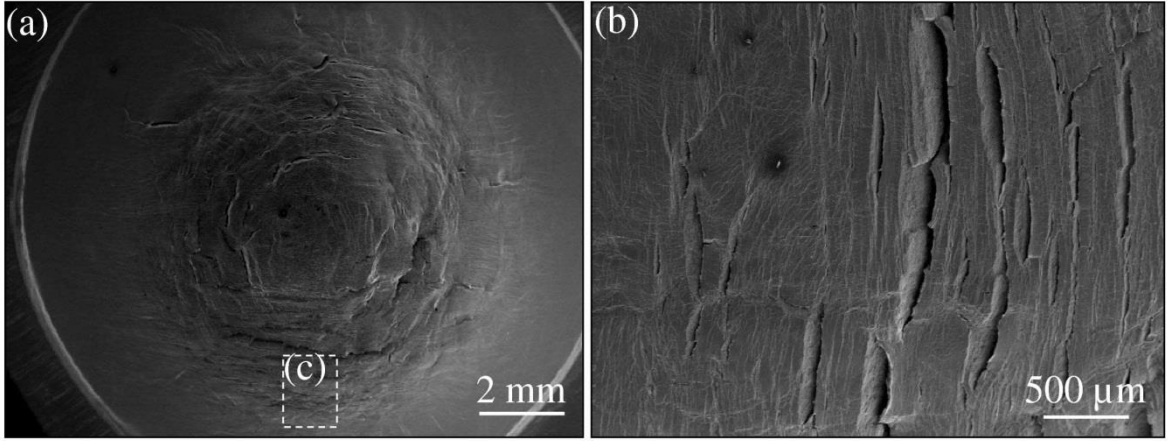
Şekil 76. Bir paso sayısında EKAE uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin Erichsen testi sonrasında sergilediği yüzey görünümleri: (a) Düşük büyütmeye genel görünüm, (b) lokalize deformasyon bantları ve çatlaklar



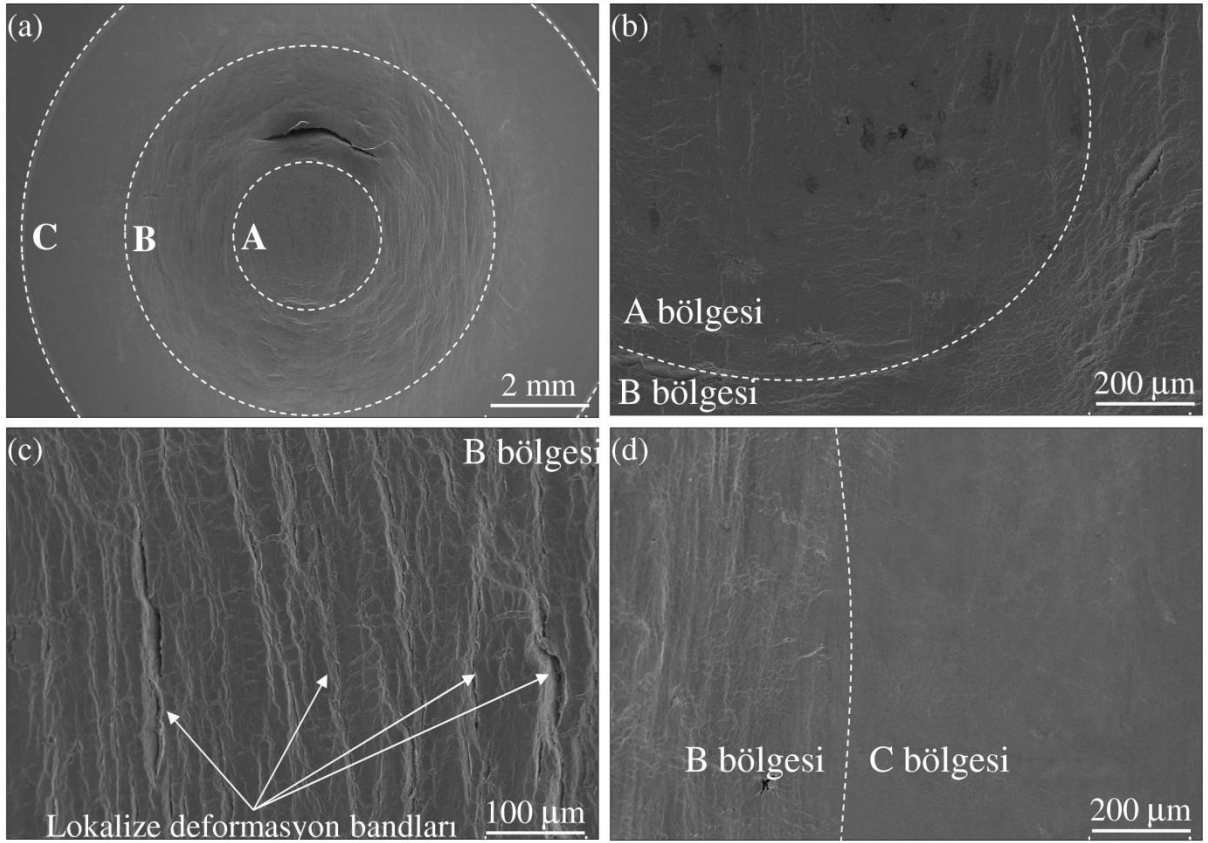
Şekil 77. Rota-A'da 4 pasoluk EKAET uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin Erichsen testi sonrası sergilediği yüzey görünümleri: (a) Düşük büyütmede genel görünüm, (b) kırılmaya neden olan çatlaklar ve çatlak ilerleme yönlerinin görünümü



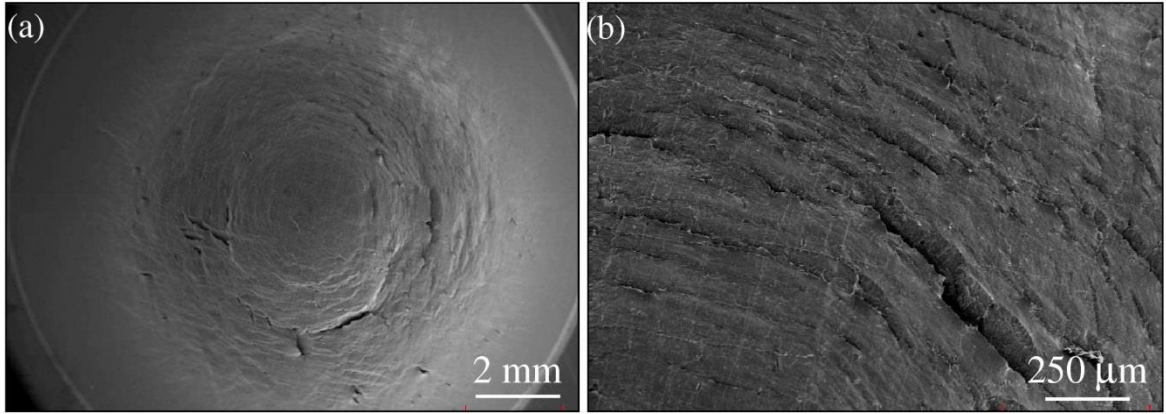
Şekil 78. Rota-A'da 8 pasoluk EKAET uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin Erichsen testi sonrası sergilediği yüzey görünümleri: (a) Düşük büyütmede genel görünüm, (b) kırılmaya neden olan çatlaklar ve çatlak ilerleme yönlerinin görünümü



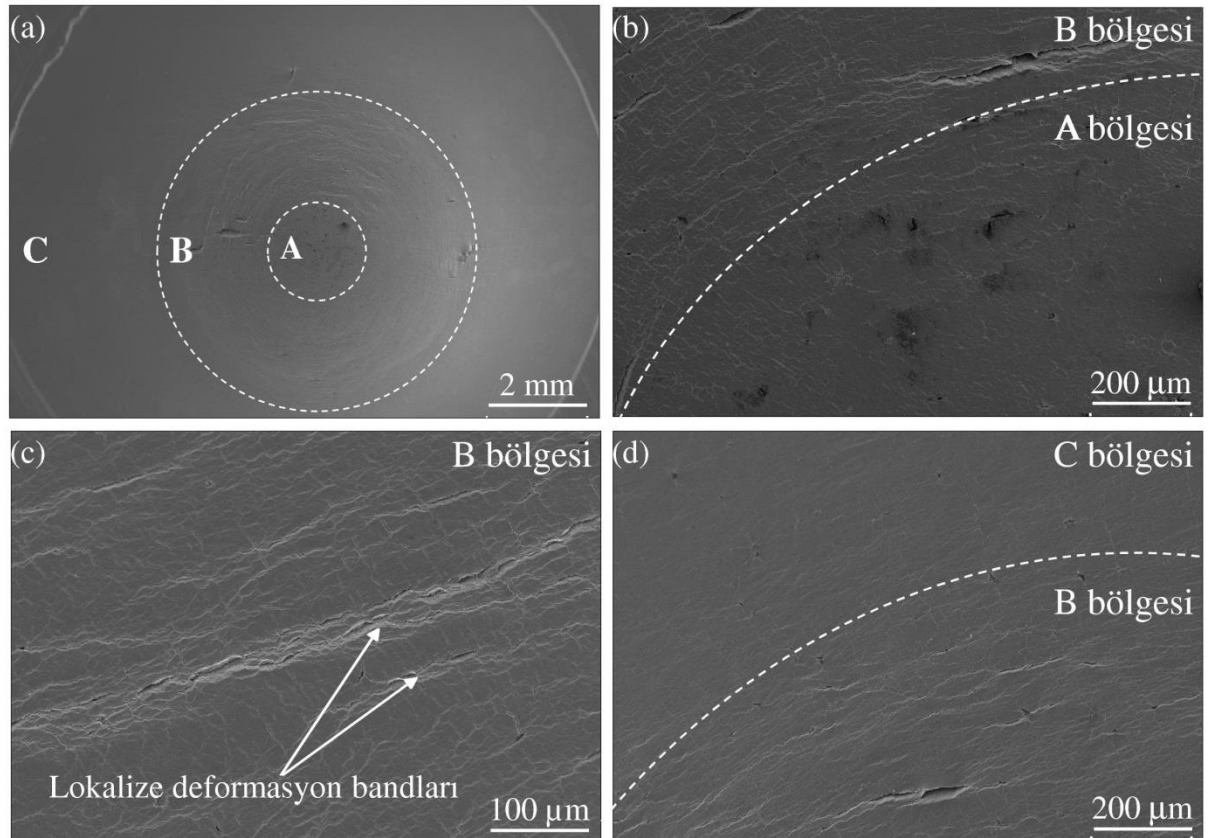
Şekil 79. Rota-C’de 4 pasoluk EKAЕ uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin Erichsen testi sonrasında sergilediği yüzey görünümleri: (a) Genel görünüm, (b) lokalize deformasyon bantları ve çatlaklar



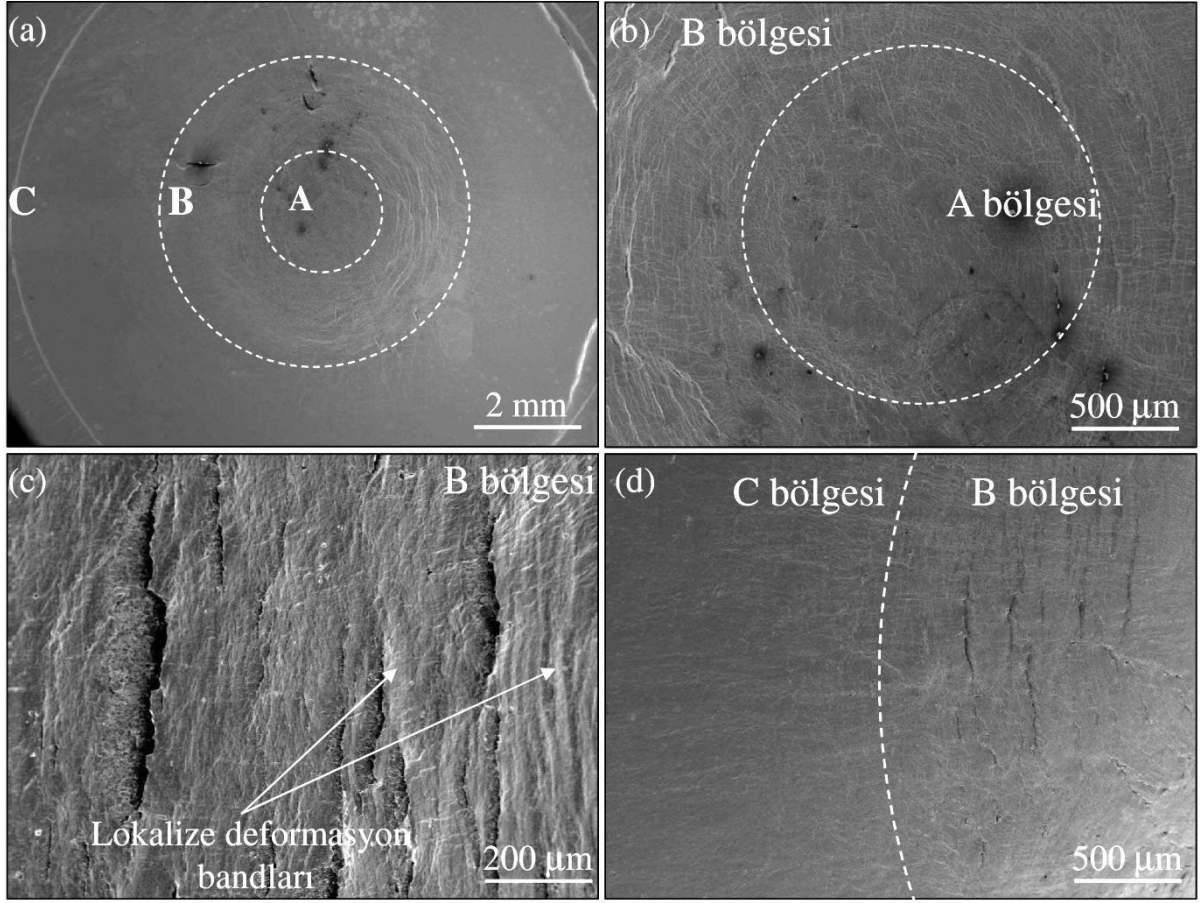
Şekil 80. Rota-C’de 8 paso EKAЕ uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin Erichsen testi sonrasında sergilediği yüzey görünümleri: (a)-(b) Genel görünümler, (c) lokalize deformasyon bölgesinin görünümü (d) lokalize deformasyon bölgesi ve flanş bölgesinin görünümü



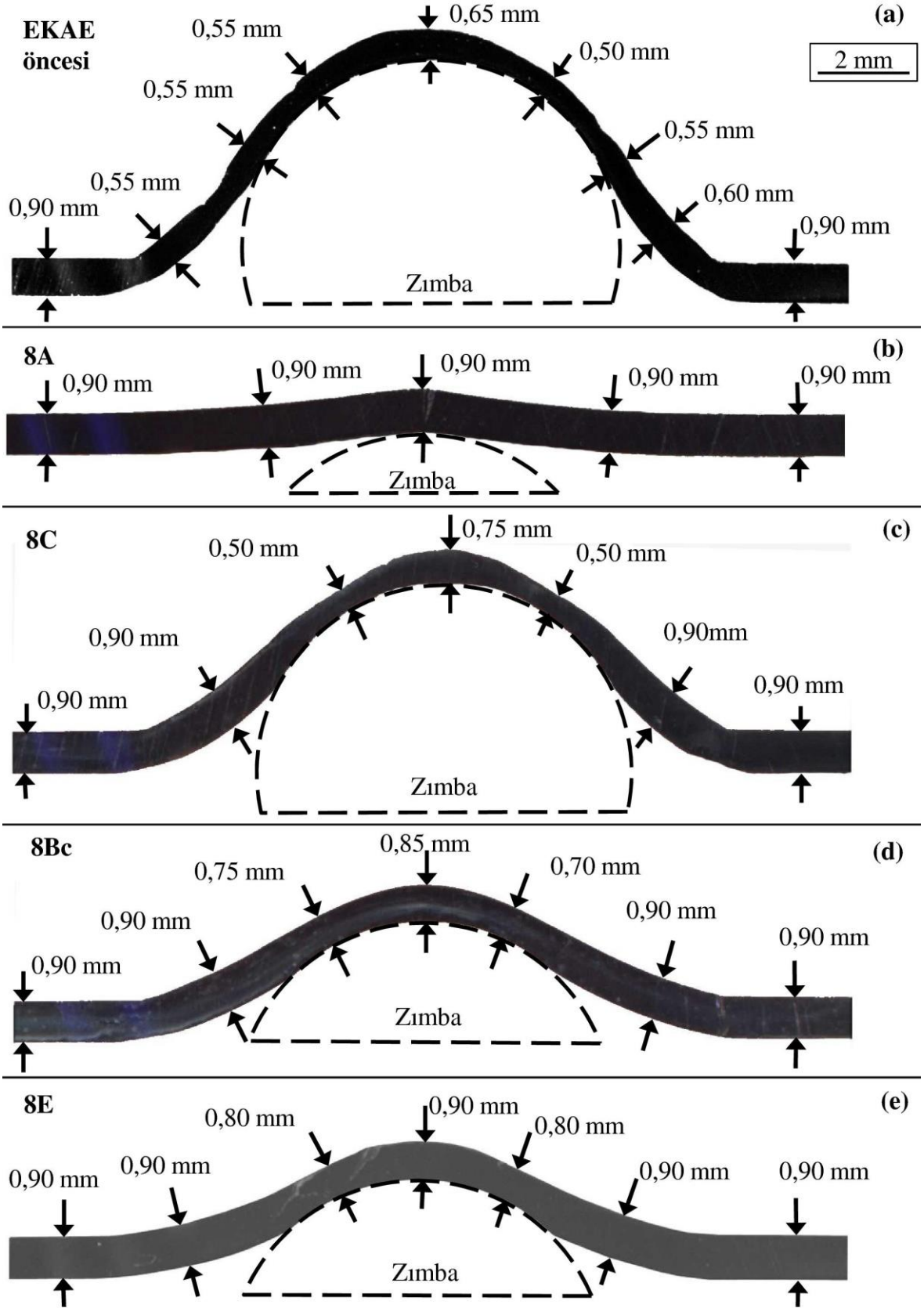
Şekil 81. Rota-Bc'de 4 pasoluk EKAЕ uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin Erichsen testi sonrasında sergilediği yüzey görünümleri: (a)-(b) Genel görünüm ve (c)-(d) yırtılma bölgesinin yakından görünümü



Şekil 82. Rota-Bc'de 8 pasoluk EKAЕ uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin Erichsen testi sonrasında sergilediği yüzey görünümleri: (a)-(b) Genel görünüm, (c) lokalize deformasyon bölgesinin görünümü (d) lokalize deformasyon bölgesi ve flanş bölgesinin görünümü



Şekil 83. Rota-E’de 8 pasoluk EKAЕ uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin Erichsen testi sonrasında sergilediği yüzey görünümleri: (a)-(b) Genel görünümler, (c) lokalize deformasyon bölgesinin görünümü (d) lokalize deformasyon bölgesi ve flanş bölgesinin görünümü



Şekil 84. (a) EKAE öncesi, (b) 8A, (c) 8C, (d) 8Bc ve (e) 8E şartlarındaki numenlerin Erichsen testi sonrasındaki kesit görüntüleri



Elde edilen Erichsen sonuçlarına göre, EKAE işleminin IF-çeliğinin şekillendirilebilirlik özelliklerini, tek eksenli gerilme altında uygulanan çekme deneyinin işaret ettiği kadar olmasa da belli oranda olumsuz etkilendiği söylenebilir. Bu durum IF-çeliğinin endüstriyel kullanımı açısından bir olumsuzluk olarak değerlendirilebilir. Bu nedenle, bu olumsuzluğu gidermek ve şekillendirilebilirlik özellikleri ile mukavemet özellikleri arasında optimizasyonu sağlamak için seçilen belli şartlardaki örnekler ısı işlemler uygulandı. Bu amaçla, daha önce gerçekleştirilen diğer çalışmalarla da uyumlu olması açısından rota-E'de 8 pasoluk EKAE uygulanmış (8E) numuneler başlangıç malzemesi olarak belirlendi.

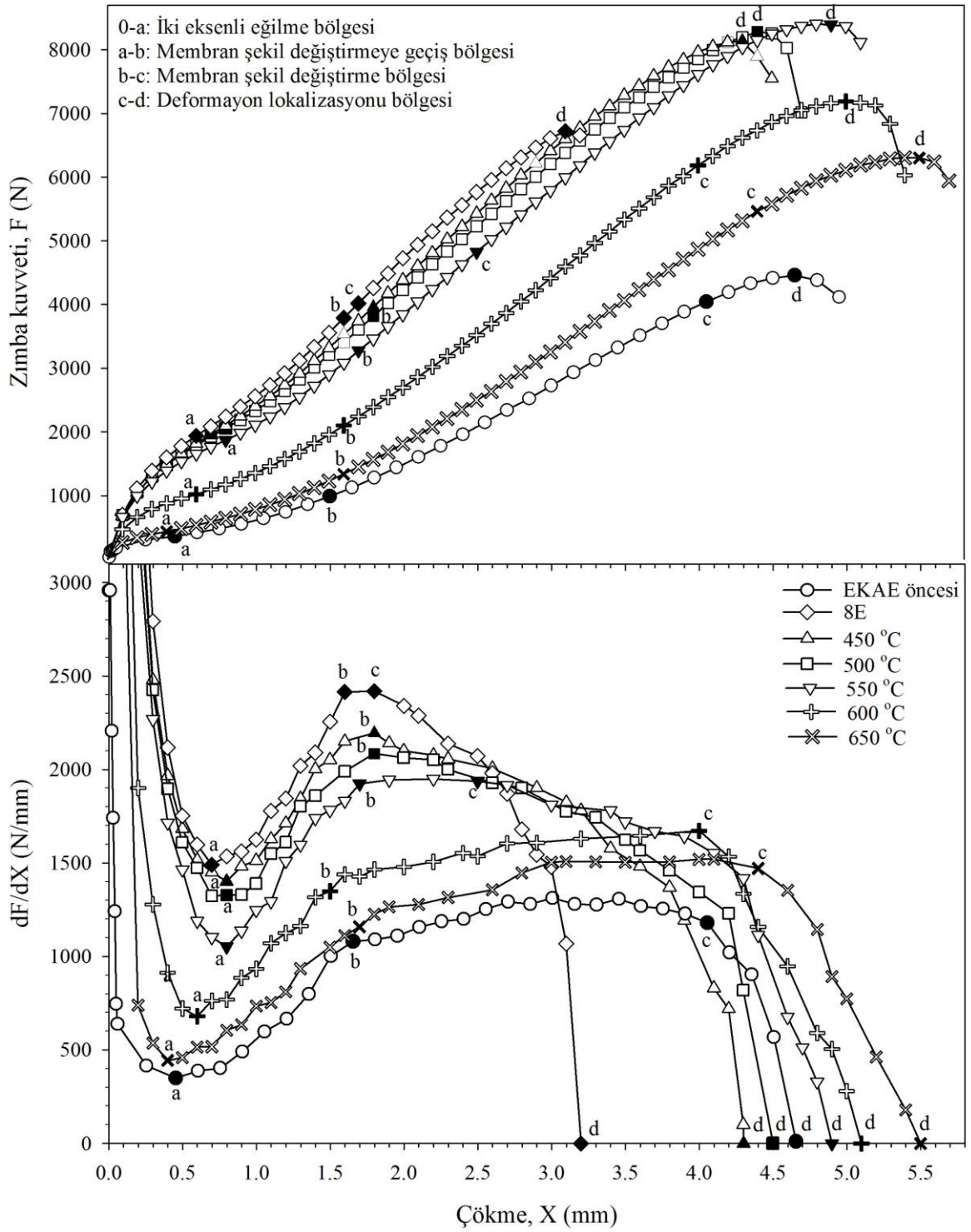
Şekil 85(a)-(b)'de farklı sıcaklıklarda ısı işlemlere tabi tutulan UİT yapılı çelik örnekler için F-X eğrileri ve bu eğrilerden türetilen  $dF/dX-X$  eğrileri gösterilmiştir. Bu eğrilerden, farklı sıcaklıklarda uygulanan ısı işlemlerin çeliğin iki eksenli gerilme altındaki deformasyon davranışına önemli etkilerde bulunduğu anlaşılmaktadır (Şekil 85(a)-(b)). Genel olarak bakıldığında, uygulanan tavlama işleminin F-X eğrilerini ısı işlem öncesi duruma göre daha düşük seviyelere kaydıracağı ve bu etkinin artan tavlama sıcaklığı ile daha da belirgin olarak gerçekleştiği görülmektedir. Elde edilen  $dF/dX-X$  eğrileri ise, tavlama öncesi görülen deformasyon lokalizasyonunun  $450^{\circ}\text{C}$  ve  $500^{\circ}\text{C}$ 'de uygulanan tavlama sonucu da varlığını koruduğu, ancak bu davranışın  $550^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta uygulanan tavlama sonrası değişmeye başladığını göstermektedir. UİT yapılı çeliğin bu sıcaklığın üzerinde tavlama sonrası ise bu etki tamamen ortadan kalkmakta ve EKAE öncesi duruma benzer bir davranış ortaya çıkmaktadır. Nitekim deformasyon sertleşme bölgesi olarak da nitelendirilen membran şekil değişimi bölgesi,  $550^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar uygulanan ısı işlemler sonrası ortaya çıkmamaktadır (Şekil 85(b)). Ancak bu sıcaklıkta uygulanan ısı işlem ile birlikte söz konusu bölge oluşmakta ve sıcaklık arttıkça da genişleyerek EKAE öncesi yapıda elde edilen davranışa dönüşmektedir. Ayrıca,  $550^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar uygulanan tavlama işlemleri sonrası membran şekil değişimi bölgesi belirgin bir şekilde oluşmamakta, ancak bunun yerine şekil değişiminin deformasyon lokalizasyonu ile birlikte devam ettiği bir bölge ("b"- "d") ortaya çıkmaktadır. Bu bölgede  $dF/dX$  değerindeki azalma artan tavlama sıcaklığı ile beraber daha yavaş gerçekleşmektedir. Nitekim tavlama öncesi UİT yapılı örneklerde "b" noktasından sonra  $dF/dX$  değerlerindeki azalma keskin bir şekilde olurken,  $450^{\circ}\text{C}$  ve  $500^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklardaki tavlama sonrasında bu azalma daha yavaş gerçekleşmektedir. Bu durum  $550^{\circ}\text{C}$ 'de uygulanan tavlama sonrası ise daha belirgin hale gelerek, eğri nispeten yataya daha yakın bir seyir izlemektedir (Şekil 85(b)). Bu

durum, 550°C'ye kadar artan sıcaklıkla deformasyon lokalizasyonu ile gerçekleşen çökme miktarının da arttığını göstermektedir. Nitekim Şekil 85(b)'de gösterilen "b" noktası ile "d" noktası arasındaki çökme miktarları artan tavlama sıcaklığı ile birlikte artmaktadır. Öte yandan, 550°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda uygulanan tavlama işlemi ise Erichsen deneyi sonrası deformasyon karakteristiğinde önemli ölçüde etkilememiştir. Nitekim, 600°C ve 650°C sıcaklıkta tavlanan örneklerde daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen tavlama sonrası gözlenen deformasyon lokalizasyonu görülmemektedir. Şöyle ki, 600°C ve 650°C sıcaklıkta tavlanan örneklerde "b" ve "c" noktaları arasındaki geniş bir çökme bölgesinde membran şekil değişimi ile deformasyon gerçekleşmektedir (Şekil 85(a)). Bu deformasyon davranışı ise daha önce de belirtildiği gibi EKAE öncesi durumdaki iri taneli çelik örneklerde gözlenen deformasyon davranışı ile benzerlik göstermektedir. Bu bölgede deformasyon sertleşme davranışı daha etkin bir rol alarak, meydana çıkabilecek deformasyon lokalizasyonunun oluşumunu geciktirmektedir.

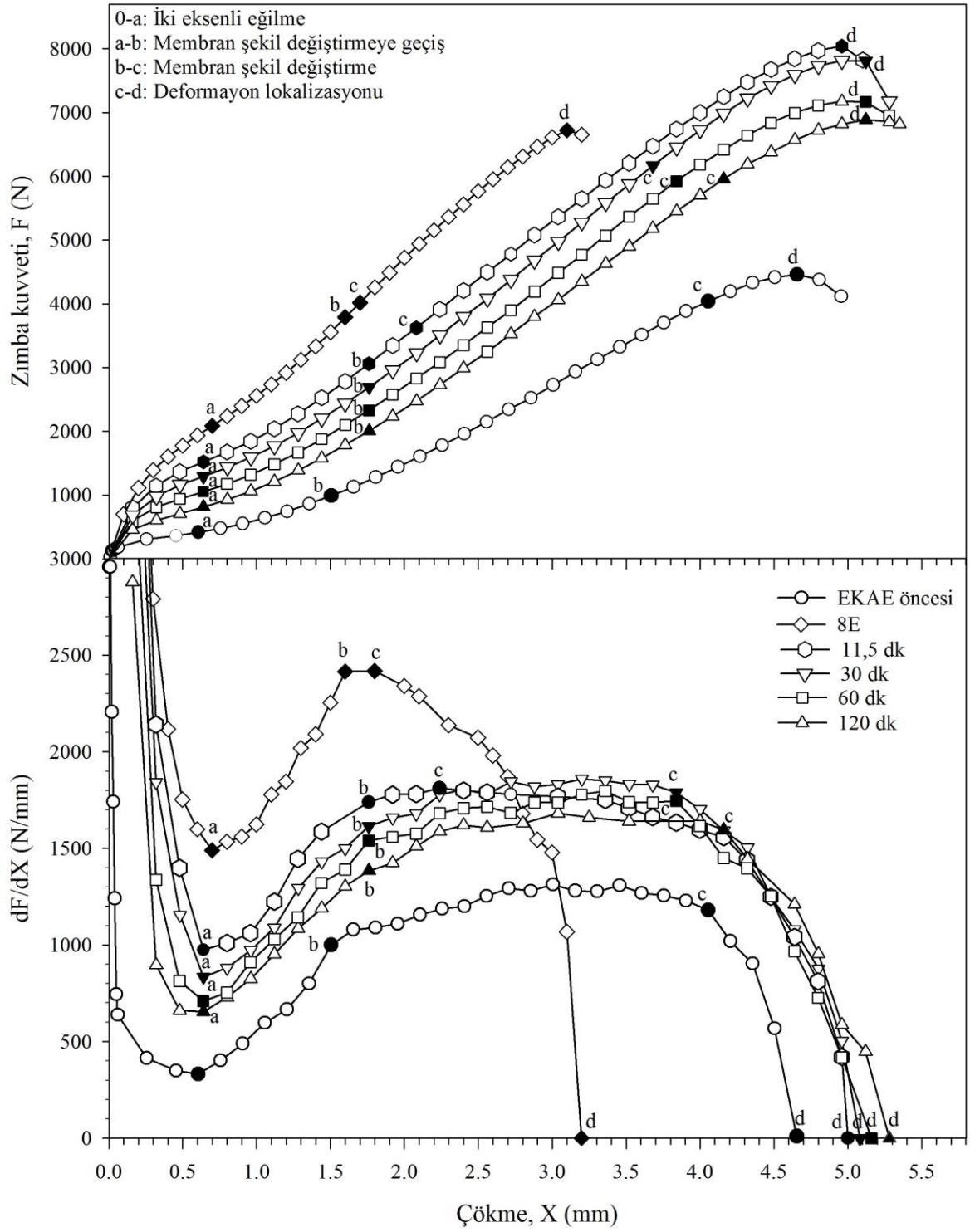
Tablo 11'de verilen şekillendirilebilirlik değerleri incelendiğinde, tavlama öncesi 2,9 mm olan  $E_i$  değeri 450°C, 500°C, 550°C, 600°C ve 650°C'de uygulanan tavlama işlemi sonrası önemli oranda artarak sırasıyla 4,3 mm, 4,5 mm, 4,8 mm, 5,2 mm ve 5,6 mm değerlerine ulaştığı dikkat çekmektedir. Bu sonuçlar, 550°C ve üzerindeki sıcaklıklarda uygulanan tavlama işleminin çeliğin  $E_i$  değerini EKAE öncesi durumda elde edilen 4,7 mm değerinin de üzerine çıkardığını göstermektedir (Tablo 11). Öte yandan, söz konusu  $E_i$  değerlerine ulaşmak için uygulanması gereken kuvvet bileşeni ( $F_{E_i}$ ) değerleri ise genel olarak tavlama öncesi duruma göre artış göstermektedir. Nitekim tavlama öncesi 6167 N olarak ölçülen  $F_{E_i}$  değeri 450°C, 500°C, 550°C, 600°C ve 650°C sıcaklıklarda bir saat süre ile uygulanan tavlama sonrasında sırasıyla, 8145N, 8293N, 8411N, 7442N ve 7093N değerlerini almaktadır.

Önceki bölümlerde elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurularak daha iyi şekillendirilebilirlik özelliği elde edilebilecek ısıtma işlem koşullarının ortaya konulması amacıyla, 600°C'de ve farklı tavlama sürelerinde gerçekleştirilen ısıtma işlemleri sonrası da Erichsen testleri uygulandı. Bu kapsamda, 600°C sıcaklıkta 11,5 dk, 30 dk, 60 dk ve 120 dk sürelerde tavllanmış durumda elde edilen kuvvet-çökme (F-X) eğrileri ile bu eğrilerinin eğiminin çökme miktarına göre değişimini gösteren diyagramlar ( $dF/dX-X$ ) Şekil 86'da gösterilmiştir. Bu diyagramlardan elde edilen temel şekillendirilebilirlik değerleri ise Tablo 11'de verilmiştir. Şekil 86 incelendiğinde, 600°C'de 11,5 dk süre ile uygulanan

tavlama sonrasında UİT yapılı çeliğin şekillendirilebilirliğinin arttığı görülmektedir. Bu şartlarda elde edilen çökme miktarı ( $X$ ) 4,9 mm ve bu değerinde elde edildiği kuvvet bileşeni ise 8094 N olarak belirlenmiştir (Tablo 11). Ancak söz konusu tavlama şartında da deformasyonun büyük oranda lokalizasyon ile gerçekleştiği dikkati çekmektedir (Şekil 86). Nitekim, söz konusu eğride membran şekil değişiminin görüldüğü “c”-“d” noktaları arasındaki çökme miktarının çok sınırlı olması da bu sonucu desteklemektedir. Artan tavlama süresiyle birlikte membran şekil değiştirme (“c” ve “d” noktaları arası) veya deformasyon sertleşme bölgesinde gerçekleşen çökme miktarı da artmaktadır. Bu artış, 30 dk süre ile uygulanan tavlama sonrasında belirgin bir şekilde ortaya çıkarken, daha uzun süreli tavlamalarda ise önemli bir değişim göstermemektedir. Nitekim 30 dk, 60 dk ve 120 dk tavlama süreleri sonunda ölçülen  $E_i$  değeri sırasıyla 5,0 mm, 5,2 mm ve 5,2 mm olmaktadır. Bu durum, 30 dk’dan daha uzun sürelerde tavlanan çeliğin  $E_i$  değerlerinde belirgin bir artışın ortaya çıkmadığını göstermektedir. Özellikle, 60 dk ve 120 dk süre ile uygulanan tavlama işlemi sonrasında elde edilen  $E_i$  değerleri yaklaşık aynı kalmaktadır. Öte yandan,  $F_{Ei}$  değerleri ise artan tavlama süresi ile çok belirgin olmayan bir azalma eğilimi göstermektedir. Ancak, bu değerlerin tamamı 8E şartında elde edilen  $F_{Ei}$  değerinden daha yüksektir (Tablo 11). Nitekim rota-E’de uygulanan 8 paso sonrasında 6167N olarak ölçülen  $F_{Ei}$  değeri, 11,5 dk, 30 dk, 60 dk ve 120 dk süre ile tavllanmış durumda sırasıyla 8094N, 7743N, 7442N ve 7260N değerlerini almaktadır (Tablo 11).



Şekil 85. 8E şartlarındaki örneklerin 450°C, 500°C, 550°C, 600°C ve 650°C'de 1 saat süreyle tavlama sonrası uygulanan Erichsen testinden elde edilen; (a) kuvvet-çökme (F-X) eğrileri ve (b) bu eğrilerin eğimlerinin çökme miktarına göre değişimini ( $dF/dX-X$ ) gösteren diyagramlar



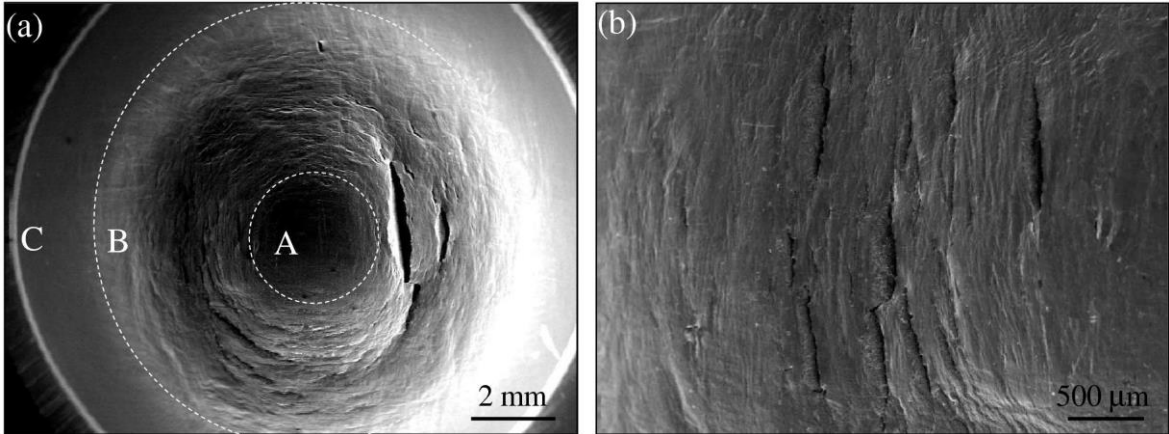
Şekil 86. 8E şartlarındaki UİT yapıları örneklere 600°C’de 11,5 dk, 30 dk, 60dk ve 120dk süre ile uygulanan tavlama işleminin Erichsen testinden elde edilen kuvvet-çökme eğrisine olan etkisini gösteren diyagram

Tablo 11. 8E şartlarındaki örneklere farklı sıcaklık ve sürelerde uygulanan tavlama sonrası gerçekleştirilen Erichsen testleri sonrası belirlene Erichsen indeksi ( $E_i$ ) ve Erichsen indeksine karşılık gelen kuvvet ( $F_{E_i}$ ) değerleri.

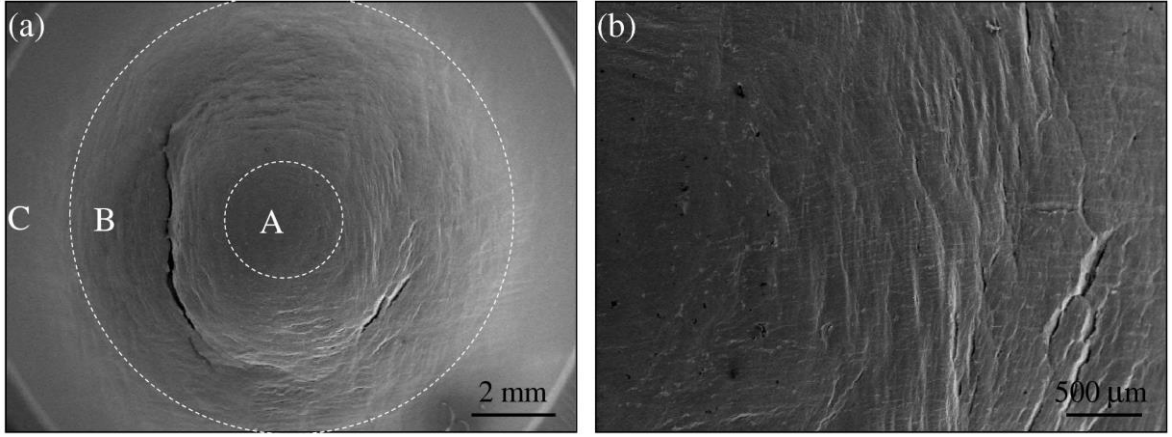
İşlem durumu	Isıl işlem durumu		Erichsen indeksi, $E_i$ (mm)	Erichsen indeksindeki kuvvet, $F_{E_i}$ (N)	
	Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )	Zaman (dk)			
EKAE öncesi	-	-	$4.7\pm 0,3$	$4605\pm 525$	
8E	20	-	$2,9\pm 0,4$	$6167\pm 811$	
	450	60	$4,3\pm 0,3$	$8145\pm 320$	
	500	60	$4,5\pm 0,2$	$8293\pm 212$	
	550	60	$4,8\pm 0,1$	$8411\pm 124$	
	600	600	11,5	$4,9\pm 0,1$	$8094\pm 71$
			30	$5,0\pm 0,1$	$7743\pm 132$
			60	$5,2\pm 0,2$	$7442\pm 353$
			120	$5,2\pm 0,1$	$7260\pm 112$
	650	60	$5,6\pm 0,1$	$7093\pm 71$	

Farklı sıcaklıklarda 1 saat süreyle tavlanan örneklerin uygulanan Erichsen deneyi sonrası sergiledikleri yüzey özellikleri SEM yardımıyla ayrıntılı bir şekilde incelendi ve genel durumu gösteren seçilmiş resimler Şekil 87-91'de gösterildi. Bu resimlerden,  $450^{\circ}\text{C}$ ,  $500^{\circ}\text{C}$  ve  $550^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarda tavlama sonrasında F-X ve dF/dX-X eğrilerinde gözlenen deformasyon lokalizasyonu davranışının, ilgili örneklerin yüzey özelliklerine de yansıdığı anlaşılmaktadır. Nitekim söz konusu sıcaklıklarda tavlama öncesi durumdaki Erichsen örneklerinin yüzey özellikleri ile tavlama öncesi durumda Erichsen deneyine tabi tutulan UİT yapılı örneğin yüzey özellikleri (Şekil 83) benzerlikler taşımaktadır. Şekil 87, Şekil 88 ve Şekil 89'da verilen yüzey resimlerinden görüldüğü gibi, örneklerin kalıba sabitlendiği flanş ve flanşa yakın bölgelerde önemli bir deformasyon ve buna bağlı yüzeysel değişim oluşmamaktadır. Bu bölgede yüzey büyük oranda deney öncesi durumu yansıtmaktadır (Şekil 87(a)-89(a)). Bunun yanında, iki eksenli gerilme altındaki deformasyonun büyük oranda lokalize bir şekilde B-bölgesinde gerçekleştiği görülmektedir. Bu bölgede gözlenen deformasyon bantları ve belli doğrultularda oluşan çatlak ve yırtılmalar bu sonucu doğrulamaktadır (Şekil 87(b)-89(b)). Örneğin merkez bölgesinde ise yine UİT yapılı örnekte olduğu gibi belirgin bir deformasyon etkisi ortaya çıkmamaktadır ((Şekil 87 (a)-89(a)). Bunun nedeni ise bu bölgede örnek yüzeyi ile zımba yüzeyi arasında oluşan yüksek orandaki sürtünme etkisidir [123]. Söz konusu etki bu temas bölgesinde oluşabilecek deformasyonu büyük ölçüde engellemektedir. Bu durum, Erichsen testi sırasında uygulanan deformasyonun örneğin her tarafına homojen olarak etki etmediğini

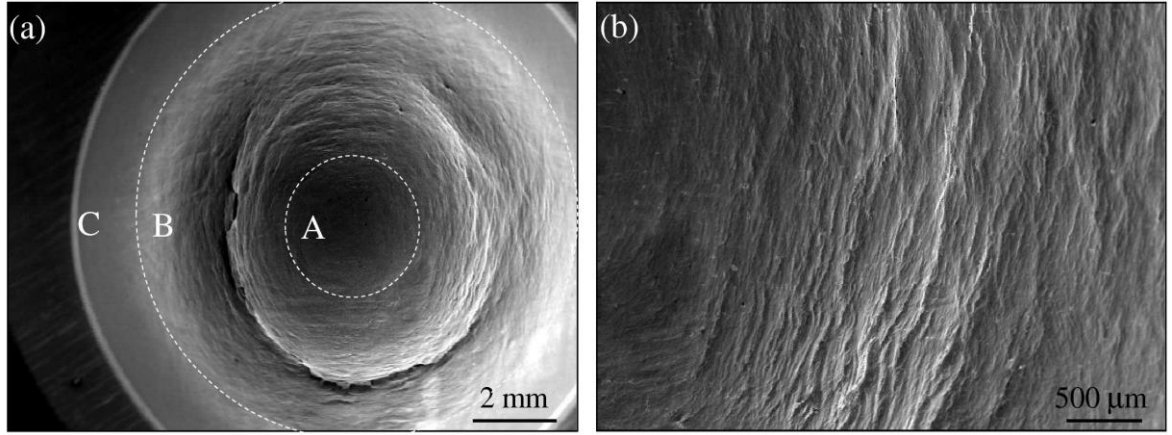
göstermektedir. Tavlama sıcaklığı 550°C'nin üzerine çıkarıldığında ise lokalize deformasyon davranışı giderek azalmaktadır ve bunun yerine üniform deformasyonun bütün örnek yüzeyine hakim olduğu görülmektedir (Şekil 90-91). Nitekim ilgili resimlerde yüzey özellikleri bütün deformasyon bölgelerinde benzer bir karakter göstermektedir. Bu durum 650°C sıcaklıkta uygulanan ısıl işlem sonrasında çok daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, EKAE işlemi öncesi durumdaki çeliğin deformasyon sonrası yüzeyinde gözlenen belirgin "portakal kabuğu etkisi", özellikle 600°C ve 650°C'de uygulanan tavlama sonrasında etkin hale gelmemektedir. Bu şartlardaki örnekler nispeten daha iyi yüzey kalitesi ve daha düşük yüzey pürüzlülüğü sergilemektedir (Şekil 90-91). Bu durum söz konusu tavlama koşulları sonrasında elde edilen tane boyutunun EKAE öncesi duruma göre hala çok daha ince olmasından kaynaklanmaktadır. Nitekim söz konusu tavlama şartları sonrası bile ortaya çıkan içyapılardaki tane boyutu değerleri 10 µm civarında kalmaktadır.



Şekil 87. 8E şartlarındaki UİT yapılı çelik örneğine 450°C'de 1 saat tavlandıktan sonra uygulanan Erichsen testi ile ortaya çıkan yüzeye ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) lokalize deformasyon bölgesinin yakından görünümü

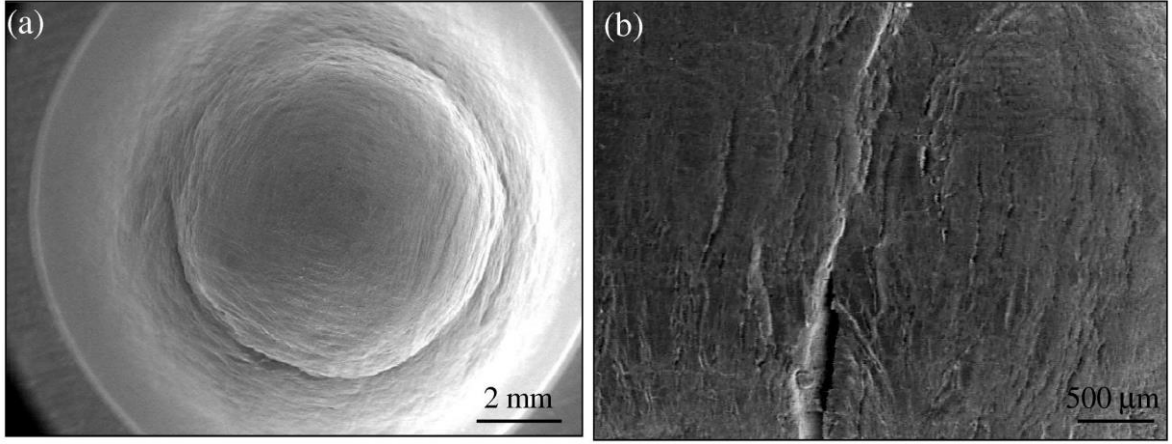


Şekil 88. 8E şartlarındaki UİT yapılı çelik örneğinin 500°C’de 1 saat tavlandıktan sonra uygulanan Erichsen testi ile ortaya çıkan yüzeye ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) lokalize deformasyon bölgesinin yakından görünümü

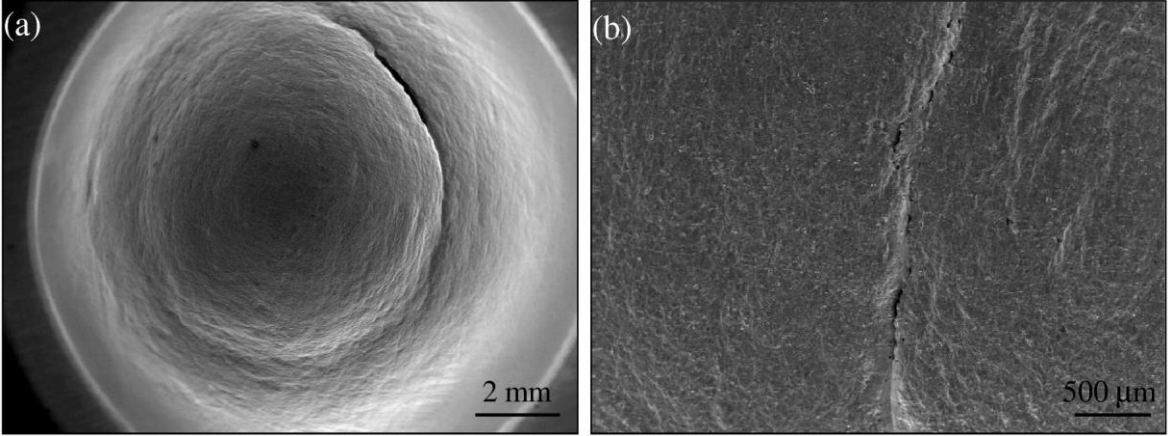


Şekil 89. 8E şartlarındaki UİT yapılı çelik örneğinin 550°C’de 1 saat tavlandıktan sonra uygulanan Erichsen testi ile ortaya çıkan yüzeye ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) lokalize deformasyon bölgesinin yakından görünümü





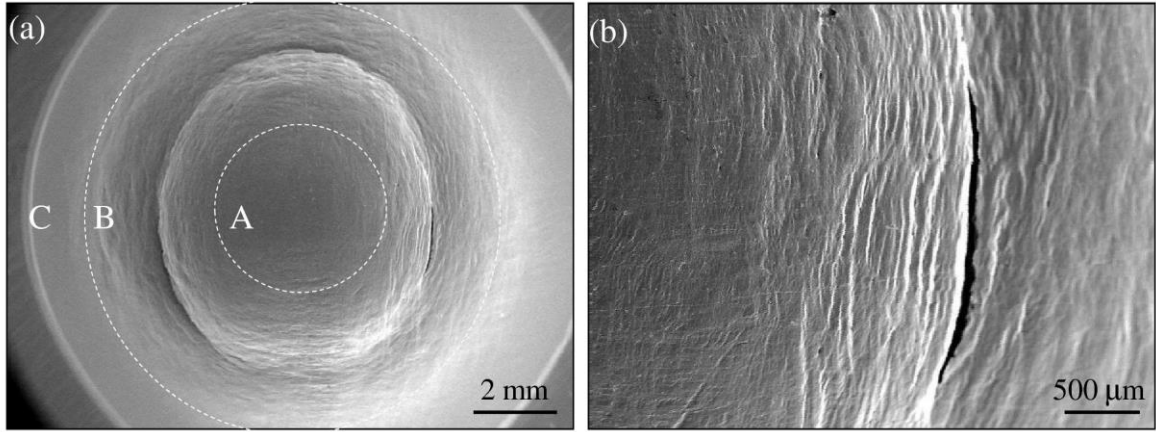
Şekil 90. 8E şartlarındaki UİT yapılı çelik örneğinin 600°C’de 1 saat tavlandıktan sonra uygulanan Erichsen testi ile ortaya çıkan yüzeye ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) çatlak bölgesinin yakından görünümü



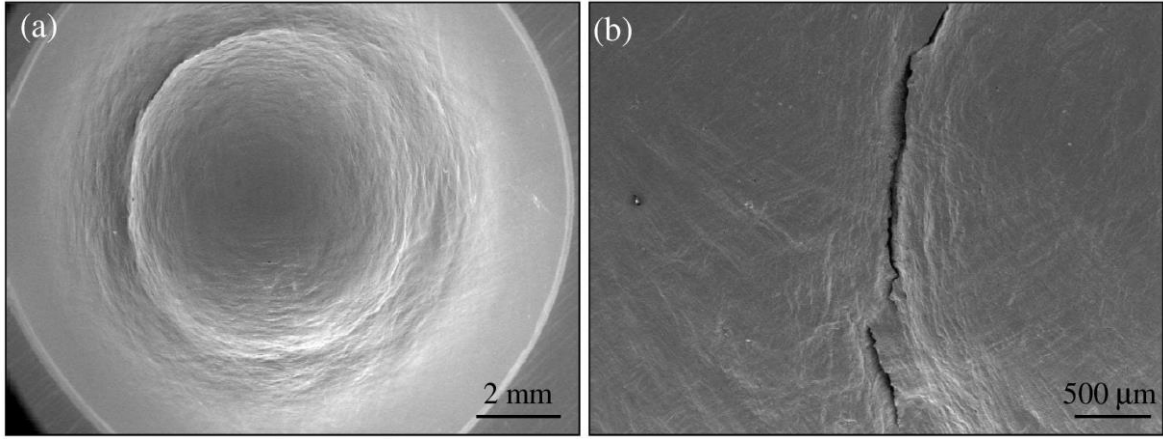
Şekil 91. 8E şartlarındaki UİT yapılı çelik örneğinin 650°C’de 1 saat tavlandıktan sonra uygulanan Erichsen testi ile ortaya çıkan yüzeye ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) çatlak bölgesinin yakından görünümü

UİT yapılı çeliğe 600°C’de ve farklı sürelerde uygulanan tavlama işleminin Erichsen testi sonrası örneklerin yüzey özelliklerine etkisi Şekil 92-94’de verilen SEM resimlerinde gösterilmiştir. Bu resimlerden, 11,5 dk’lık tavlama sonrası örnek yüzeyinin daha çok lokalize deformasyon ile şekillendirildiği anlaşılmaktadır (Şekil 92). Nitekim düşük sıcaklıklarda (450°C’de-550°C) uygulanan tavlama sonrasında olduğu gibi, örneğin kalıba sabitlendiği flanş ve yakın bölgelerinde (C-bölgesi) etkin bir deformasyonun gerçekleşmediği, oluşan deformasyonun ise büyük oranda B-bölgesinde ve lokalize bir şekilde olduğu ilgili resimlerden açıkça görülmektedir (Şekil 92(b)). A-bölgesinde ise zımba ile örnek yüzeyi arasındaki sürtünmeden dolayı oluşabilecek deformasyon miktarının B-bölgesine göre büyük oranda sınırlanmış olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 92 (b)). Öte yandan, Şekil 93-94’de görüldüğü gibi tavlama süresi artırıldığında söz konusu

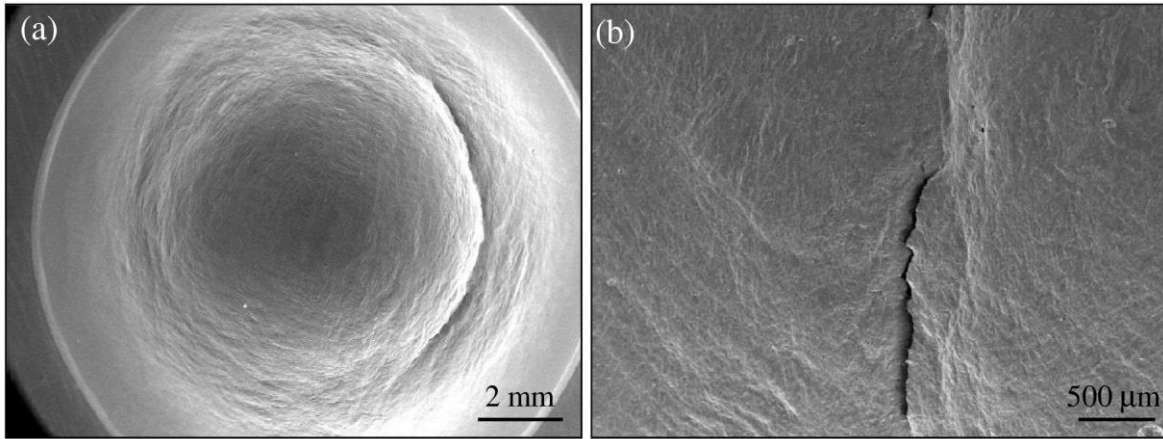
çelik örneklerin deformasyon davranışı ve buna bağlı olarak gelişen yüzey görünümünde farklar ortaya çıkmaktadır. Nitekim 30 dk ve daha uzun sürelerde uygulanan tavlama ile Erichsen örnek yüzeylerindeki deformasyon lokalizasyonunun büyük oranda ortadan kalkarak, yerine geniş bir bölgede geçerli olan üniform deformasyona dayalı şekil değişiminin etkin olduğu ilgili resimlerden anlaşılmaktadır (Şekil 90, Şekil 93, Şekil 94). Ayrıca bu durumun aratan tavlama süresiyle daha belirginleştiği de dikkati çekmektedir. Söz konusu örnek yüzeylerinin bütün bölgelerinde, daha kısa süreli tavlama şartlarına kıyasla homojen deformasyona dayalı olarak gelişmiş yüzey morfolojisinin daha etkili olduğu gözükmemektedir (Şekil 90, Şekil 93, Şekil 94). Deformasyon pekleşmesine dayalı olarak gelişen üniform şekil değişiminin ardından dar bir bölgede örnek kalınlığındaki aşırı incelme ve yırtılma olayı gerçekleşmektedir. Meydana gelen yırtılmanın ise iki eksenli çekme gerilmesi altındaki bölgede (membran şekil değiştirme bölgesi) çevresel olarak geliştiği dikkati çekmektedir.



Şekil 92. 600°C’de 11,5 dk süreyle tavlanan 8E şartındaki UİT yapıları örneklerine uygulanan Erichsen testi sonrası ortaya çıkan yüzey görünümleri: (a) Genel görünüm ve (b) lokalize deformasyon bölgesinin yakından görünümü



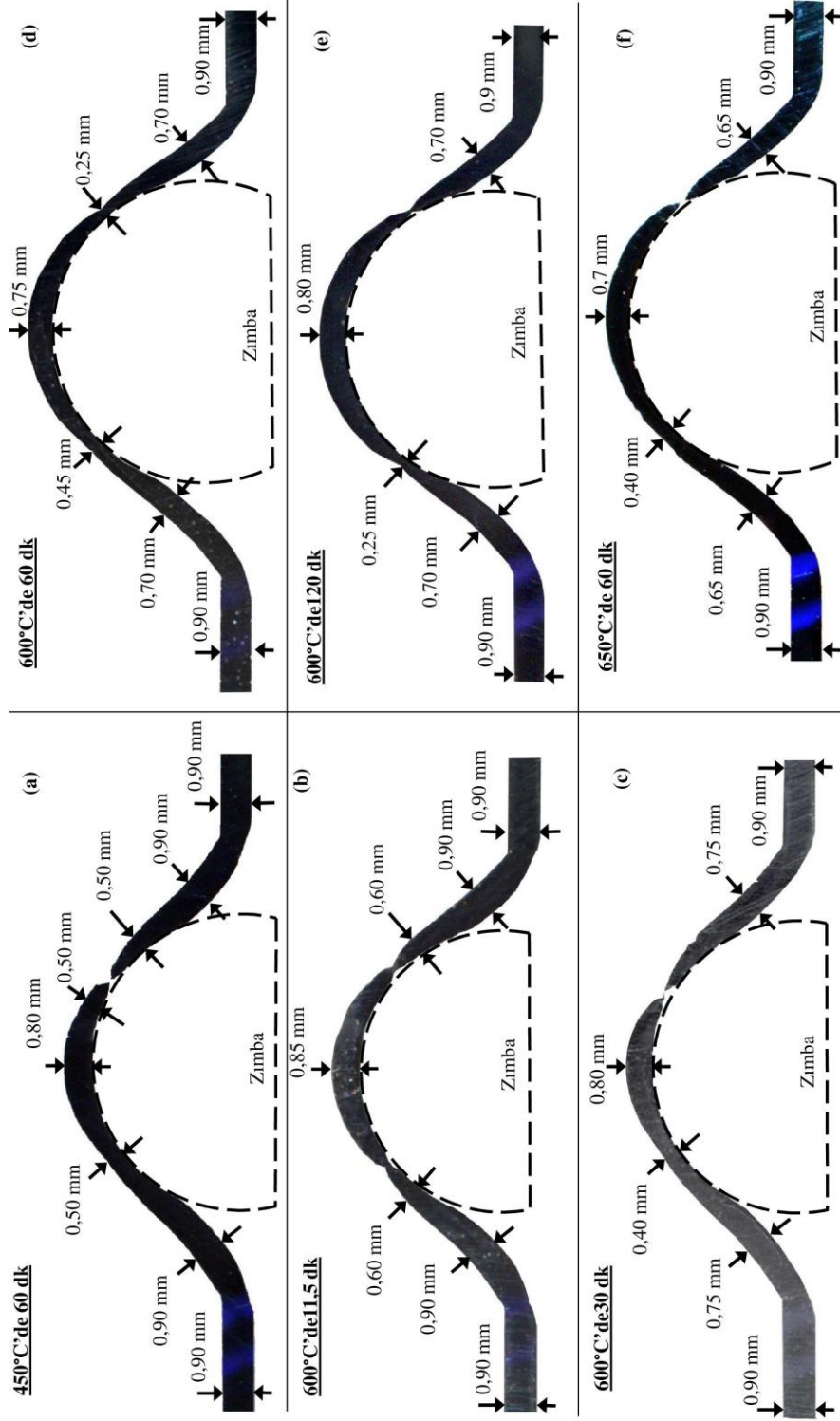
Şekil 93. 600°C’de 30 dk süreyle tavlanan 8E şartındaki UİT yapıları uygulanan Erichsen testi sonrası ortaya çıkan yüzey görüntüleri: (a) Genel görünüm ve (b) çatlak bölgesinin yakından görünümü



Şekil 94. 600°C’de 120 dk süreyle tavlanan 8E şartındaki UİT yapıları uygulanan Erichsen testi sonrası ortaya çıkan yüzey görüntüleri: (a) Genel görünüm ve (b) çatlak bölgesinin yakından görünümü

Farklı sıcaklık ve sürelerde tavlanan UİT yapıları çeliğinin sergilediği deformasyon davranışının örnek kalınlığına ve deformasyon şekline etkilerinin daha iyi anlaşılması amacıyla, seçilmiş şartlardaki örneklerin Erichsen testi sonrasındaki kesit resimleri Şekil 95’de gösterildi. Şekil 95(a)-(b) incelendiğinde, 450°C’de bir saat ve 600°C’de 11,5 dk süre ile tavllanmış Erichsen örneklerinin kesit boyunca homojen bir kalınlık dağılımı sergilemediği anlaşılmaktadır. Söz konusu tavlama şartlarında, örnek kalınlığının dar bir bölgede önemli oranda azalarak 0,5mm-0,6mm aralığına kadar düştüğü görülmektedir

(Şekil 95(a)-(b)). Buna karşın numunenin kalıba tutturulduğu flanşa yakın kısımlarda ise, deney öncesinde 0,9 mm olan örnek kalınlığında incelme gerçekleşmediği dikkati çekmektedir (Şekil 95(a)-(b)). Bu durum, söz konusu şartlardaki örneklerin Erichsen testindeki plastik deformasyonun lokalize bir şekilde gerçekleştiği fikrini doğrular niteliktedir. Nitekim örnekteki incelemenin sadece belirli bir bölgede gerçekleşmesi ve diğer kısımlarında deney öncesindeki kalınlığında bir değişim ortaya çıkmaması bu düşüncüyü işaret etmektedir. Tavlama sıcaklığı ve süresinin arttırılması durumunda ise, kesitteki kalınlık dağılımının daha homojen bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Nitekim 600°C’de 30 dk, süre ile tavlanan çeliğin zımba ile temas etmeyen kısmındaki kalınlığının 0,75 mm olduğu görülmektedir (Şekil 95(c)). Bu sıcaklık değerinde tavlama süresinin daha da arttırılması durumunda ise deney sonrasında ölçülen örnek kalınlığı çok belirgin olmayan bir azalma sergilemektedir. Nitekim 600°C’de 60 dk ve 120 dk süre ile tavlanan örneklerin Erichsen testi sonrasındaki kalınlıkları 0,7mm değerini almaktadır (Şekil 95(d)-(e)). Benzer durum tavlama sıcaklığının arttırılmasında da görülmektedir. 650°C’de bir saat süre ile tavlanan örneğin kalınlığı 0,65 mm değerine azalmaktadır (Şekil 95(f)). Ayrıca, bütün tavlama koşullarında numunenin zımba ile temas ettiği tepe bölgelerde ölçülen kalınlığın diğer bölgelere kıyasla daha yüksek olduğu da dikkati çekmektedir. Farklı rotalarda uygulanan işlem sonrasında da görülen bu tipik durum, söz konusu bölgedeki örnek-zımba temasının neden olduğu sürtünme etkileri nedeniyle ortaya çıkmaktadır (Şekil 95(a)-(f)).



Şekil 95. 8E şartındaki UİT yapıları örneklerin tavlanması sonrasında elde edilen kesit resimleri: (a) 450°C'de 60dk, 600°C'de (b) 11,5 dk, (c) 30 dk, (d) 60 dk, (e) 120 dk ve (f) 650°C'de 60 dk

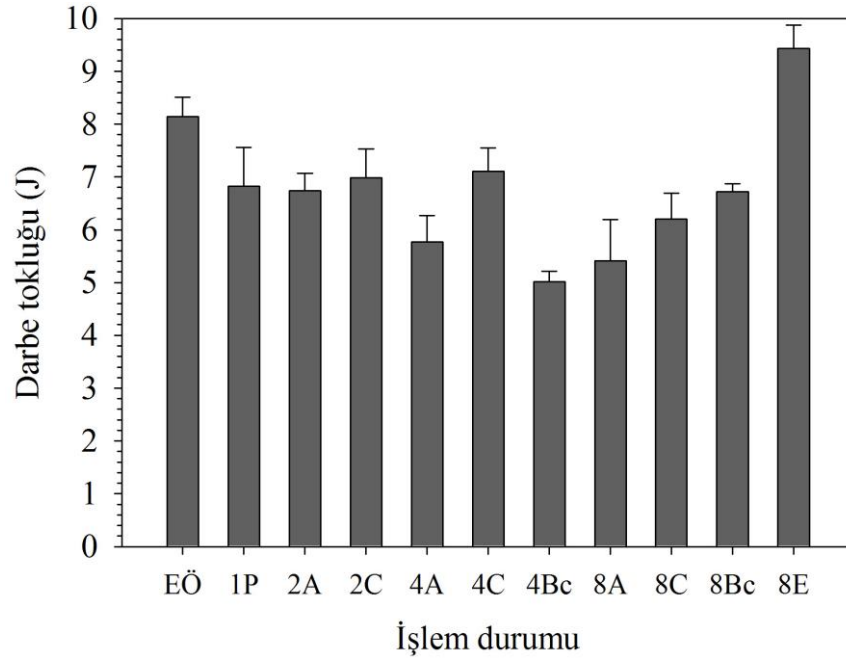
### 3.5. Tokluk ve Sünek-Gevrek Geçiş Davranışı

#### 3.5.1. Oda Sıcaklığındaki Çentik Darbe Tokluğu

EKAE işlemi öncesi iri tane yapılı ve EKAE işlemi sonrası UİT yapılı durumlardaki IF-çeliği örneklerinden oda sıcaklığında ölçülen çentik darbe tokluğu değerleri Tablo 12’de verilmiş, bu değerlerin işlem şartlarına göre değişimleri ise Şekil 96’da gösterilmiştir. Bu verilerden, EKAE öncesi 8,2 J olan darbe tokluğu değerinin, uygulanan bir pasoluk EKAE işlemi sonrası azalarak 6,8 J değerine düştüğü görülmektedir. Oda sıcaklığında elde edilen darbe tokluğu değerinin bir paso sonrası uygulanan işlem rotasına bağlı olarak değiştiği izlenmektedir. Nitekim, rota-A ve rota-C’de 2 paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen tokluk değerinde önemli bir değişim olmamaktadır. Şöyle ki, bu şartlarda elde edilen çentik darbe tokluğu değerleri sırasıyla 6,7 J ve 7,0 J olarak ölçülmüştür. Ancak rota-A’da uygulanan paso sayısı arttıkça tokluk değerinin de sürekli olarak azaldığı dikkati çekmektedir. Bu rotada uygulanan 4 ve 8 pasoluk EKAE işlem sonrası sırasıyla 5,8 J ve 5,4 J’lük darbe tokluğu değerleri elde edilmektedir. Rota-C’de uygulanan 4 pasoluk işlem sonrası ise yaklaşık 7,1 J’lük bir darbe tokluğu değeri elde edilmektedir. Bu değer bir paso sayısında ve rota-C’de 2 paso sayısında uygulanan işlem sonrasında elde edilen değerlere oldukça yakındır. Ancak paso sayısının 8’e çıkarılması durumunda ise, çentik darbe tokluğu azalarak 6,2 J değerini almaktadır. Öte yandan, rota-Bc’de 4 paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrasında ise çentik darbe tokluğunun önemli oranda azalarak 5,0 J değerine düştüğü görülmektedir. Paso sayısının 8’e çıkarılması durumunda ise bu değer bir miktar artarak 6,7 J değerini almaktadır. Genel olarak bakıldığında, rota-A, rota-C ve rota-Bc’de uygulanan EKAE işlemleri sonrasında elde edilen çentik darbe tokluğu değerlerinin EKAE öncesi duruma göre azaldığı söylenebilir. Ancak, rota-E’de 8 paso sayısında (8E) uygulanan EKAE işlemi sonrası ise farklı bir durum göstermektedir. Söz konusu işlem şartlarında elde edilen UİT yapılı örneklerde, işlem öncesi iri taneli durma göre daha yüksek bir çentik darbe tokluğu elde edilmiştir. Nitekim EKAE öncesi durumda 7,9 J olarak ölçülen tokluk değeri 8E sonrası 9,4 J’e yükselmiştir (Tablo 12).

Tablo 12. IF-çeliğine farklı rota ve paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen çentik darbe tokluğu değerleri

İşlem durumu		Darbe tokluğu (J)
EKAE rotası	Paso sayısı	
-	0	8,2±0,4
-	1	6,8±0,7
Rota-A	2	6,7±0,3
	4	5,8±0,5
	8	5,4±0,8
Rota-C	2	7,0±0,6
	4	7,1±0,4
	8	6,2±0,5
Rota-Bc	4	5,0±0,2
	8	6,7±0,1
Rota-E	8	9,4±0,4



Şekil 96. Farklı rota ve paso sayısında uygulanan EKAE işleminin IF-çeliğinin çentik darbe tokluğuna etkisini gösteren diyagram

### 3.5.2. Oda Sıcaklığındaki Kırılma Davranışı

EKAE rotası ve paso sayısının IF-çeliğinin oda sıcaklığındaki darbe tokluğuna olan etkisinin daha iyi anlaşılması için çentik darbe deneyine tabi tutulan örneklerin yüzeyleri SEM yardımıyla incelendi ve elde edilen seçilmiş yüzey görüntüleri Şekil 97-102'de gösterildi. Şekil 97 (a)'da görüldüğü gibi, EKAE öncesi durumdaki iri taneli çelik örneği

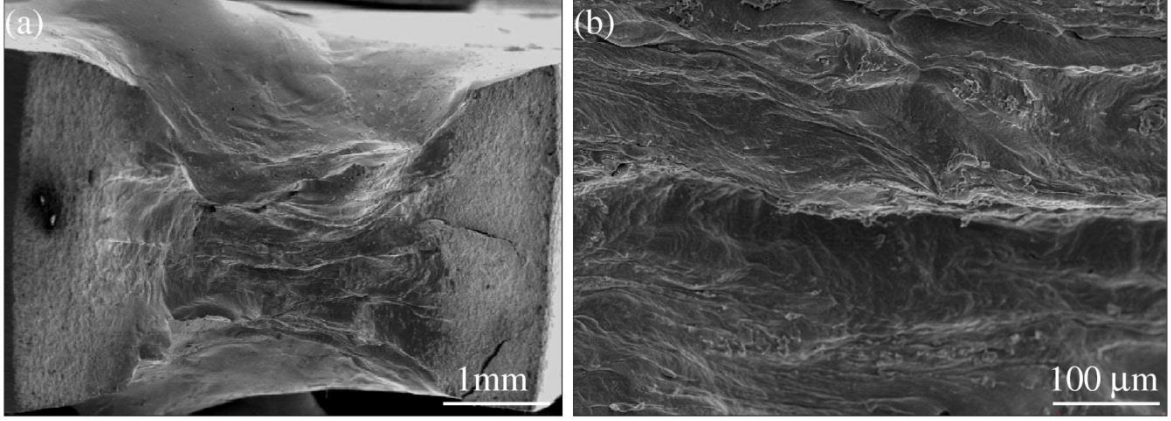
kırılma sırasında önemli oranda plastik deformasyona uğramaktadır. Bu durumu, deney sonrasında örneğin çentik bölgesinde gözlenen aşırı büzülme etkisi de doğrulamaktadır. Bu etki altında çentik bölgesinde herhangi bir yırtılmanın olmaması da dikkat çekmektedir (Şekil 97(b)). Bu durum, söz konusu malzemenin EKAE işlemi öncesinde sahip olduğu yüksek süneklik özelliği dikkate alındığında normal bir oluşum olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, içyapıda çentik hassasiyeti oluşturabilecek herhangi bir yapısal oluşumun bulunmaması da bu duruma katkıda bulunmaktadır.

Uygulanan çok pasolu EKAE işlemi IF-çeliğinin darbe altındaki kırılma davranışı üzerinde önemli etkiye göstermektedir. Genel olarak bütün örneklerin kırılma yüzeylerinde darbe altında bir yırtılmanın oluştuğu gözlenmektedir. Bu etkinin içyapıda oluşan yüksek dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak çentik hassasiyetinin artması ve genelde malzemenin süneklik özelliklerinin olumsuz etkilenmesinden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Bu durum kırılma yüzeyi fotoğraflarından da açıkça görülmektedir. Bir paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrası oluşan yırtılma bölgesinde genelde lifli bir yapının oluştuğu ve bu bölgenin yan yüzeylerinde ise önemli oranda büzülme etkisinin görüldüğü söylenebilir (Şekil 98). 8A şartlarındaki örneklere uygulanan çentik darbe deneyi sırasında çatlak ilerlemesinin genel olarak darbe yüklemesi yönünde geliştiği, ancak örneğin boyuna doğrultusunda da derin yarıkların meydana geldiği dikkat çekmektedir. Örnekte boyuna oluşan yarıklar çentik dibine yakın bölgelerde derin, çentik dibinden uzaklaştıkça daha sığ olarak ortaya çıkmaktadır (Şekil 99(a)). Bu durum söz konusu yarıkların çentik dibinde başladığını ve darbe deneyi sırasında örnek boyunca ilerlediğini göstermektedir. Ayrıca, örneklerinin EKAE işlemine tabi tutulan numunelerden çıkarılış konumları göz önünde bulundurulduğunda, yarıkların ilerleme yönünün ekstrüzyon doğrultusu ile büyük oranda çakıştığı da dikkati çekmektedir (Şekil 14). Öte yandan, ilgili TEM resimlerinden anlaşılacağı gibi rota-A'da uygulanan çok pasolu işlem sonrası tanelerin ekstrüzyon doğrultusunda yönlenecek uzadıkları söylenebilir. Bu nedenle, söz konusu yarıkların özellikle 8 paso sonrası ekstrüzyon doğrultusu boyunca yönlendirilmiş tane sınırlarında geliştiği anlaşılmaktadır.

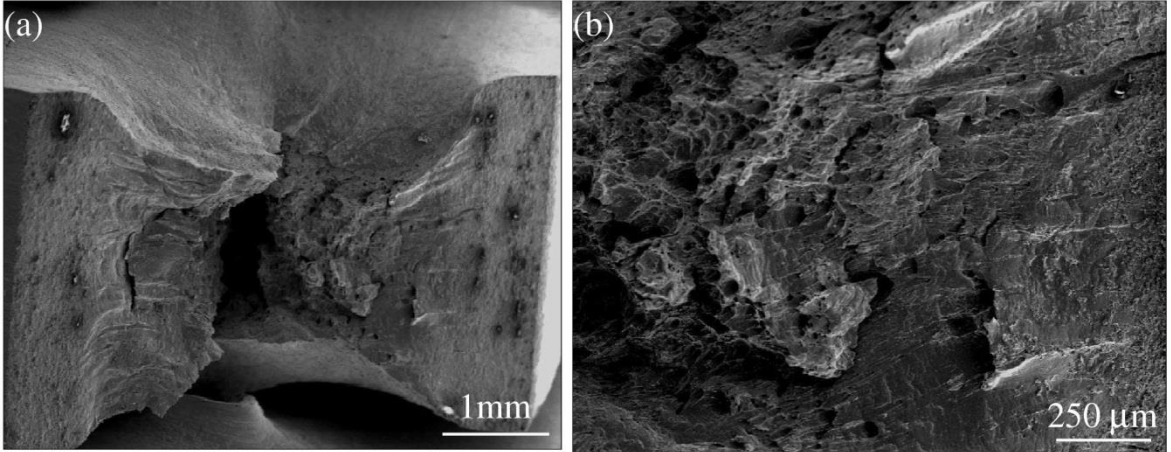
8C, 8Bc ve 8E şartlarındaki örneklere uygulanan çentik darbe deneyleri sonrası örnek kırılma yüzeylerinden elde edilen SEM resimleri sırasıyla Şekil 99-102'de gösterilmiştir. Bu şekillerde verilen resimlere genel olarak bakıldığında, kırılma yüzeylerinin büyük oranda birbirlerine benzediği ve “timsah ağzı” benzeri bir kırılma şekli sergiledikleri görülmektedir. Kırılma yüzeylerinin ise lifli ve mat bir görünüm sergilediği



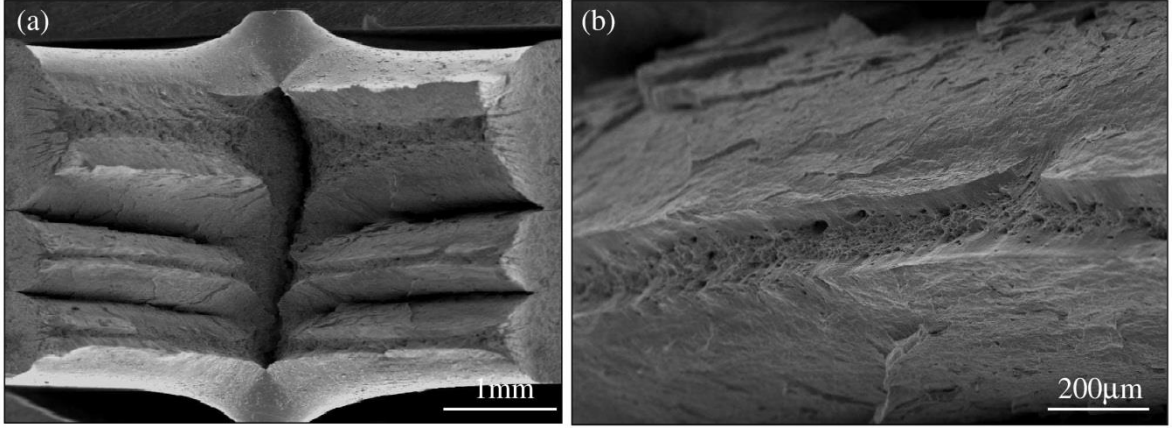
ve yırtılma yüzeylerinde yönlenmiş çukurcukların oluştuğu dikkati çekmektedir. Ayrıca, yırtılma bölgesinin yan yüzeylerinde ise önemli bir büzülme etkisinin oluşmadığı da söylenebilir.



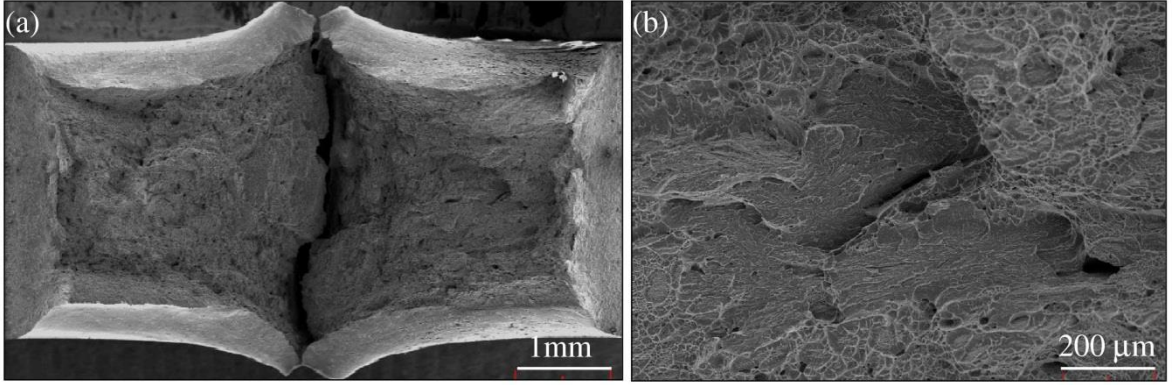
Şekil 97.EKAE öncesi durumdaki iri taneli IF-çeliği örneklerin çentik darbe deneyi sonrasında ortaya çıkan kırılma yüzeylerine ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) deformasyon bölgesinin yakından görünümü



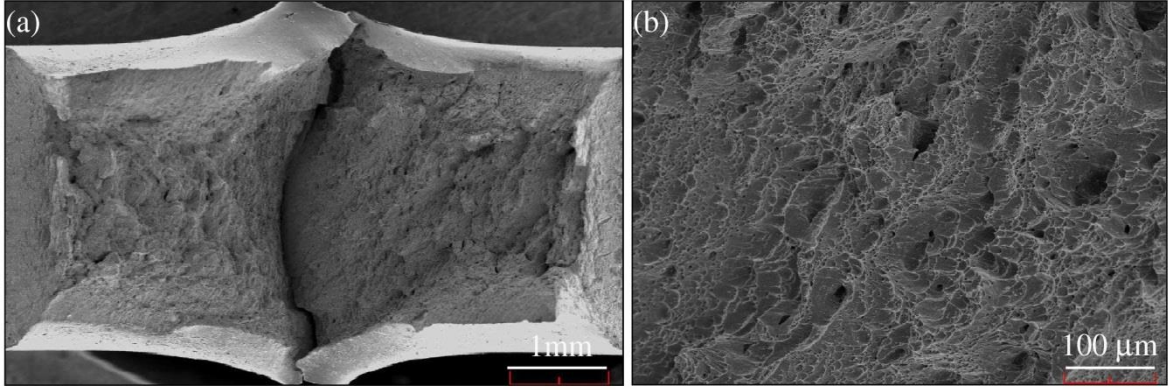
Şekil 98. Bir pasoluk EKAE işlemi uygulanmış çentik darbe örneklerinin kırılma yüzeylerine ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) kırılma yüzeyinin yakından görünümü



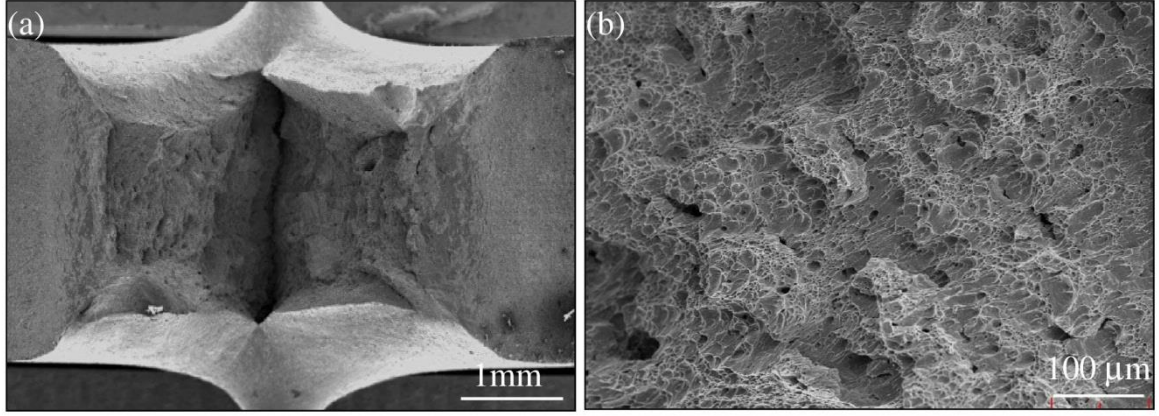
Şekil 99. 8A şartlarındaki çentik darbe örneklerinin kırılma yüzeylerine ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) kırılma doğrultusuna dik yırtıkların yakından görünümü



Şekil 100. 8C şartlarındaki çentik darbe örneklerinin kırılma yüzeylerine ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) kırılma yüzeyinin yüksek büyültmedeki görünümü



Şekil 101. 8Bc şartlarındaki çentik darbe örneklerinin kırılma yüzeylerine SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) kırılma yüzeyinin yakından görünümü

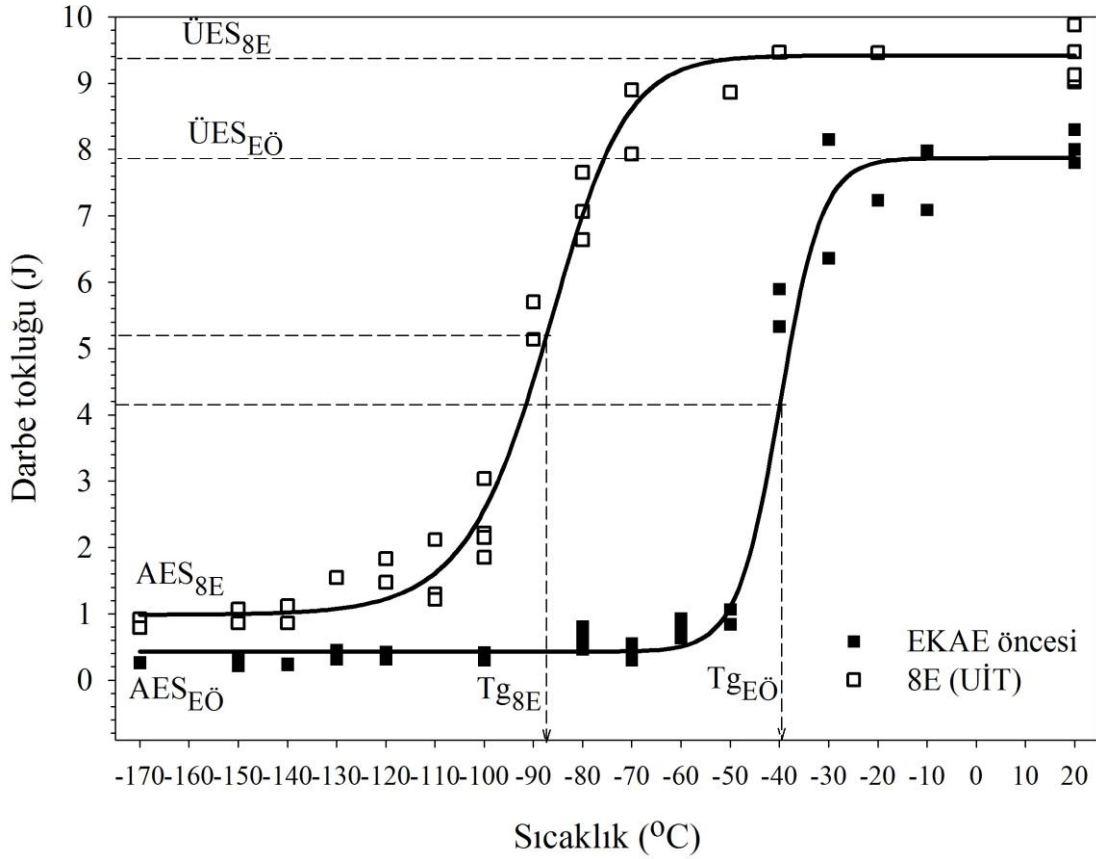


Şekil 102. 8E şartlarındaki çentik darbe örneklerinin kırılma yüzeylerine ait SEM resimleri: (a) Genel görünüm ve (b) kırılma yüzeyinin yakından görünümü

### 3.5.3. Sünek-Gevrek Geçiş Davranışı

EKAE öncesi iri taneli ve rota-E'de 8 pasoluk uygulanmış (8E) ÜİT yapılı IF-çeliğinin sünek-gevrek geçiş davranışını gösteren eğriler Şekil 103'de verilmiştir. Ayrıca, bu eğrilerden elde edilen alt enerji seviyesi (AES), üst enerji seviyesi (ÜES) ve sünek gevrek geçiş sıcaklığı (Tg) gibi büyüklükler ise Tablo 13'de verilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, 8E şartlarında uygulanan EKAE işlemi sonrası malzemenin üst ve alt enerji seviyeleri yükselmekte ve sünek-gevrek geçiş sıcaklığı ise sola doğru kayarak önemli oranda azalmaktadır. Ayrıca, sünek-gevrek geçiş bölgesinin de uygulanan EKAE işlemi sonrasında belli oranda genişlediği ve iri taneli yapıya kıyasla daha yavaş bir geçişin gerçekleştiği söylenebilir. EKAE öncesi durumdaki iri taneli IF-çeliğinin oda sıcaklığında sahip olduğu 7,9 J'lük darbe tokluğunun ancak -30°C sıcaklığa kadar geçerli olduğu ve bu

sıcaklığın altına söz konusu değerin çok hızlı bir şekilde azalarak  $-50^{\circ}\text{C}$  sıcaklık değerinde ise alt enerji seviyesine indiği Şekil 103'den açıkça görülmektedir. Bu sıcaklık değerinin altında ise artık darbe tokluğu değerinin değişmediği ve gevrek kırılma durumunun geçerli olduğu anlaşılmaktadır. Uygulanan çok pasolu EKAE işleminin IF-çeliğinin sünek-gevrek geçiş davranışını önemli oranda değiştirdiği görülmektedir (Şekil 103 ve Tablo 13). Şöyle ki, UİT yapıları çelik oda sıcaklığında sahip olduğu  $9,4 \text{ J}$ 'lük darbe tokluğu değerini yaklaşık  $-50^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar korumaktadır. Bu sıcaklığın altında ise darbe tokluğu azalmakta ve bu azalma  $-120^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar devam etmektedir. Dolayısıyla UİT yapıları çeliğinin sünek-gevrek geçişi  $70^{\circ}\text{C}$  gibi çok daha geniş bir sıcaklık aralığında tamamlanmaktadır. Geçiş sıcaklığının sonunda sahip olunan darbe tokluğu değeri ise yaklaşık  $0,9 \text{ J}$  mertebelerindedir (Tablo 13). Sünek-gevrek geçiş sıcaklıkları dikkate alındığında ise, iri taneli çeliğinin  $-40^{\circ}\text{C}$  olan geçiş sıcaklığı, 8E şartlarında uygulanan işlem sonrasında önemli ölçüde azalarak yaklaşık  $-90^{\circ}\text{C}$ 'ye düşmektedir. Buna göre, rota-E'de uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi çeliğinin geçiş sıcaklığında yaklaşık  $50^{\circ}\text{C}$ 'lik bir azalmaya neden olmaktadır. Öte yandan UİT yapıları çeliğinin üst ve alt enerji seviyelerinin de iri tane yapıları çeliğe göre daha yüksek olduğu söylenebilir. Nitekim  $7,9 \text{ J}$  ve  $0,5 \text{ J}$  olan üst ve alt enerji seviyesi değerleri EKAE 8E şartlarında uygulanan EKAE işlemi sonrası sırasıyla  $9,4 \text{ J}$  ve  $0,9 \text{ J}$  değerlerine yükselmektedir.



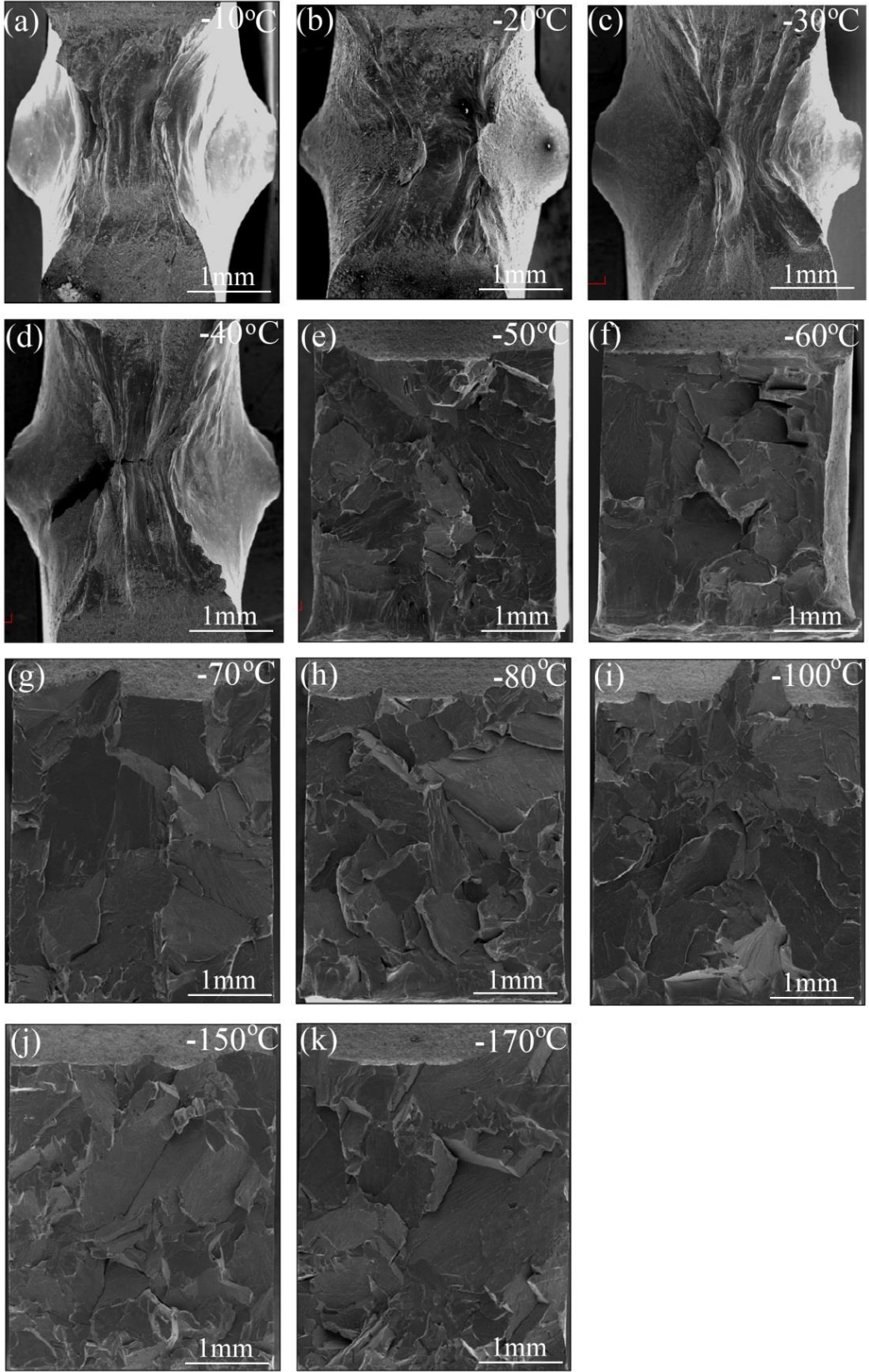
Şekil 103. EKAЕ öncesi iri tane yapı ve 8E şartlarında uygulanan EKAЕ işlemi sonrası UİT yapılı IF-çeliğin sergilediği sünek-gevrek geçiş eğrileri

Tablo 13. EKAЕ öncesi iri tane yapı ve 8E şartlarında uygulanan EKAЕ işlemi sonrası UİT yapılı IF-çeliğin sünek-gevrek geçiş davranışına ait bazı değerler

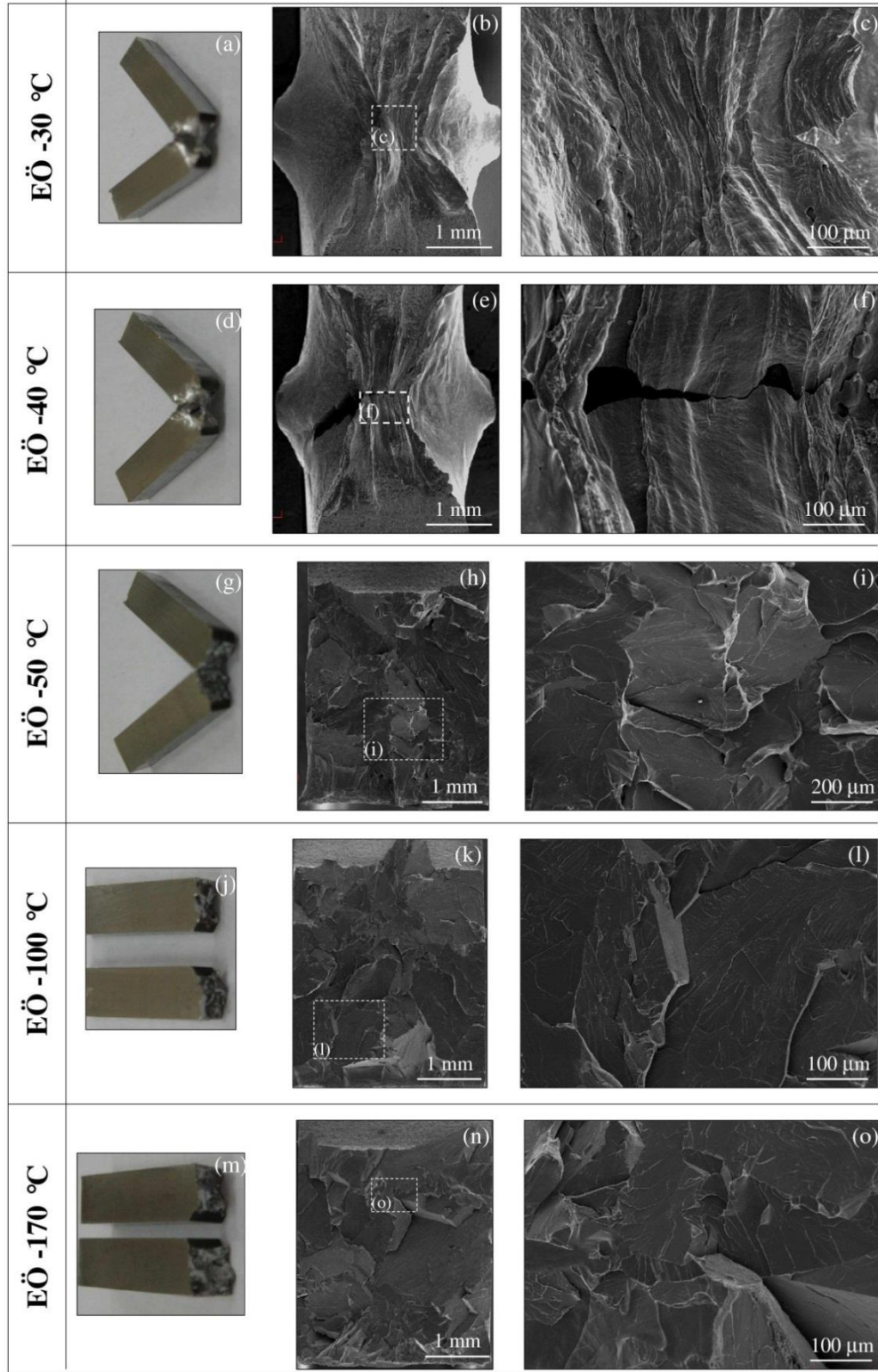
İşlem durumu	Üst enerji seviyesi (J)	Alt enerji seviyesi (J)	Sünek-gevrek geçiş sıcaklığı (Tg) (°C)	Sünek-gevrek geçiş aralığı (°C)
EKAЕ öncesi (EÖ)	8,2	0,5	-90	20
8E (UİT yapılı)	9,4	0,9	-40	50

EKAЕ öncesi durumdaki iri taneli IF-çeliğinden üretilen ve farklı sıcaklıklarda çentik darbe deneyine tabi tutulan örneklerin kırılma yüzeylerini gösteren düşük büyültmeli SEM resimleri Şekil 104’de gösterilmiştir. Ayrıca, sünek-gevrek geçiş eğrisinin sünek kırılma bölgesi (üst enerji bölgesi), sünek-gevrek geçiş bölgesi ve alt enerji bölgesine karşılık gelecek örneklerin kırılma yüzeyleri ise Şekil 105’de verilmiştir. Bu resimlerden, iri taneli çelik örneklerde sünek kırılmanın görüldüğü -30°C deney sıcaklığında önemli oranda plastik deformasyonun meydana geldiği görülmektedir (Şekil

104(a)-(c)). Nitekim, bu sıcaklıklarda gerçekleştirilen deneyler sonrasında çentik darbe örneklerinin kesitlerinde eğilmeye bağlı olarak büyük oranda büzülme gözlenmektedir (Şekil 104(a)). Ancak bu bölgede darbe örneklerinin kırılma yüzeylerinde önemli bir yırtılma etkisi oluşmamaktadır. Bu durum, söz konusu şartlarda gözlenen kırılma davranışının oda sıcaklığında gerçekleştirilen deney sonrası elde edilen kırılma davranışına (Şekil 97) benzediğini göstermektedir. Sünek-gevrek geçiş sıcaklığı olan  $-40^{\circ}\text{C}$  'de gerçekleştirilen deney sonrası ise örneğin kırılma yüzeyinde hem sünek hem de gevrek kırılma izlerinin mevcut olduğu dikkati çekmektedir. Nitekim söz konusu örnek hem önemli miktarda plastik deformasyon sonrası eğilerek kesit büzülmesine uğramış, hem de bu deformasyon sırasında örnekte çatlaklar oluşmuştur (Şekil 104(d)). Bu sıcaklıkta gerçekleştirilen darbe deneyi sonrası örneğin kırılmış olması bu sonucu doğrulamaktadır (Şekil 105(d)-(f)). Alt enerji bölgesinde ( $-50^{\circ}\text{C}$  ile  $-170^{\circ}\text{C}$  aralığı) ise artık tamamen gevrek kırılmanın hakim olduğu ve kırılmanın büyük oranda klivaj kırılma şeklinde gerçekleştiği ilgili SEM resimlerinden açıkça görülmektedir (Şekil 104(e)-(k)). Nitekim söz konusu örnekler belirgin bir plastik deformasyon ve/veya kesit büzülmesi göstermeden iki parçaya ayrılmaktadır. Bu etki alt enerji bölgesinde gerçekleştirilen bütün deneyler sonrası izlenmektedir. Söz konusu yüzeyler yakından incelendiğine, bu bölgede bütün kırılma yüzeyi boyunca karakteristik türden klivaj kırılma morfolojisinin yüzeye hakim olduğu görülmektedir (Şekil 105(g)-(o)).



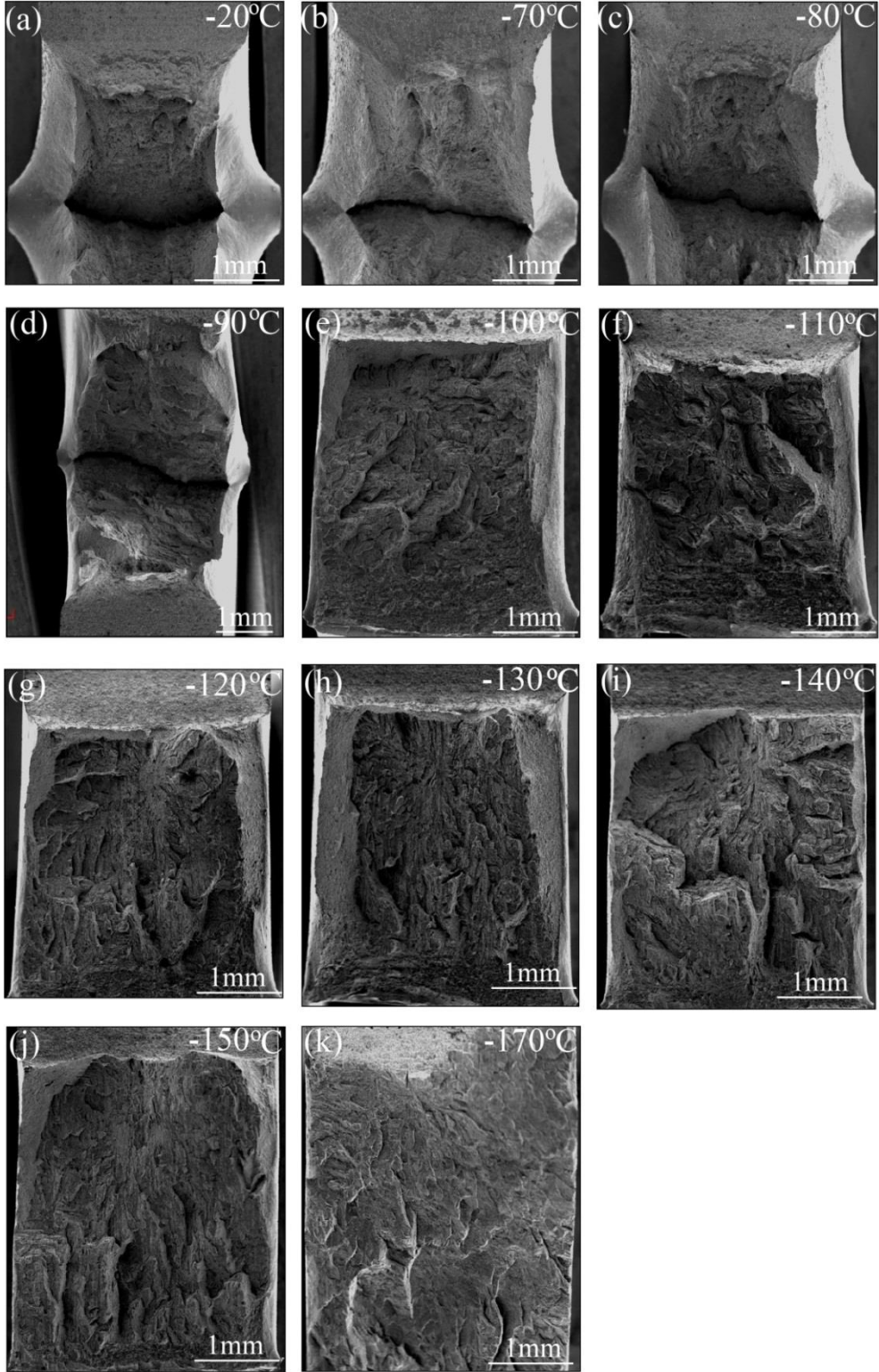
Şekil 104. EKAÖ öncesi durumdaki iri taneli IF-çeliği örneklerinin  $-10^{\circ}\text{C}$  ile  $-170^{\circ}\text{C}$  arasındaki farklı sıcaklıklarda çentik darbe deneyi sonrası kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri



Şekil 105. EKAЕ öncesi durumdaki iri taneli IF-çeliği örneklerinin sünek-gevrek geçiş eğrisinin farklı noktalarına karşılık gelen sıcaklıklarda gerçekleştirilen çentik darbe deneyi sonrası ortaya çıkan kırılma yüzeyine ait SEM görüntüleri: (a)-(c) -30°C, (b)-(f) -40°C), (g)-(i) -50°C, (j)-(l) -100°C ve (m)-(o)-170°C

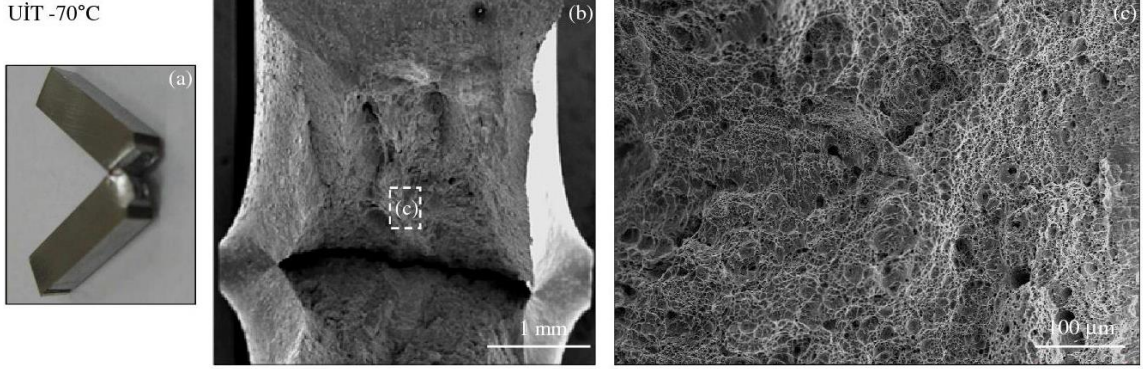


Rota-E’de 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası elde edilen UİT yapıları örneklerin farklı çentik-darbe deneyi sıcaklıklarında elde edilen kırılma yüzeylerine ait seçilmiş SEM resimleri Şekil 106’da gösterilmiştir. Söz konusu resimler incelendiğinde, üst enerji bölgesinde gözlenen kırılmanın oda sıcaklığındakine benzer bir davranış sergilediği gözlenmektedir. Nitekim, bu aralıkta ( $-80^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar) örneklerde yırtılma şeklinde bir çatlak ilerlemesinin olduğu, ancak söz konusu örneğin tamamen kırılarak iki parçaya ayrılmadığı söylenebilir (Şekil 106). Bu bölgenin tamamında, oda sıcaklığında olduğu gibi yine “timsah ağzı” benzeri bir yırtılmanın olduğu ve büzülmenin etkili olduğu da dikkati çekmektedir. Ayrıca kırılma yüzeyleri daha yakından incelendiğinde, bu yüzeylerde sünek kırılma davranışını karakterize eden lifli ve mat bir görünüşün olduğu ve yapıya çukurcukların hakim olduğu izlenmektedir (Şekil 106(a)-(c) ve Şekil 107). Sünek-gevrek geçiş sıcaklığına yakın sıcaklıklarda gerçekleştirilen çentik darbe testleri sonrasında ise örneklerde kesit daralmasının sınırlı oranda ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 106(c)-(d)). Nitekim,  $-90^{\circ}\text{C}$ ’de uygulanan çentik darbe deneyi sonrasında örneklerin kırılma yüzeylerinde hem sünek hem de gevrek kırılma etkileri gözlenmektedir (Şekil 108). Şöyle ki, kırılma yüzeyinde çatlağın yön değiştirmesine bağlı olarak meydana gelen basamaklı yapı ve bu yapıdaki dikine ve enine çatlak ilerleme bölgeleri sünek ve gevrek türden karışık bir kırılmanın oluştuğunu göstermektedir (Şekil 108). Bu oluşumda dikine basamak oluşum bölgelerindeki çukurcuklar büyük oranda sünek kırılma davranışını karakterize ederken, enine ilerleme bölgeleri ise nispeten daha gevrek türden kırılmayı göstermektedir (Şekil 108(c)). Geçiş sıcaklık bölgesinin sonunda ise daha çok gevrek kırılmanın hakim olduğu bir davranışın ortaya çıktığı, ancak hala kırılma yüzeyinde çukurcuk oluşumu şeklinde sünek türden kırılma izlerinin de mevcut olduğu görülmektedir (Şekil 106(e)-(k)). Bu bölgede, iri taneli IF-çeliğinde gözlenen klivaj türden bir kırılma yüzeyi tam olarak ortaya çıkmamaktadır. Bunun yerine, çatlağın ilerlemesi sırasında yön değiştirmesine dayalı olarak gelişen basamaklı türden bir kırılma davranışı ortaya çıkmaktadır (Şekil 109-110). Bu etki enerji değerlerindeki hızlı düşüşü yavaşlatmakta ve bu sayede iri taneli yapıya göre tokluğun artmasına neden olmaktadır (Şekil 109-110). Bu durum sıcaklık azaldıkça etkisini kaybetse bile, en düşük deney sıcaklığı olan  $-170^{\circ}\text{C}$ ’de gerçekleştirilen darbe deneyi sonrası kırılma yüzeyinde az da olsa hala basamaklı türden bir kırılmanın oluşması bu sonucu doğrulamaktadır (Şekil 111).



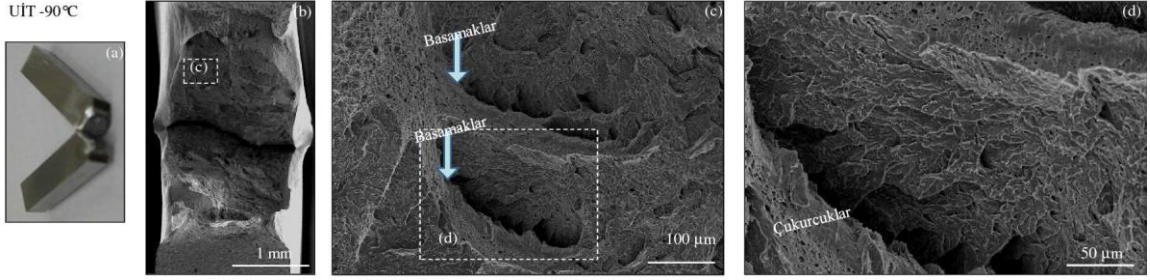
Şekil 106. Rota-E’de 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası UİT yapılı hale getirilen IF-çeliği örneklerinin  $-20^{\circ}\text{C}$  ile  $-170^{\circ}\text{C}$  arasındaki sıcaklıklarda çentik darbe deneyine tabi tutulması sonrası elde edilen kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri

UIT -70°C

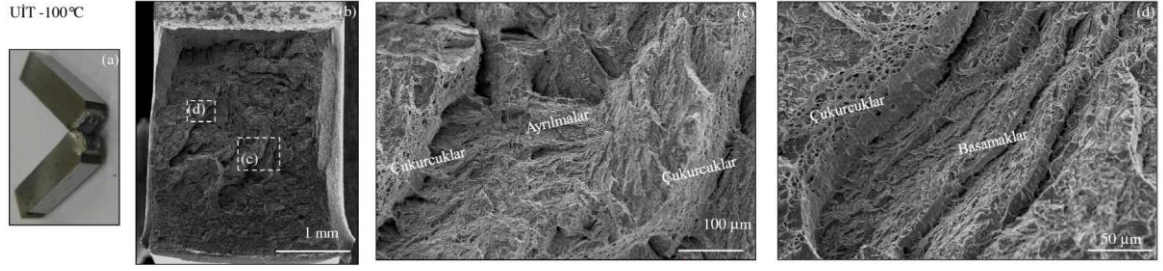


Şekil 107. 8E şartlarında UIT yapıya getirilen çelik örneğin -70°C sıcaklıkta yapılan çentik darbe deneyi sonrası ortaya çıkan kırılma yüzeyine ait detay resimleri

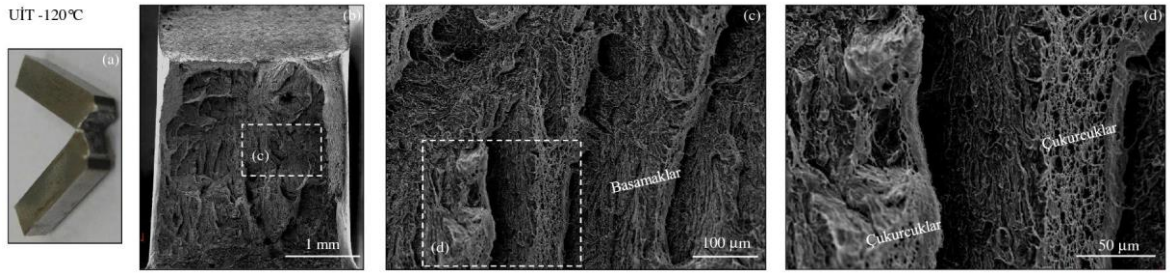
UIT -90°C



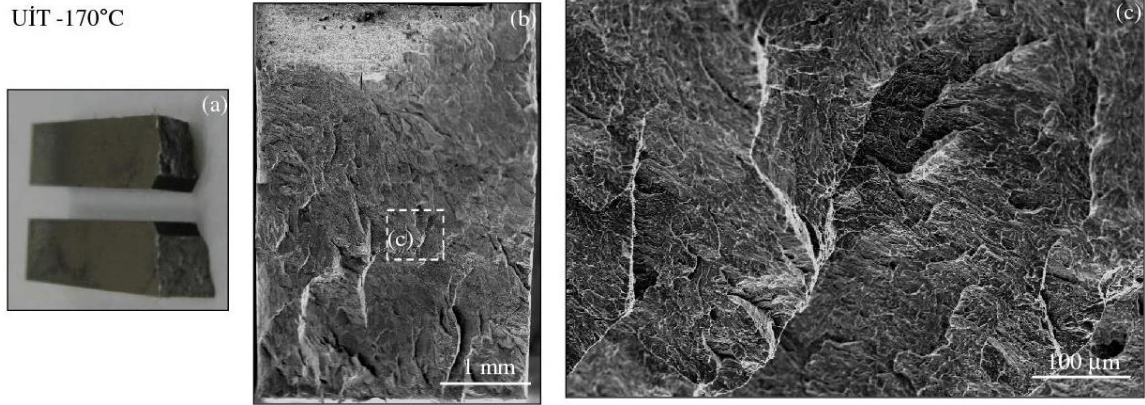
Şekil 108. 8E şartlarında UIT yapıya getirilen çelik örneğin -90°C sıcaklıkta yapılan çentik darbe deneyi sonrası ortaya çıkan kırılma yüzeyine ait detay resimleri



Şekil 109. 8E şartlarında UIT yapılı hale getirilen çelik örneğin -100°C sıcaklıkta yapılan çentik darbe deneyi sonrası ortaya çıkan kırılma yüzeyine ait detay resimleri



Şekil 110. 8E şartlarında UIT yapılı hale getirilen çelik örneğin -120°C sıcaklıkta yapılan çentik darbe deneyi sonrası ortaya çıkan kırılma yüzeyine ait detay resimleri



Şekil 111. 8E şartlarında UIT yapılı hale getirilen çelik örneğin -170°C sıcaklıkta yapılan çentik darbe deneyi sonrası ortaya çıkan kırılma yüzeyine ait detay resimleri

## 4. İRDELEME

### 4.1. İçyapı

Kütlesel formdaki IF-çeliğine uygulanan EKAE işlemi, IF-çeliğinin başlangıçta iri taneli olan içyapısını önemli oranda incelerken mikron altı mertebelerde tane boyutuna sahip UİT yapısının oluşmasına neden oldu. Uygulanan EKAE işlemi sonrası içyapıda gözlenen bu incelme, deformasyona dayalı alt tane oluşumu mekanizmasıyla açıklanabilir. Şöyle ki, bir paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sırasında numune deformasyon düzleminden geçerken, basit kayma ile plastik deformasyona uğramaktadır. Bu deformasyon sırasında taneler kayma doğrultusunda yönlendirilirken, tane içi bölgelerde dislokasyon yoğunluğu önemli oranda artmaktadır [125]. İçyapıdaki dislokasyon yoğunluğundaki artışın yanında, yapıda depolanmış durumdaki dislokasyonlar poliganize olarak alt tane sınırlarını oluşturmaktadır. Bu oluşum, tane içindeki dislokasyon yığınlarının yeniden organize edilmesine neden olduğu için hem iç enerjinin azalmasına hem de tane içindeki enerji dengesizliğinin ortadan kalkmasına katkı sağlamaktadır. Şekil 17'de verilen TEM resimlerinde içyapıda biriktirilen dislokasyonlar ve dislokasyonlar tarafında oluşturulan alt tanelerin oluşturduğu bantlaşmış bir yapı ortaya çıktığı görülmektedir. Şekil 17(d)'de verilen difraksiyon deseni ise, bir paso sonrasında elde edilen bantlaşmış yapıdaki dislokasyon sınırlarının daha çok DATS karakterinde olduğunu göstermektedir [42, 61]. Nitekim söz konusu yapıdan elde edilen difraksiyon desenleri daha çok nokta biçiminde ortaya çıkmakta ve önemli bir yayılım göstermemektedir [38, 126, 127]. Yapıda oluşturulan DATS, tane incelme mekanizmasının da başlangıç evresini oluşturmaktadır [41, 125]. Deformasyon oranının artırılması durumunda alt tane sınırları arasındaki açısız yönelim farkı artarak yapıdaki DATS'larının GATS'larına dönüşümü gerçekleşmektedir. Bu dönüşüm alt tanelere bölünmüş durumdaki tane içi bölgeler arasındaki açısız yönelimin artması ile ortaya çıkmaktadır [42]. Bu artış, alt tanelerdeki kayma sistemleri arasındaki yönelim farklılıklarından kaynaklanmaktadır [39, 41, 42, 61, 125, 128, 129]. Alt tane sınırlarının açısız yönelim farkında görülen değişim, 4 paso ve özellikle 8 paso sonrası içyapıyı gösteren TEM resimlerinden de açıkça gözükmemektedir (Şekil 20-26). Ayrıca TEM resimleriyle birlikte verilen ve difraksiyon desenlerini gösteren şekilleri de bu düşüncüyü desteklemektedir. Şöyle ki, bir ve iki pasoluk EKAE işlemi

sonrası (Şekil 20(d)-26(d)) nokta biçiminde ortaya çıkan difraksiyon desenleri, paso sayısı arttıkça (4 ve 8 pasolar) değişmekte ve yörünge boyunca yayılmış halkasal desenlere dönüşmektedir. Bu tipteki difraksiyon desenleri daha çok geniş açılı tane sınırına sahip yapılardan elde edilmektedir [130]. Ayrıca, difraksiyon desenleri ve yüksek büyültmelerde verilen TEM resimleri yakından incelendiğinde, artan deformasyon oranı ile deforme olmuş yapıdaki iç enerjinin de giderek arttığı dikkati çekmektedir. Bu durum, yüksek büyültmeli TEM resimlerinde tane sınırlarında gözlenen katlanma tipi yapılanmadan (Şekil 20(c)-26(c)) da belli olmaktadır [103, 112]. Ayrıca, difraksiyon desenlerinde artan paso sayısı ile görülen genişleme ve düzensizlik de bunu düşünceyi doğrulamaktadır (Şekil 20(d)-26(d)) [126, 127].

EKAE rotası, işlem sonrasında elde edilen tane boyutu (Tablo 5) ve tane morfolojisi (Şekil 23-26) ve kristalografik yönelim (Şekil 36-39) üzerinde etkili olmaktadır. Rota-A'da uygulanan EKAE işlemi, sırasında numunenin döndürülmeden EKAE işlemine tabi tutulması tanelerin yönelerek uzamasına ve tanelerin en boy oranlarının artmasına neden olmaktadır. Bu durum içyapısal özelliklerin yöne bağımlı olmasını da beraberinde getirmektedir [21, 37, 131] (Şekil 23). Nitekim sözü edilen rota ile elde edilen UİT yapılı çelik keskin karakterde bir kristalografik yönelim sergilemektedir (Şekil 36). Rota-C'de ise uygulanan işlem sırasında numune pasolar arasında  $180^\circ$  döndürülerek kayma deformasyonunun önceki paso sayısında uygulanan ile ters yönlü olması sağlanmaktadır [21, 37, 131]. Bu durum bir taraftan tanelerin eş eksenli morfolojide olmasını sağlarken, bir taraftan da tane incelleme mekanizmasının diğer rotalara göre yavaş işlemesine neden olmaktadır [21, 37, 131]. Bu nedenle, söz konusu rotası ile üretilen UİT yapılı IF-çeliğinin içyapısındaki tanelerin daha iri boyutlu, GATS oranı ise daha düşük olmasını sağlamaktadır (Şekil 24). Nitekim ilgili işlem şartlarında elde edilen difraksiyon desenlerinin daha çok nokta biçiminde oluşmuş olması bu düşünceyi desteklemektedir (Şekil 24(d)). Ayrıca söz konusu rotada elde edilen kristalografik yönelim de diğer rotalara kıyasla daha düşük şiddette ortaya çıkmaktadır (Şekil 37). Rota-Bc'de uygulanan işlem sonrasında ise, numunenin takip eden pasolar arasında  $90^\circ$  döndürülmesi, kayma deformasyonunun numuneye etki ettiği düzlemin de devamlı olarak değişmesine neden olduğu için tane incelleme mekanizması daha etkin bir şekilde çalışmaktadır [131, 132]. Bu durum söz konu işlem şartlarında elde edilen tane yapısının diğer rotalara göre daha ince taneli olmasını ve yapıdaki tane sınırlarının daha çok GATS karakterinde olmasını sağlamaktadır (Şekil 25) [132, 133]. Rota-E, rota-Bc ve rota-C'nin birleştirilmesi ile

geliştirilen hibrit bir işlem rotası olduğundan her iki rotada elde edilen karakteristik özellikleri yansıtmaktadır. Nitekim sözü edilen işlem rotası sonrasında elde edilen eş eksenli tane morfolojisi açısından rota-C ile, tane incelleme mekanizmasının etkin olarak gerçekleşmesi ve yapıdaki baskın tane sınır karakteristiğinin GATS tipinde olması açısından da rota-Bc ile benzerlikler sergilemektedir (Şekil 26) [111]. Ayrıca, sözü edilen işlem rotasında elde edilen kristalografik yönelimde oluşan bileşenler, hem rota-C hem de rota-Bc'de elde edilen bileşeler ile de benzerlikler sergilemektedir (Şekil 39). Bu durum söz konusu işlem rotasında numunenin  $180^\circ$  ve  $90^\circ$  döndürülmesini içermesinden kaynaklanmış olabilir.

Sac formdaki IF-çeliğine uygulanan EKASE işlemi sonrasında da içyapıdaki dislokasyon yoğunluğunu önemli oranda arttığı görülmektedir (Şekil 27-29). Öte yandan, elde edilen içyapıdaki dislokasyonların büyük oranda poliganize olarak alt tane sınırlarını oluşturduğu ilgili resimlerden anlaşılmaktadır (Şekil 27-29). Ancak, farklı rota ve paso sayılarında uygulanan EKASE işleminin yapıdaki tane sınırları arasındaki yönelimde önemli bir değişime neden olmadığı da görülmüştür (Şekil 27-29). Bu tespitler, sac formdaki malzemeye uygulanan işleminin kütsel durumdaki kadar etkin bir tane incelemesine neden olmadığını göstermektedir. Bu durumun iki temel nedene dayandırılarak açıklanabilir [6]:

- i. Gerek EKAE ve gerekse EKASE işlemleri sırasında kalıp ve numune yüzeyleri arasında oluşan büyük oranlardaki sürtünme etkileri uygulanan deformasyonun numune kalınlığı boyunca homojen dağılmamasını belli oranda engellemektedir. Başka bir deyişle, sac numunelerin yüzey ve yüzeye yakın kısımları ile sürtünmeden etkilenmemiş kısımları arasında deformasyon miktarı arasında farklar oluşmaktadır. Sac numunelerin yüzey alanının daha geniş, kalınlıklarının ise ince olması nedeniyle, sürtünme etkileri EKASE işlemi sırasında daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmakta ve tane incelleme mekanizmasını olumsuz etkilemektedir. Nitekim EKASE uygulanmış sacların kesitleri boyunca alınan kutup şekillerinde (Şekil 30-31), sacın orta bölgelerinde elde edilen kristalografik yönelim, bir paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen kristalografik yönelimle büyük benzerlik sergilemektedir (Şekil 34). Bu durum sac numunenin orta bölgelerinde kayma deformasyonunun etkin bir şekilde gerçekleştiğine işaret etmektedir. Öte yandan, sac numunenin alt ve üstü yüzeylerine yakın kısımlardan alınan kutup şekillerinin bu

benzerlik görülememektedir (Şekil 30-31). Bu durum, sürtünme etkisindeki bölgelerde deformasyon homojenliğinin sağlanamadığına işaret etmektedir.

- ii. Gerek EKAE ve gerekse EKASE işlemleri sırasında numuneye uygulanan deformasyonun büyüklüğü kullanılan kalıbın kanal açlarına (kalıp açısı ve dış köşe yuvarlatma açısı) bağlı olarak değişmektedir (Şekil 2). Bu açların küçük değerler alması bir pasoda numuneye uygulanan eş değer şekil değişimi büyüklüğünü arttırmaktadır. Klasik EKAE kalıbının kalıp açısı ( $\phi$ ) ve yuvarlatma açısı ( $\psi$ ) sırası ile  $90^\circ$  ve  $0^\circ$  iken bu değerler sac formundaki IF-çeliğine uygulanan EKASE işleminde kullanılan kalıpta sırasıyla  $120^\circ$  ve  $30^\circ$ 'dir (Şekil 9-11). Bu değerler baz alınarak kütsel EKAE kalıbında yapılan bir pasoluk işlem sonrası 1.15 değerinde bir eş değer deformasyon, EKASE işlemi sonrası bu değer 0.65 olarak gerçekleşmektedir [12, 22]. Bir paso sayısında uygulanan plastik deformasyon oranının kütsel formda çeliğe uygulanan işlemde daha yüksek olması, tane incelmesinin de daha etkin bir şekilde gerçekleşmesine neden olmaktadır [42, 129]. Öte yandan EKAE işlemi ile kütsel formdaki çeliğe uygulanan deformasyon miktarının EKASE işlemi ile uygulanan paso sayısının artırılması ile sac formdaki çeliğe de uygulanması mümkündür. Ancak uygulanan toplam deformasyon miktarının aynı olması durumunda da tane incelmesinin EKAE işlemi sonrasında daha etkin bir şekilde elde edildiği anlaşılmaktadır. Nitekim 2 pasoluk EKAE işlemi ile elde edilen deformasyon miktarı yaklaşık olarak 2,3 değerini almaktadır. Bu deformasyon miktarına EKASE işlemi ile yaklaşık 4 paso ile ulaşılabilir. Ancak sözü edilen deformasyon miktarında elde edilen içyapılardaki DATS oranı EKASE işlemi sonrasında daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 32). Bu durum tane inceme mekanizmasının etkin bir şekilde ortaya çıkabilmesi için, toplamda uygulanan deformasyondan çok, bir paso sayısında uygulanan deformasyon miktarının daha etkili olduğu anlaşılmaktadır [6]. Bu durum literatürde yapılan çalışmalar ile de uyumluluk göstermektedir. Nitekim farklı kalıp açlarına sahip EKAE kalıplarda, aynı kümülatif deformasyon miktarına kadar EKAE uygulanan alüminyumda, tane inceme mekanizmasının artan kalıp açısı ile birlikte yavaşladığı ve yapıdaki GATS oranının azaldığı görülmüştür [134].



## 4.2. Çekme Özellikleri

IF-çeliğine farklı rota ve paso sayılarında uygulanan işlem sonrasında, deformasyon sertleşme kabiliyetinin önemli oranda azalma ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle işlem sonrasında çekme deneyinde görülen üniform deformasyon bölgesinde elde edilen uzama çok düşük mertebelerde gerçekleşmektedir (Şekil 40-43 ve Tablo 6). Birçok saf metal ve alaşımında da görülen bu durum işlem sonrasında elde edilen içyapısal özelliklerde meydana gelen değişimlere dayandırılarak açıklanabilir. [7, 8, 15, 48, 54, 58, 63, 66, 69, 118, 135], İçyapısal özelliklerin incelendiği bölümde de ayrıntılı bir şekilde açıklandığı gibi, EKAE işlemi sırasında uygulanan deformasyona ile içyapıda biriktirilen dislokasyonlar poligonize olarak alt tane sınırlarını oluşturmaktadır (Şekil 17-26). Genel olarak DATS karakterinde olan bu sınırlar uygulanan EKAE rotası ve paso sayısına bağlı olarak gelişerek GATS karakterine dönüşüp UİT'li içyapıyı oluşturmaktadır [36-39]. Deformasyona bağlı olarak gelişen bu mekanizma, yapıdaki GATS'larının yüksek enerji halinde bulunmalarına neden olmaktadır [36, 136, 137]. Söz konusu içyapısal özellikteki UİT malzemeye uygulanan ikincil bir plastik deformasyon işlemi (çekme gibi) sırasında, dislokasyonların çoğalmasını ve etkileşmesini zorlaştıran iki önemli etkiden bahsedilebilir. Bunlardan birincisi, UİT'li içyapıda bulunan ve boyutu 300-800 nm aralığında bulunan deformasyona dayalı olarak oluşan tanelerde serbest dislokasyon yolunun azalmasıdır [54, 118, 128, 138]. İkincisi ise, iri taneli malzemelerde katılma ile oluşan tane sınırlarından tersine, UİT içyapıdaki tane sınırlarının önünde dislokasyon birikiminin etkin bir şekilde gerçekleşmemesidir [128, 138]. Başka bir deyişle, deformasyona dayalı olarak oluşan tane sınırlarının, nispeten yüksek enerjiye sahip olması ve/veya dengeli olmaması nedeniyle dislokasyonları yok etme davranışı sergilemesidir [128, 135, 138-140]. Bu iki etki nedeniyle, kaynaktan çıkan bir dislokasyonun tane içerisinde diğer dislokasyonlar ile etkileşime girmesini zorlaştırmakta ve ulaştığı tane sınırı tarafından büyük oranda yok edilmesine neden olmaktadır [128, 135-140]. Bu nedenle, EKAE işlemi uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin deformasyon sertleşmesi kabiliyeti büyük oranda azalmaktadır. Bu durum EKAE sonrası uygulanan deformasyonlar sırasında plastik stabilitenin bozularak deformasyon lokalizasyonunun çok düşük uzama değerlerinden sonra ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Uygulanan EKAE işlemi IF-çeliğinin mukavemet değerinde önemli bir artış elde edilirken süneklik değerlerinin azaldığı görülmüştür (Tablo 6). UİT yapılı çeliğin sergilediği yüksek mukavemet değerleri (akma dayanımı ve çekme dayanımı) işlem

sonrasında içyapıda ortaya çıkan tane incilmesi ile açıklanabilir. Nitekim içyapısal değişimlerin irdelendiği bölümde de ayrıntılı bir şekilde açıklandığı gibi, EKAE işlemi, sonrasında hem DATS hem de GATS'ları ile ayrılan mikron altı boyutta tanelerden oluşan bir içyapı ortaya çıkmaktadır (Tablo 5). İşlem sonrasında elde edilen mukavemet artışına her iki tane sınırı türü de katkıda bulunmaktadır [61, 129]. Buna göre, EKAE sonrasında mukavemet artışı iki ayrı sertleşme mekanizmasının etkisi ile gerçekleşmektedir [61]. Bunlardan birincisi, işlem sırasında elde edilen tane incelmeye bağlı olarak ortaya çıkan tane sınırı sertleşmesi (Hall-Petch etkisi), ikincisi ise tane içi bölgelerde biriktirilen dislokasyonların ve bu dislokasyonlar tarafından oluşturulan alt tane sınırlarının neden olduğu dislokasyon sertleşmesidir [61, 129]. Tane sınırı sertleşmesinde, Hall-Petch bağıntısı gereği, EKAE işlemi sırasında yapıda oluşturulan GATS'larının ayırdığı tane boyutunun azalması mukavemet artışına neden olmaktadır [40, 61]. Dislokasyon sertleşmesinde ise geniş açılı tane sınırlarına dönüşümü tamamlanmamış olan DATS'larının etkisi ön plana çıkmakta ve bu yapıdaki yüksek dislokasyon oranı mukavemet artışında ikincil etkiye sahip olmaktadır. Yapıdaki DATS'larının ayırdığı bölgeler arasındaki kristalografik yönelim farkının artması ile EKAE işlemi sırasında elde edilen mukavemet artışına katkılarının da artması beklenmektedir [129]. Bu durum söz konusu sınırların ayırdığı bölgelerdeki açılmal yönelim farkının daha yüksek olması durumunda dislokasyon hareketine karşı gösterdikleri direncin artmasına bağlı olarak açıklanabilir [61, 129]. Birlikte gelişen bu iki etki sonucu IF-çeliğinin mukavemet değerleri uygulanan rota ve paso sayısına da bağlı olarak önemli oranlarda artmaktadır. Öte tandan EKAE işlemi sonrasında elde edilen akma dayanımı ve çekme dayanımının birbirleri ile çok yakın değerler aldığı görülmektedir (Tablo 6). Bu durum EKAE işlemi uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin çok sınırlı oranda deformasyon sertleşmesi göstermesinden kaynaklanmaktadır. Yetersiz deformasyon sertleşmesi akma dayanımından sonra önemli bir mukavemet artışı ortaya çıkmasını engellemektedir.

Farklı rota ve paso sayılarında uygulanan işlem sonrasında süneklik özelliklerinde görülen azalma deformasyon sertleşme davranışının UİT yapıları çelikte yetersiz olması nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Nitekim akma dayanımından hemen sonra ortaya çıkan deformasyon lokalizasyonu (boyun verme) kopma uzaması değerinin de sınırlı olmasına sebep olmaktadır. [128, 129, 135-140].

Farklı rota ve paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen mekanik özelliklerde görülen farklılıklar söz konusu işlem rotaları sonrasında elde edilen

içyapı özelliklerine dayandırılabilir. Şöyle ki, EKAE işlemi sonrasında elde edilen mukavemet değerlerinin geliştirilmiş Hall-Petch eşitliği ile uyumluluk gösterdiği bilinmektedir. Yukarıda da açıklandığı gibi, işlem sonrasında elde edilen GATS ile ayrılmış tane boyutunun azalması ve DATS ile ayrılmış bölgelerin arasındaki açılmal yönelim farkının artması mukavemet değerlerinin de artmasına neden olmaktadır [61]. Rota-Bc'de uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen içyapıdaki tanelerin daha ince (Tablo 5), tane sınırlarının ise baskın olarak GATS karakterinde olması (Şekil 25) sözü konusu işlem rotasının sergilediği mukavemetin de daha yüksek olmasını sağlamaktadır. Diğer EKAE rotalarında elde edilen tane boyutu (Tablo 5) ve tane sınırı karakteri, bunların sergilediği mukavemet değerleri ile uyumluluk göstermektedir (Tablo 6). Nitekim rota-C'de uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası elde edilen nispeten iri tane boyutu (Tablo 5) ve yapıdaki DATS'lerinin daha baskın olması (Şekil 24(d)) söz konusu şarttaki mukavemetin de daha düşük olmasına sebep olmuştur (Tablo 6).

Öte yandan, EKAE işlemi sonrasında elde edilen süneklik özelliklerinin de mukavemet değeri kadar olmasa da belli oranda işlem rotasından etkilendiği söylenebilir. Bu durum kopma uzaması değerlerinde daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır (Tablo 6). Rota-A'da elde edilen kopma uzaması diğer EKAE rotalarına kıyasla daha düşük değerler almıştır (Tablo 6). Bu durum ilgili rotada gerçekleştirilen işlem sonrası ortaya çıkan belirgin yönlendirme etkisinden kaynaklanmış olabilir (Şekil 23). Bu tip içyapılara uygulanacak ikincil deformasyonlar (çekme gibi) sırasında diğer rotalar sonrası elde edilen yapılardan farklı olarak daha fazla gerilme yığılmaları ortaya çıkabilmektedir. Tane morfolojisinin eş eksenli olduğu rota-C ve yönlendirme etkisinin çok belirgin olmadığı rota-Bc ve rota-E'de elde edilen kopma uzaması değerlerinin arasında önemli bir fark oluşmaması da bu düşüncüyü desteklemektedir (Tablo 6)

Sac formundaki IF-çeliğinin dayanım değerlerinde sağlanan artışın temel nedeni kütleli formdaki IF-çeliğinde sağlanan artışın nedeniyle aynı olup, bu durum yukarıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Ancak, kütleli formdaki IF-çeliğinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında, sac formundaki IF-çeliğinin dayanım artış oranlarının daha düşük seviyede olduğu dikkati çekmektedir. Kütleli ve sac formundaki IF-çeliğinin EKAE ve EKASE işlemleri sonrası sahip olduğu dayanım değerleri arasındaki bu fark EKASE yönteminde görülen tane incelmesinin EKAE kadar etkin olmamasından kaynaklanmaktadır [6]. EKASE sonrasında çelik sacların içyapısında görülen değişimlerin incelendiği bölümde de ayrıntılı bir şekilde anlatıldığı gibi, işlem sonrası da daha çok

DATS oluşturulmakta ve dislokasyon yoğunluğu da yüksek seviyelere çıkmaktadır. Ancak, DATS'larının GATS'larına dönüşümü EKAE işlemi kadar etkin bir şekilde gerçekleşmemektedir. Buna göre, EKASE işlemi sonrasında elde edilen mukavemet artışına DATS ve yapıdaki yüksek dislokasyon yoğunluğunun katkısının daha fazla olduğu söylenebilir [6]. Öte yandan, EKAE işlemi sonrasında elde edilen içyapıdaki, GATS oranının da yüksek olması, mukavemetin EKASE sonrasında elde edilen durumdan daha etkin bir şekilde artmasına neden olduğu düşünülmektedir [6].

### 4.3. Isıl İşlem

EKAE işlemi sırasında uygulanan paso sayısının artması, yeniden kristalleşmenin bağladığı sıcaklık değerinin de azalmasına neden olmaktadır. Bu durum EKAE işlemi sırasında uygulanan deformasyon ile birlikte iç enerjinin artmasına dayandırılarak açıklanabilir [36, 55, 118, 133]. Artan paso sayısı ile daha etkin bir hale gelen tane incelmeleri ve yapıdaki dislokasyon yoğunluğundaki artış, iç enerjinin de artmasına neden olmaktadır [116]. Bu sayede, yeniden kristalleşme için gerekli sürücü kuvvet, içyapısal düzensizliklerin biriktirilmesi ile belli oranda elde edilmektedir [116]. Bu durum yeniden kristalleşmenin başlaması için gerekli termal enerjinin de azalmasına neden olmaktadır. Böylece, yeniden kristalleşmenin başlaması için gerekli sıcaklık değeri artan paso sayısı ile birlikte azalmaktadır [141]. Öte yandan, farklı rotalarda uygulanan EKAE işlemi sonrasında IF-çeliğinin yeniden kristalleşme sıcaklığı da farklılık göstermektedir. Nitekim Rota-A'da uygulanan 8 pasoluk işlem sonrasında yeniden kristalleşme başlangıç sıcaklığı 400°C'ye kadar düşerken (Şekil 51 ve Tablo 8), bu değer diğer rotalarda uygulanan 8 pasoluk işlem sonrası 450°C olarak belirlenmiştir (Şekil 52-54 ve Tablo 8). Yeniden kristalleşmenin söz konusu rotada daha düşük sıcaklıklarda başlaması bu rotanın neden olduğu yönlendirilmiş bantlı yapıya dayandırılabilir [116]. Nitekim ilgili içyapı resimlerinden de anlaşılacağı gibi (Şekil 23), Rota-A'da uygulanan işlem sırasında taneler ekstrüzyon doğrultusunda uzayıp incelerek yönlendirilmektedir. İçyapıdaki şiddetli yönlendirme etkisi, iç enerjinin eş eksenli duruma göre daha yüksek olmasına neden olarak hızlı (kolay) çekirdeklenme alanlarını oluşturduğundan yeniden kristalleşmenin başladığı sıcaklık değerinin azalmasına neden olmaktadır [62, 116, 142]. Rota-A'da görülen bu yönlendirme etkisi yeniden kristalleşme hızının da diğer rotalara göre daha yüksek olmasına neden olmaktadır. Bunun yanında, daha çok eş eksenli karakterde tanelerin elde edildiği Rota-C,

rota-Bc ve rota-E'de uygulanan işlem sonrasında da, yeniden kristalleşme hızında belli oranda farklılık ortaya çıkmaktadır (Şekil 55-59). Sözü konusu rotalar arasında en yüksek yeniden kristalleşme hızı sırasıyla, rota-Bc, rota-E ve rota-C'de elde edilmektedir (Şekil 59). Bu durum, söz konusu işlemler sonrasında elde edilen içyapısal özelliklere dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, EKAE işlemi sonrasında en etkin tane incelmesi rota-Bc'de uygulanan işlem ile elde edilmektedir (Tablo 5). EKAE sonrasında elde edilen tane sınırlarının dislokasyonlar tarafından oluşturulduğu göz önünde bulundurulduğunda, en ince tane boyutunun elde edildiği rota-Bc'de en yüksek yapısal düzensizlik bulunması beklenir [143]. Bu durum, ilgili EKAE rotası sonrasında ortaya çıkan yeniden kristalleşme hızının da daha yüksek olmasına neden olmuş olabilir [143]. Benzer düşünce ile rota-C'de uygulanan işlem sonrasında elde edilen iri tane yapısı, bu rotada elde edilen yeniden kristalleşme hızının daha düşük olmasına neden olmaktadır [143].

UİT yapılı çeliğin farklı sıcaklarda ve sürelerde tavlama durumunda, işlem rotasında bağımsız olarak mukavemet değerlerin artan tavlama sıcaklığı ile birlikte azalmaktadır (Şekil 65 ve Tablo 9). Bu azalma, uygulanan tavlama sırasında deformasyon yapısının toparlanması ve yeniden kristalleşmesi nedeniyle ortaya çıkmaktadır [116]. UİT yapının düşük sıcaklık ve sürelerde tavlama durumunda ortaya çıkan toparlanma, yapıdaki DATS'lerinin oranının azalmasına neden olmaktadır. Bu durum, 8E şartındaki çeliğin 500°C'de bir saat süre ile tavlama sonrasında GATS oranında ki artıştan da anlaşılabilir (Şekil 60-61). Tavlama sıcaklığının ve süresinin artırılması durumunda ise yapının yeniden kristalleşmesi ile ortalama tane boyutunda sürekli artış görülmektedir (Şekil 62-64). EKAE işlemi sonrasında elde edilen yüksek mukavemetin, tane incelmesi ve yapıdaki dislokasyon yoğunluğunun artması ile elde edildiği göz önünde bulundurulduğunda, mukavemet değerlerinin tavlama sonrasında azalması beklenen bir durum olarak nitelendirilebilir.

UİT yapılı çeliğin düşük sıcaklıklarda (450°C-500°C aralığında bir saat süre ile) tavlama sonrasında, süneklik özelliklerinde önemli bir artış elde edilmemektedir. Bu durum, UİT yapılı çeliğin tavlama sonrasında elde edilen içyapısal değişimlere dayandırılarak açıklanabilir. EKAE uygulanmış durumdaki TEM resimlerinden tane içi bölgelerde dislokasyon yoğunluğunun düşük, tane sınırlarında ise çok daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 23-26). Tane içi bölgelerde bulunan dislokasyonlar, UİT yapılı çeliğe uygulanan çekme deneyi sırasında aktive edilerek (mobil hale getirilerek) belli oranda dislokasyon etkileşimi içerisine girmekte ve buna bağlı olarak çok sınırlı da olsa

pekleşme davranışı görülmektedir [63, 66, 69]. Bu yapının toparlanma bölgesinde tavlama durumunda tane iç bölgelerdeki mobil dislokasyon yoğunluğunda azalma ortaya çıkmaktadır [54]. Nitekim EBSD incelemelerinden, 8E şartındaki örneğin 500°C'de 60 dk tavlama durumunda tane irileşmesi görülmemesine rağmen yapıdaki DATS oranındaki azalma yapıdaki dislokasyon yoğunluğunun düştüğüne işaret etmektedir (Şekil 61). Bunun yanında, söz konusu şartlarda tavlama çeliğinin sertlik değerlerinin azalması da bu düşüncüyü destekler niteliktedir (Şekil 54). Yapıda tane irileşmesi olmadan mobil dislokasyon yoğunluğunun azalması ise pekleşme davranışının olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır. Nitekim tane irileşmesi gerçekleşmediğinden serbest dislokasyon yolunda değişiklik olmamaktadır [54, 66, 133]. UİT yapılı tavlama sonrasında pekleşme davranışında görülen bu azalma, rota-A ve rota-C'de uygulanan işlemler sonrasında çok belirgin olarak ortaya çıkmamaktadır (Şekil 65(a)-(b)). Bu durum ilgili işlem rotalarında elde edilen ortalama tane boyutu değerlerinin daha iri olmasından ve yapıdaki tane sınırlarının daha çok DATS karakterinde olmasından kaynaklanmış olabilir (Şekil 23-24 ve Tablo 5). Şöyle ki, ortalama tane boyutunun daha iri olması, serbest dislokasyon yolunun daha uzun olmasını gerektirmektedir. Ayrıca, söz konusu rotalarda elde edilen içyapıda DATS ile ayrılmış alt tane oranının daha yüksek olması, tavlama sonrasında yapıdaki mobil dislokasyon yoğunluğunun daha yüksek olmasına neden olmuş olabilir [54, 66, 133]. Bu nedenle, söz konusu işlem ve tavlama şartlarında elde edilen pekleşme etkisi daha belirgin olarak ortaya çıkmış olabilir. Yeniden kristalleşmenin kısmi olarak gerçekleştiği şartlarda tavlama UİT yapılı çeliğinin pekleşme davranışının da toparlanma sonrasında elde edilen duruma benzer bir karakterde olduğu söylenebilir. Nitekim, 550°C'de bir saat (Şekil 54(d)) ve 600°C'de 11,5 dk (Şekil 58(f)) süre ile tavlama çeliklerin sergiledikleri pekleşme davranışında önemli bir iyileşme ortaya çıkmamaktadır (Şekil 65(d) ve Tablo 9). Bu durum, ilgili ısıl işlem şartlarında elde edilen içyapısal özelliklere dayandırılarak açıklanabilir (Şekil 54(d) ve Şekil 58(f)). Söz konusu şartlarda tavlama UİT yapılı çeliğinin içyapısında, yeniden kristalleşme sürecinde bulunan taneler ile bu sürece dahil olmamış taneler bir arada bulunmaktadır. Örneğin, 600°C'de 11,5 dk süre ile tavlama durumunda elde edilen iç yapıya ait EBSD incelemelerinden (Şekil 62(f)) mikron altı boyutlarda taneler ile, yeniden kristalleşme sürecinde 5µm-8µm aralığına ulaşmış kimi taneler bir arada bulunmasına karşın pekleşme kabiliyetinde önemli bir değişim ortaya çıkmamaktadır. Bu durum, yapıdaki mikron altı tanelerin sergilediği düşük pekleşme davranışının daha baskın olduğuna işaret etmektedir [54]. Bu tanelerin yapıdaki oranının

azalması durumunda, pekleşme kabiliyetinde artış görülmektedir. Nitekim 30 dk süre ile gerçekleştirilen ısı işlem sonrasında uygulanan çekme deneyinde elde edilen deformasyon sertleşme bölgesinin plato biçimini alması bu düşünceyi desteklemektedir (Şekil 66-67). Söz konu tavlama şartı sonrasında elde edilen EBSD resimlerinden de anlaşılacağı üzere, 30dk sonrasında içyapıdaki taneler büyük oranda yeniden kristalleşme sürecine girmektedir (Şekil 63). Bu tanelerin pekleşme kabiliyetinin daha yüksek olması ince tanelerin neden olacağı deformasyon lokalizasyonunu dengeleyerek, yapının deformasyon lokalizasyonuna uğramasını engellemiş olabilir (Şekil 66-67). Tavlama süresinin ve/veya sıcaklığının daha da arttırılması yapıdaki yeniden kristalleşmenin daha da belirgin hale gelmesi veya tamamlanması (Şekil 51-58) ile sürekli bir deformasyon sertleşme kabiliyeti elde edilebilmektedir. Bu durum 600°C-650°C’de bir saat süre ile tavllanmış durumda elde edilen gerilme-uzama eğrilerinin oldukça geniş bir üniform deformasyon bölgesi sergilemelerinden de anlaşılmaktadır (Şekil 65-67).

#### 4.4. Şekillendirilebilirlik

IF-çeliğine uygulanan EKAE işlemi, bu çeliğin şekillendirilebilirlik davranışında uygulanan işlem rotasına ve paso sayısına bağlı olarak önemli değişimlere neden olmaktadır. Elde edilen Erichsen şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, bu değişimlerin membran şekil değiştirme bölgesi olarak tanımlanan kademedede (eğrilerde “b”-“c” arası bölge) çok daha belirgin bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 70-74). Çünkü iki eksenli gerilme altında gerçekleştirilen deformasyon sırasında pekleşme ile birlikte gelişen üniform şekil değişimi büyük oranda bu bölgede ortaya çıkmaktadır. Bu bölge çekme deneyinde ise üniform uzama bölgesine karşılık gelmektedir (Şekil 40-43). İşlem öncesi durumdaki iri taneli örneğe uygulanan Erichsen testinde, F-X eğrisinin eğimi ( $dF/dX$ ) membran şekil değişimi kademesinde (“b”-“c” arası) geniş bir aralıkta artan karakter sergilemektedir (Şekil 70-74). Bu durum ise bu bölgede deformasyon sertleşme davranışının etkin olduğunu ve oluşan kalınlık incelmesinin ise deforme olmuş bütün kesitte homojen olarak gerçekleştiğini göstermektedir. Uygulanan EKAE sonrası UİT yapılı hale getirilen çeliğin ise söz konusu deformasyon kademesinin çok dar bir bölgede gerçekleştiği ve bu bölge sonrasında eğri eğiminin deformasyon lokalleşmesine bağlı olarak sürekli azalma eğilimine girdiği görülmektedir (Şekil 70-74). Bu durum ise iri tane yapılı çeliğin aksine, UİT yapılı çeliğin pekleşme kabiliyetinin yetersiz olmasında

kaynaklanmaktadır. Çekme deneyi sonrası UİT yapılı çelik örneklerden elde edilen gerilme-uzama eğrilerinde de bu durum açıkça görülmektedir (Şekil 40-43). Nitekim, iri tane yapılı çelik bu bölgede baskın olarak pekleşme davranışı sergilemektedir (Şekil 40-43 ve Tablo 6). Bu pekleşme davranışı, örnek kalınlığının uygulanan baskı kuvveti ile lokal olarak incelmesini geciktirmekte ve dengeleyici bir etki oluşturarak bu kademedeki uniform bir kesit incelmesini ortaya çıkarmaktadır. UİT yapılı örnekte ise pekleşme davranışının yetersiz olması membran şekil değiştirme bölgesinde ortaya çıkan kalınlık azalmasının yeterince dengelenememesine neden olmaktadır (Şekil 40-43 ve Tablo 6). Bu nedenle, söz konusu deformasyon bölgesi çok sınırlı bir çökme miktarında gerçekleşmekte ve hemen sonrasında  $dF/dX$  eğrisi devamlı olarak azalma eğilimine girmektedir (Şekil 70-73). Bu durum, UİT yapılı çeliğin deformasyonunun tek eksenli gerilme altında olduğu gibi iki eksenli gerilme altında da büyük oranda kesit büzülmesi (deformasyon lokalizasyonu) ile gerçekleştiğini göstermektedir (Şekil 70-74). Erichsen deneylerine tabi tutulan örneklerinin yüzey görünümleri de bu sonucu desteklemektedir. Nitekim, Erichsen testi uygulanmış UİT yapılı örneklerin serbest yüzeylerinde farklı morfolojiye sahip bölgelerin oluştuğu dikkati çekmektedir (Şekil 80, Şekil 82-83). Bunlar; zımba ile temas halinde olması nedeniyle sürtünmeden etkilenen “A-bölgesi”, numune yüzeyinin zımba ile temasının kesildiği ve lokal deformasyon bantlarının oluştuğu “B-bölgesi” ve deney öncesi duruma göre yüzey morfolojisinde önemli bir değişimin görülmediği “C-bölgesi” olarak adlandırılmıştır (Şekil 80, Şekil 82-83). A-bölgesinde, örnek ile zımba arasındaki sürtünme kuvveti, bu bölgede iki eksenli çekme deformasyonunun etkin bir şekilde gerçekleşmesini engellemektedir [122]. Bu nedenle, söz konusu bölgede derin olmayan yüzeysel çatlaklar oluşmaktadır. Bu durum test edilen malzemenin deformasyon davranışından çok, uygulanan deneysel yöntemin getirdiği tipik bir sonuç olarak değerlendirilebilir [122]. B- ve C-bölgelerinde ise etkin bir zımba-numune teması gerçekleşmemekte ve uygulanan zımba kuvveti her iki bölgede de iki eksenli çekme gerilmeleri oluşturmaktadır [122]. Ancak UİT yapılı çeliğin sergilediği yetersiz pekleşme kabiliyeti, daha fazla çökmenin ortaya çıktığı B-bölgesinde yoğun deformasyon bantlarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu oluşum ise daha düşük miktarda çökmenin gerçekleştiği flanşa yakın C-bölgesindeki deformasyonu büyük ölçüde engellenmektedir. Bu nedenle, C-bölgesindeki yüzey görünümü bozulmamakta ve daha çok deney öncesinde parlatıldığı gibi kalmaktadır. Bu farklı morfolojik oluşumlar, UİT yapılı örneklerin Erichsen testleri sonrası homojen olmayan kalınlık değişimlerinden de açıkça görülmektedir (Şekil 84(b)-(e)). Nitekim UİT



yapılı örneklerin flanşa yakın bölgelerdeki kesit kalınlıkları (0,9 mm) yaklaşık işlem öncesi durumlarını korurken, diğer bölgelerde ise 0,5mm-0,8mm aralığında belirgin incelmeler ortaya çıkmaktadır (Şekil 84(b)-(e)).

Erichsen örneklerinin yüzey görünüşleri daha yakından incelendiğinde, deformasyon homojenliğinin oluşturulan UİT yapı ile belli oranda bozulduğu görülmektedir. Ancak, iri tane yapılı örneklerde belirgin bir şekilde görülen portakal kabuğu etkisinin ise UİT yapılı örneklerde belirginliğini kaybettiği ve yüzey görünümünün daha az pürüzlü hale geldiği de dikkati çekmektedir (Şekil 75 ve Şekil 79-83). Özellikle iri taneler arasındaki kayma yönü farklılığı nedeniyle oluşan portakal kabuğu etkisinin tüm yüzeyde görülüyor olması deformasyonun bütün yüzeyde homojen olarak gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca, iri taneli örneğin kesitindeki kalınlık değişiminin de nispeten daha homojen bir şekilde ortaya çıkmış olması, pekleşme mekanizmasının deformasyon homojenliğindeki olumlu etkisini göstermektedir [123, 124]. Nitekim, iri taneli örneğin kesitindeki kalınlık dağılımı incelendiğinde, flanşa yakın bölgelerde başlangıçta 0,9 mm olan örnek kalınlığı homojen bir şekilde incelerek yaklaşık 0,55 mm'ye düşmektedir. Bu homojen kesit incilmesi daha çok membran şekil değişimi bölgesinde ("b"-“c”) oluşmaktadır (Şekil 84). Sonrasında ise, bu incelme sırasında yapıda artan dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak gelişen boyun verme ortaya çıkmakta ve kesitin herhangi bir noktasında ani incelme, çatlak oluşumu ve ilerlemesi etkisine bağlı olarak çevresel yırtılmalar ortaya çıkmaktadır (Şekil 75). UİT yapılı örneklerde ise ani kesit büzülmesinden dolayı çevresel homojen incelme yerine, belli bir kesit üzerinde incelme oluşmakta ve yırtılma da doğal olarak lokal bir bölgede gerçekleşmektedir (Şekil 84).

Uygulanan EKAE işlemi iri taneli IF-çeliğinin Erichsen indeksi ( $E_i$ ) değerini azaltmaktadır. Bu durumun işlem sonrasında elde edilen içyapının çatlak oluşturma yatkınlığının artmasına bağlı olarak homojen deformasyon kabiliyetinin azalmasından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Şöyle ki, UİT yapılı çeliğin pekleşme kabiliyetinin yetersiz olması nedeniyle hızlı bir şekilde ortaya çıkan deformasyon lokalizasyonu, membran şekil değiştirme bölgesindeki çökmenin de iri taneli duruma göre daha düşük kalmasına neden olmaktadır. Bu durum ise membran şekil değiştirme bölgesinin sonuna denk gelen  $E_i$  değerinin de azalmasına sebep olmaktadır (Tablo 10). Öte yandan, bütün rotalarda artan paso sayısı ile  $E_i$  değerinin de azaldığı görülmektedir (Tablo 10). Ancak, bu azalma rota-A'da uygulanan işlem sonrasında daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Nitekim, iri taneli durumda 4,8 mm olarak belirlenen  $E_i$  değeri söz konusu

rotada uygulanan 4 ve 8 pasoluk işlemler sonrasında sırasıyla 0,8 mm ve 0,4 mm değerlerini almaktadır. (Tablo 10). Bu durum söz konusu EKAE rotasında elde edilen içyapısal özelliklere bağlı olarak açıklanabilir. İlgili bölümde de vurgulandığı gibi, Rota-A'da uygulanan işlem sonrasında taneler yönlenerak X ve Z doğrultularında (Şekil 14) uzamaktadır (Şekil 20, Şekil 23). Bu durum, söz konusu rotada uygulanan EKAE işlemi sonrasında tanelerin en-boy oranının artmasına ve belli oranda yönleneğine neden olmaktadır (Şekil 20, Şekil 23). Bu yapıdaki dislokasyonlar ise belli bir doğrultu üzerinde yığınlar ve buna bağlı olarak sürekli alt tane sınırları oluşturmaktadır. Bu sınırlar, diğer rotalarda elde edilen nispeten eş eksenli yapıya nazaran daha fazla gerilme yığılması bölgeleri oluşturmakta ve sonuç olarak daha kolay çatlak başlangıcı ve ilerlemesi noktalarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır [118, 138]. Bu etki ise Erichsen testi gibi iki eksenli gerilmenin uygulandığı deformasyon halinde daha da hissedilir hale gelmektedir [113]. Erichsen örneklerinin yüzey görünüşleri ve kesitlerindeki kalınlık dağılımları da bu düşüncüyü destekler niteliktedir (Şekil 78-79). Nitekim, 8A şartındaki örneklere uygulanan Erichsen testinde oluşan çatlaklar, tanelerin uzayarak yönlendiği Y doğrultusuna neredeyse paralel olarak ilerlemektedir (Şekil 78-79). Bu durum yönlendirilmiş tane sınırlarının çatlak ilerlemesini kolaylaştırıcı etkide bulunduğu düşüncesini doğrulamaktadır. [113]. Bunun yanında, örnek yüzeyinin deney öncesinde parlatılmış halini korumuş olması (Şekil 79 (a)), deney sonrasında örnek kalınlığında dikkate değer bir incelmenin oluşmaması (Şekil 84(b)) ve çatlak ucunda ortaya çıkan lokalize deformasyon bölgesi (Şekil 79(b)) deney sırasında çok sınırlı bir plastik deformasyonun gerçekleştiğini göstermektedir. Söz konusu işlem rotasında elde edilen içyapıdaki çatlak oluşturma yatkınlığının yüksek olması,  $F_{Ei}$  değerlerinin de artan paso sayısı ile devamlı olarak azalmasına neden olmaktadır (Tablo 10). Bu değişim, rota-A'da uygulanan işlem sonrasında elde edilen yapının çok eksenli gerilme altında zorlanması durumunda, daha düşük kuvvet değerlerinde çatlak oluşturduğunu göstermektedir. Rota-A'da uygulanan EKAE işleminin aksine, diğer işlem rotaları ise nispeten daha eş eksenli içyapıların oluşmasına neden olmaktadır. Bu tür içyapılarda ise çatlak başlangıcı oluşturabilecek gerilme yığılma bölgeleri açısından daha avantajlı bir durum göstermektedir. Bu rotalar arasında en yüksek  $E_i$  değeri rota-C'de uygulanan işlem sonrasında elde edilmektedir (Tablo 10). Nitekim 8C durumunda uygulanan Erichsen testi sonrasında 3,9 mm olarak elde edilen  $E_i$  değeri, 8Bc ve 8E şartlarında gerçekleştirilen işlemler sonrası yaklaşık 2,9 mm olarak belirlenmiştir (Tablo 10). Bu durum söz konusu işlemlerin ortaya çıkardığı içyapısal farklılıklardan

kaynaklanmış olabilir. İçyapısal zelliklerin incelendiği bölümde ayrıntılı bir Şekilde vurgulandığı gibi, 8Bc ve 8E Şartları altında elde edilen içyapıdaki tane boyutu 8C Şartında elde edilene göre daha küçük olmakta ve tane sınırları ise daha büyük oranda GATS'ları içermektedir (Tablo 5, Şekil 25-26). EKAE işlemi sonrasında ortaya çıkan içyapısal incelmelerin deformasyon sırasındaki dislokasyon birikimine dayalı olarak meydana geldiği göz önünde bulundurulduğunda, yapıdaki tane boyutunun azalması ve GATS oranının artması, i gerilmelerin ve buna bağlı olarak da çatlak oluşturma yatkınlığının artmasına neden olmuş olabilir [36, 111, 113, 116]. Bu tür içyapısal özelliğe sahip örneklere çok eksenli gerilme altında uygulanan deformasyon sırasında, çatlak oluşumu ve bu çatlakların ilerlemesinin daha kolay bir Şekilde gerekleŐeĐeđi söylenebilir [113]. Buna bağlı olarak 8C Şartlarında retilen UİT'li içyapının nispeten daha az i enerji barındırması, bu yapıda çatlak oluşturma ve ilerleme mekanizmasının da daha yavaş çalıŐmasına ve sonuçta daha yüksek  $E_i$  değerinin elde edilmesine neden olmaktadır. Bu durum, farklı rotalarda uygulanan 8 pasoluk işlem sonrasında elde edilen kuvvet-okme eğrilerinin karŐılaŐtırıldıđı Şekil 74'de de açık bir Şekilde görülmektedir. Nitekim, 8Bc ve 8E Şartındaki numunelerden elde edilen  $dF/dX-X$  eğrileri, membran Şekil değişimi bölgesi sonrasında keskin bir azalma sergilerken, bu değişim 8C Şartındaki örneklere daha geniş bir okme aralığında ve yavaş olarak ortaya çıkmaktadır (Şekil 74). Erichsen indeksine karşılık gelen zımba kuvveti değerleri ( $F_{Ei}$ ) de 8C Şartındaki örneklere üre daha düşük olduğu sonucunu desteklemektedir (Tablo 10). Nitekim 8C Şartında işleme tabi tutulan örnekten elde edilen  $F_{Ei}$  değeri (7883 N), 8Bc ve 8E Şartlarında işlemlere tabi tutulan örneklere elde edilen değerlerden (sırasıyla 6810 N ve 6167 N) daha yüksek olarak ölçülmüştür (Tablo 10). Bu durum rota-C'de çatlak oluşumu için gerekli gerilme değerlerinin daha yüksek zımba kuvvetleri ile elde edilebildiğini ortaya koymaktadır.

EKAE işlemleri sonrası UİT yapıly hale getirilen çeliğin belli oranda olumsuz etkilenen Şekillendirilebilirlik davranışını tekrar geliştirmek için farklı sıcaklık ve sürelerde ısıl işlemler planlanarak uygulandı. Elde edilen sonuçlar, bu işlemlerin UİT yapıly çeliğin iki eksenli gerilme altındaki Şekillendirilebilirlik davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gösterdi (Şekil 85-85). Nitekim toparlanmanın görüldüğü veya yeninden kristalleşmenin henüz başladığı sıcaklık aralığı ve sürelerde uygulanan tavlama işlemlerinin, eliğin Şekillendirilebilirlik davranışı üzerinde önemli bir iyileŐtirme etkisi oluŐturmadıđı ilgili eğrilerden açıkça görülmektedir (Şekil 85). Bu durum aynı Şartlardaki

çelik örneklerle tek eksenli gerilme altında uygulanan çekme deneyi sonucu ile de uyumluluk göstermektedir (Şekil 65(d) ve Şekil 66-67). Ancak yeniden kristalleşmenin baskın olarak gerçekleştiği veya tamamlandığı şartlarda (600°C’de 30dk, 60dk ve 120dk ile 650°C’de 60 dk) tavlanan UİT yapılı çeliklerin şekillendirilebilirlik davranışlarının tekrar iyileştiği görülmektedir (Şekil 65(d) ve Şekil 66-67). Bu durum, tavlama sonrasında UİT yapılı çelikte gözlenen içyapısal değişimler ve buna bağlı olarak gelişen pekleşme davranışı ile açıklanabilir. Tavlamanın UİT yapılı çeliğin tek eksenli gerilme altındaki pekleşme davranışına etkilerinin irdelendiği bölümde de ayrıntılı bir şekilde açıklandığı gibi, UİT yapılı çeliğin yetersiz pekleşme davranışı toparlanma devresinde de etkinliğini sürdürmektedir (Tablo 9). Bu durum, söz konusu şartlardaki çeliğin çekme eğrisinde çok dar bir üniform deformasyon davranışı görülmesine neden olmaktadır (Şekil 65(d) ve Şekil 66-67). Benzer şekilde, aynı şartlarda tavllanmış UİT yapılı çelik örnekler iki eksenli gerilme altında da çok dar bir deformasyon sertleşme bölgesi (membran şekil değiştirme bölgesi) sergilemekte ve oluşan deformasyon büyük oranda bu dönem sonrası lokalize bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu durum Erichsen testi sonrasında ortaya çıkan yüzey özelliklerinde de gözlenmektedir. Şekil 87-89 ve Şekil 92’de verilen yüzey resimleri; bu şartlarda tavllanmış örneklerin Erichsen testi sonrası yüzey özelliklerinin tavlama öncesi duruma benzediğini göstermektedir. Nitekim UİT yapılı örneklerin yüzeylerinde deformasyon bantlarının bulunduğu “B” bölgesi ile deformasyonun etkin bir şekilde gerçekleşmediği “C” bölgesi söz konusu şartlarda tavllanmış örneklerin yüzeylerinde de izlenmektedir (Şekil 87-89 ve Şekil 92). Ayrıca, UİT yapılı çelik örneklerin kesitinde gözlenen deformasyon lokalizasyonu, bu şartlarda uygulanan ısı işlemler sonrası da benzer bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Nitekim 450 °C’de 60 dk ve 600 °C’de 11,5 dk süre ile tavlana UİT yapılı örneklerin flanşa yakın bölgelerinde önemli bir kalınlık değişmesi gözlenmezken, yırtılmanın gerçekleştiği bölgelerde kesit önemli ölçüde incelmektedir (Şekil 95(a)-(b)). Öte yandan, UİT yapılı çeliğin yeniden kristalleşmenin etkin olarak gerçekleştiği şartlarda tavlaması ile yeniden kazanılan pekleşme davranışı, Erichsen testindeki deformasyon lokalizasyonunun da etkinliğinin azalmasına neden olmaktadır. Nitekim, 600 °C’de 30 dk, 60 dk ve 120 dk ile 650 °C’de 60 dk şartlarında tavllanmış örneklerin membran şekil değiştirme bölgesinin genişleyerek bu bölgedeki çökme miktarının önemli derecede artması bu düşüncüyü desteklemektedir (Şekil 85-86). Bunun yanında, söz konusu şartlarda tavllanmış numunelerin Erichsen testi sonrasındaki yüzeylerinde lokalize deformasyon bandı oluşmaması da tekrar etkin hale gelen

pekleşmenin deformasyon homojenliğini artırıcı yönde etki ettiğini göstermektedir (Şekil 90-91 ve Şekil 93-94). Deformasyon davranışındaki bu olumlu değişim, söz konusu örneklerin kesitlerindeki kalınlık değişiminden de anlaşılmaktadır. Nitekim, artan tavlama sıcaklığı ve/veya süresi ile birlikte, zımba sürtünmesinden etkilenmemiş olan flanşa yakın bölgelerde de örnek kalınlığının homojen olarak incelendiği dikkati çekmektedir (Şekil 95). Bu etki artan tavlama sıcaklığı ile daha da belirgin hale gelmektedir. Nitekim 600 °C’de 30 dk, 60 dk ve 120 dk ile 650 °C’de 60 dk tavllanmış örneklerin kalınlıkları homojen bir şekilde incelererek sırasıyla 0,75 mm, 0,70 mm, 0,70 mm ve 0,65 mm değerlerine ulaşmaktadır. Bu durum, UİT yapıları çeliğin iki eksenli çekme gerilmeleri altında homojen bir şekilde plastik deformasyona uğratılabilmesi için 600°C’de en az 30 dk tavlama gerektiği sonucunu ortaya koymaktadır (Şekil 95).

Öte yandan, UİT yapıları çeliğin farklı süre ve sıcaklıklarda tavlama hem  $E_i$  hem de  $F_{E_i}$  değerinin artmasına neden olmaktadır. Bu durumun UİT yapıları çeliğin tavlama ile ortaya çıkan toparlanma ve yeniden kristalleşme süreçlerinde, içyapıdaki yüksek enerji seviyesinin azalmasından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Şöyle ki, 8E şartında uygulanan işlem sonrasında elde edilen UİT yapı büyük oranda tane sınırları içermektedir (Şekil 60). Ayrıca söz konusu içyapıda önemli oranda dislokasyon birikimi olduğu ve bu dislokasyonların da daha çok bu sınırlar ve sınıra yakın bölgelerde toplanmış olduğu ilgili TEM resimlerinden görülmektedir (Şekil 26). Bu durum, tane sınırları etrafındaki iç gerilmelerin ve buna bağlı olarak da iç enerjinin yüksek olmasına neden olmaktadır [136]. Bu yapının düşük sıcaklıklarda (550 °C’ye kadar) tavlama sırasında ortaya çıkan toparlanma etkisiyle dislokasyonlar iç enerjiyi azaltıcı yönde yeniden düzene girmekte ve bu sayede çatlak oluşturma hassasiyeti azalarak daha yüksek  $E_i$  değerlerinin elde edilebilmesi sağlanmaktadır [112]. Öte yandan, çatlak oluşma hassasiyetinin azalması da elde edilebilecek  $F_{E_i}$  değerinin de artmasına neden olmaktadır (Tablo 11). Yeniden kristalleşme davranışının belirginleştiği tavlama şartlarında (550 °C’nin üzerinde) ise  $E_i$  değeri de artmaya devam etmektedir (Tablo 11). Bu artışın ise yeniden kristalleşme sonrası hem toplam tane sınırı oranının hem de yapıdaki dislokasyon yoğunluğunun azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Öte yandan, yeniden kristalleşmenin gerçekleştiği şartlarda tavlama çelik örneklerinin sergilediği  $F_{E_i}$  değerinin ise azalma eğilimi içerisinde olduğu dikkati çekmektedir. Bu durumun ise söz konusu ısıl işlem şartlarında tavlama çeliğin mukavemet değerlerinde gözlenen azalmadan (Tablo 9) kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### 4.5. Tokluk ve Sünek-Gevrek Geçiş Davranışı

IF-çeliğine uygulanan EKAE işlemi, bu çeliğin oda sıcaklığındaki çentik darbe tokluğu üzerinde uygulama rotasına da bağlı olarak etkili olmaktadır. Uygulanan çok pasolu EKAE işlemi genellikle IF-çeliğinin oda sıcaklığındaki tokluk değerini azaltmaktadır. Bu durum EKAE işlemi sırasında ortaya çıkan içyapısal değişime dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, EKAE öncesi durumdaki iri taneli örnekler yaklaşık 8 J'lük yüksek bir tokluk değeri sergilemektedir (Tablo 12). Bu elde edilen yüksek tokluk değeri örneklerin darbe altındaki kırılma davranışlarını gösteren SEM resimlerinden de anlaşılmaktadır. Nitekim, bu yapıdaki örnekler darbe deneyi sırasında büyük oranda büzülerek deforme olmaktadır. Bu deformasyon sırasında ise yüzeyde belirgin bir çatlak ve/veya yırtılma etkisi görülmemektedir (Şekil 97). Bu durum söz konusu örneğin test darbe testi sırasında önemli oranda plastik deformasyona uğradığını, ancak bu deformasyon sırasında yapıdaki dislokasyon birikiminin çatlak oluşturabilecek yoğunluğa ulaşmadığını göstermektedir. Bu nedenle, söz konusu örnekler darbe şeklinde verilen enerjinin büyük bir kısmının homojen ve lokalize bir şekilde gelişen plastik deformasyon için harcandığı söylenebilir. Uygulanan EKAE işlemi sonrası tokluk değerlerinde meydana gelen azalma ise oluşan UİT'li içyapı özellikleri ile açıklanabilir. Uygulanan çok pasolu işlemler sırasında meydana gelen yapısal incelmeye birlikte birim alana düşen toplam tane sınırı oranı da artmaktadır (Şekil 17-26). Büyük oranda dislokasyon birikimine dayalı olarak gelişen bu sınırlar kararlı olmayıp nispeten daha yüksek iç enerji barındırmaktadırlar [38, 41, 125, 131]. Bu türden gerilme yığılmaları içeren ve çentik hassasiyeti yüksek olan bir yapılanmanın, uygulanan statik ya da dinamik karakterdeki herhangi bir gerilme altında çok daha kolay çatlak oluşturacağı açıktır. Bu durumun ise genelde UİT yapılı çeliğin sergilediği çentik darbe tokluğunun iri taneli duruma göre düşük kalmasına yol açtığı söylenebilir. Bu sonuç kırılma yüzeylerine ait SEM resimlerinden de açıkça görülmektedir. Nitekim söz konusu UİT yapılı örnekler darbe altında uygulanan yük doğrultusunda yırtılarak kırılmaktadır. Bu durum, darbe şeklinde uygulanan enerjinin büyük oranda deformasyon lokalizasyonu, çatlak oluşumu ve ilerlemesi için harcandığını göstermektedir. Nitekim UİT yapılı örneklerin çentik altı kesitlerindeki daralma etkisi, bu tür yapılarda hem deformasyonun hem de çatlak ilerlemesinin aynı anda gerçekleştiğini göstermektedir (Şekil 98-102).

Öte yandan, UİT yapılı çeliğin oda sıcaklığındaki çentik darbe tokluğu üzerinde uygulanan EKAE rotasının da belli oranda etkili olduğu söylenebilir. Özellikle 8A, 8Bc ve 8C şartlarındaki örneklerden elde edilen çentik darbe tokluğu değerleri iri taneli çelikten elde edilen değere göre daha düşük seviyelerde kalmaktadır. Bunlar arasında en düşük darbe tokluğu değeri ( 5,4 J) ise 8A durumundaki örneklerden elde edilmiştir (Tablo 12). Bu düşüş kırılma yüzeylerinden elde edilen SEM resimlerinden de anlaşılmaktadır (Şekil 99). Nitekim, söz konusu işlem şartındaki numunede çatlakların hem yükleme doğrultusunda hem de yükleme doğrultusuna dik (numune boyunca) ilerledikleri dikkati çekmektedir (Şekil 99). Bu durum ise 8A şartındaki örneğin içyapısının diğer rotalarda elde edilenlerden farklılık göstermesinden kaynaklanmaktadır. Söz konusu rotada elde edilen yönlere uzamış tane sınırları potansiyel gerilme alanları ve dolayısıyla kolay çatlak başlangıç noktalarını oluşturmaktadırlar (Şekil 23). Bu nedenle darbe yükünün etkimesi sırasında örnek bir taraftan eğilirken, diğer taraftan bu sınırlarda çatlaklar oluşmaktadır. Oluşan bu çatlaklar söz konusu sınırlar boyunca kolayca ilerlemektedirler. Ancak, bu sırada darbe doğrultusunda örneğin kırılması için de çatlak oluşması ve ilerlemesi gerekmektedir. Bu ise ilgili SEM resimlerinden de görüldüğü gibi (Şekil 99), tane sınırları boyunca gelişen çatlakların bölümlü kesitler oluşturması ve bu kesitlerin tam darbe yüklemesinin etkideği kesitte incelerek kopması ile sağlanmaktadır. Nitekim, kopan yüzeylerdeki belirgin çukurcuk oluşumu da bu mekanizmayı destekler niteliktedir (Şekil 99(b)). Bu durum, örneğin darbe yüklerine kütsel olarak direnmesini engellemekte ve adeta örneği önce alt parçalara ayırıp sonra kırılmasına neden olmaktadır. Bu türden bir kırılma mekanizmasının oluşumu ise 8A şartlarındaki örneklerin nispeten daha düşük darbe tokluğu değeri göstermesine neden olmaktadır. Daha çok eş eksenli tanelerden oluşan içyapıların elde edildiği 8C, 8Bc ve 8E şartlarında ise nispeten daha düşük iç enerji ve daha az çentik hassasiyeti içeren bölgeler oluşmaktadır. Başka bir ifadeyle, bu tür içyapılarda 8A sonrasında görülen türden bir tane morfolojisi ve buna dayalı olarak gelişen yüksek çentik hassasiyeti oluşmamaktadır. Bu ise çentik darbe tokluğu değerlerinin nispeten daha yüksek kalmasına neden olmaktadır. Nitekim 8C ve 8Bc şartlarındaki örneklerle elde edilen çentik darbe tokluğu değerleri sırasıyla 6,2 J ve 6,7 J olarak belirlenmiştir (Tablo 12). Söz konusu şartlarda elde edilen kırılma yüzeylerinin daha çok eş eksenli karakterdeki çukurcuklardan oluşmuş olması da bu düşüncüyü desteklemektedir. (Şekil 100-101). Öte yandan, 8E durumundaki örnekten elde edilen tokluk değeri (9,4 J) ise 8C ve 8Bc durumundaki örneklerden elde edilen değerlerden daha yüksek olarak

ölçülmüştür (Tablo 12). Bu durum söz konusu işlem rotasında 8 pasoluk deformasyon sonrası elde edilen içyapısal özelliklere dayandırılarak açıklanabilir. UİT yapıları çeliklerde çatlak oluşumu ve ilerlemesine neden olan mekanizmaların gelişiminde absorbe edilen enerji değeri sahip olunan içyapısal özelliklerden etkilenmektedir. Farklı rotalarda uygulanan EKAE işlemi ile üretilen UİT yapıları çeliklerin içyapısında ortalama tane boyutu ve baskın tane sınırı karakterleri arasında farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Nitekim rota-C’de elde edilen iç yapıda, tane boyutlarının daha iri olduğu ve DATS’lerinin yapıda daha hakim olduğu görülmektedir (Şekil 24). Bu durum çatlağın fazla yön değiştirmeden daha kolay bir şekilde ilerlemesine imkan sağlayacağından, çatlak ilerlemesi için gereken enerjinin de daha düşük kalmasına sebep olmaktadır [110, 111]. Rota-Bc ve rota-E’de elde edilen içyapılarda ise, ortalama tane boyutunun daha düşük olması ve tane sınırlarının daha çok GATS karakterinde olması (Şekil 25-26), bu yapıların sergilediği darbe tokluğu değerinin de nispeten daha yüksek olmasına neden olmaktadır (Tablo 12). Bu türden bir içyapıda, çatlaklar ilerlerken çok daha kısa mesafelerde yön değiştirmek zorunda kalacağından toplamda kat edilen yol da artacak ve dolayısıyla harcanan enerji değeri de yükselecektir. Öte yandan bu iki rotada 8 pasoluk EKAE işlemi sonrası üretilen örneklerin tokluk değeri arasında da farkın olduğu dikkati çekmektedir. Bu durumun söz konusu işlem rotalarında elde edilen çatlak oluşturma yatkınlığındaki farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Rota-Bc’de uygulanan işlem sırasında elde edilen iç yapının diğer bilinen temel rotalarla elde edilen içyapılara göre çok daha yüksek iç enerji içerdiği bilinmektedir [38, 41, 125]. Enerji değerindeki bu yüksek artış ise işlem sırasında numunenin pasolar arasında sürekli 90° döndürülmesi ile numuneye uygulanan kayma deformasyonunun her bir paso sırasında devamlı düzlem değiştirilmesinden kaynaklanmış olabilir. Nitekim bu uygulama sonrasında, bir önceki pasoda oluşan kayma bantları ardından uygulanan paso sırasında birbirleriyle kesişmektedir. Bu durum bir taraftan daha etkin bir tane inceltme etkisi ortaya çıkarırken, diğer taraftan içyapıda daha yüksek oranda enerji birikimine neden olmaktadır [22, 132, 142, 144, 145]. Bu yüksek birikimli bölgeler ise çatlak oluşumunu kolaylaştırıcı bir etkide bulunmaktadır [144, 145]. 4Bc şartında elde edilen darbe tokluğu değerinin diğer UİT yapıları çelikler arasındaki en düşük değer olması bu düşüncüyü desteklemektedir (Tablo 12). Söz konusu işlem rotasında paso sayısının artırılması durumunda ise bu bölgelerin yapıdaki dağılımında belli oranda homojenlik sağlanması ile birlikte elde edilen çentik darbe tokluğu değerlerinde de belli oranda artış elde ediliyor olabilir. Benzer durum, söz konusu işlem şartındaki örneklerin çekme deneyinden elde



edilen kopma uzaması değerlerinde de izlenmektedir. Nitekim, 4Bc şartında elde edilen kopma uzaması değeri (%13), 8Bc şartında elde edilen kopma uzaması değerinden (%14,7) daha düşük olarak ölçülmüştür (Tablo 6). 8E durumundaki içyapıda ise, pasolar arasında uygulanan 180°'lik döndürme kayma düzlemlerindeki kesişme etkinliğini azaltmakta ve deformasyon homojenliğini artırmaktadır [111, 113]. Bu durumu, 8E durumundaki örneklerden elde edilen kopma uzaması değerinin (%16,4) diğer işlem şartlarından daha yüksek olması da (Tablo 6) desteklemektedir. Buna bağlı olarak, 8E durumundaki örneklerden elde edilen darbe tokluğu değeri diğer bütün rotalardan ve hatta iri taneli başlangıç malzemesinden de daha yüksek olmaktadır.

ÜİT içyapının oluşması ile IF-çeliğin sünek-gevrek geçiş davranışında da önemli iyileşmeler elde edilmiştir. 8E şartlarında uygulanan EKAE işlemi sonrası çeliğin üst enerji seviyesi (ÜES) ve alt enerji seviyesindeki (AES) tokluk değerleri yükselmekte ve sünek-gevrek geçiş sıcaklığı (T<sub>g</sub>) ise sola doğru kayarak önemli oranda düşmektedir (Şekil 103 ve Tablo 13). Söz konusu eğrinin ÜES bölgesinde (-30°C'ye kadar), iri taneli çeliğin tokluk değerinin büyük oranda çatlak oluşturma sürecinde harcandığı söylenebilir. Nitekim söz konusu şarttaki örneğin yüzeyinde belirgin bir yırtılma etkisi ortaya çıkmamaktadır (Şekil 104(a)-(c)). Bu durum çatlak oluşumu için gerekli plastik deformasyon seviyesine bu şartlarda ulaşmadığına işaret etmektedir. Nitekim iri taneli çeliğin tek fazlı iç yapısında çatlak başlangıcına neden olabilecek içyapısal düzensizlikler bulunmamaktadır. Bu nedenle, çatlak başlangıcının ancak plastik deformasyon ile dislokasyon birikimine dayalı olarak ortaya çıkması beklenmektedir. ÜİT yapıları çelik ise ÜES bölgesinde (-70°C'ye kadar) sahip olduğu yüksek akma dayanımı nedeniyle plastik deformasyona geçiş sürecinde daha çok enerji depolamaktadır. Plastik deformasyona geçişin tamamlanmasının ardından ise, yapıdaki yüksek dislokasyon yoğunluğu nedeniyle çatlak oluşumu gerçekleşmekte ve bu çatlaklar kesit boyunca ilerlemektedir. Çatlak ilerlemesi sürecinde ise yapıdaki yüksek oranda GATS'ları çatlağın yön değiştirmesine neden olacağından, çatlak ilerleme devresinde harcanana enerji değerinin artmasına yol açmaktadır. Bu durum ÜES bölgesindeki sıcaklıklarda uygulanan çentik darbe deneyleri sonrasında elde edilen kırılma yüzeylerindeki çukurcuk oluşumlarından da açık bir şekilde anlaşılmaktadır (Şekil 106(a)-(c) ve Şekil 107). Sonuç olarak 8E şartında uygulanan işlem sonrası elde edilen ÜİT yapıları çeliğin çatlak oluşumu ve ilerlemesi dahilinde harcadığı toplam enerji değeri, iri tane durumunda çatlak oluşumu için harcanan enerji değerinden daha yüksek olarak elde edilmektedir.

İri tane yapıli durum ile karşılaştırıldığında, UİT yapıli çeliğın sünek-gevrek geçiş davranışı nispeten daha düşük sıcaklık değerinde ortaya çıkmakta ve genel olarak sünek-gevrek geçiş eğrisi sola doğru (daha düşük sıcaklık değerine doğru) ötelenmektedir (Şekil 103). Ayrıca, söz konusu çeliğın hem geçiş bölgesindeki hem de AES bölgesindeki tokluk değerleri iri taneli çeliğinkinden daha yüksek olarak ölçölmektedir (Şekil 103 ve Tablo 13). UİT yapıli hale getirilen çeliğın sünek-gevrek geçiş davranışında ortaya çıkan bu radikal değişim, söz konusu çeliğın uygulanan aşırı plastik deformasyona bağlı olarak içyapısında meydana gelen değişimlere dayandırılarak açıklanabilir. Genel olarak HMK yapıli çeliklerde tane boyutunun azalmasıyla sünek-gevrek geçiş sıcaklığın da azaldığı bilinmektedir. [146, 147]. Bu durum ise tane incelmesinin klivaj tipindeki çatlakların oluşması ve ilerlemesine olan etkisinden kaynaklanmaktadır. Şöyle ki, iri taneli çelik örnekler  $-40^{\circ}\text{C}$ 'nin altındaki sıcaklıklarda gevrek türden bir kırılma olan tamamen klivaj tipi kırılmayla gerçekteşmektedir (Şekil 104-105). Buna bağlı olarak da tokluk değerleri hızlı bir şekilde düşmektedir (Tablo 13). Söz konusu sıcaklıklarda gerçekteşirilen test sonrasında ortaya çıkan kırılma yüzeylerinde de bu durum açık bir şekilde görölmektedir. Nitekim  $-40^{\circ}\text{C}$ 'den daha düşük sıcaklıklarda yapılan deneylerde, belirgin ve tüm kırılma yüzeyine hakim bir şekilde klivaj tipi kırılma izleri görölmektedir (Şekil 104(e)-(k), Şekil 105(e)-(o)). Bu durum EKAE öncesi yapıdaki çeliğın sahip olduğu iri tane yapısı nedeniyle klivaj çatlaklarının önemli bir yön değişimine uğramadan kolay bir şekilde bu düzlemleri takip ederek ilerleyebildiğı sonucunu doğurmaktadır [148]. Bu nedenle iri taneli çelikte klivaj tipi kırılmanın göröldüğü geçiş bölgesinde ve AES bölgesindeki tokluk değeri önemli oranda azalmaktadır. Öte yandan, EKAE işlemi ile elde edilen tane incelmesi ve yapıdaki GATS oranının artışı klivaj tipi kırılmaya neden olan çatlağın oluşması ve ilerlemesine karşı direncinde artmasına neden olmaktadır [147, 148]. Bu durum ise bir taraftan düşük test sıcaklıklarda UİT yapıli çeliğın sergilediğı tokluk değerini artırırken, diğer taraftan sünek-gevrek geçiş sıcaklığının da önemli oranda düşmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla, UİT yapıli çelik örnekler düşük sıcaklıklarda iri taneli yapıda etkin olan klivaj tipi kırılma mekanizmasının yerine farklı bir mekanizmayla kırılmaktadırlar. Çünkü aşırı orandaki tane incelmesi klivaj kırılma için gerekli çatlak ucu gerilme değerini artırmakta ve bu durum ise klivaj çatlağının oluşması için gerekli enerji değerinin daha yüksek olmasını gerektirmektedir [149]. Bu oluşum ise klivaj tipi çatlak ilerlemesi yerine belli oranda plastik deformasyona dayalı olarak gelişen çatlak ilerleme mekanizmasının hem sünek-gevrek geçiş bölgesinde hem de AES bölgesinde daha etkin olmasına neden

olmaktadır [150]. Ayrıca UİT yapılı çeliğin AES bölgesinde daha etkili olmak üzere düşük sıcaklıklarda elde edilen kırılma yüzeylerinde basamak tipi çatlak ilerleme bölgelerinin belirgin bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 106). Bu bölgelerin yüksek büyütmede kırılma resimlerinden de anlaşılabilceği gibi, basamak oluşumu daha pürüzsüz görünüme sahip yüzeyler ve çukurcuk içeren ayrılma bölgeleri içermektedir (Şekil 108-110). Çatlak ucunun basamak oluşumunun görüldüğü düzlemelere ulaşması halinde, çatlak ilerlemesinin yavaşladığı ve bunun ise özellikle düşük sıcaklıklarda tokluğun artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu oluşumun sünek-gevrek geçiş sıcaklığının düşmesine de ilave katkı sağladığı söylenebilir [147, 149]. Nitekim, EKAE öncesi durumdaki IF-çeliğinin kırılma yüzeyinde basamak oluşumu görülmezken, EKAE işlemi sonrasında özellikle AES bölgesinde belirgin bir şekilde mikro anlamda basamakların oluşması bu tespiti doğrulamaktadır (Şekil 108-111). Ayrıca, söz konusu ayrılma bölgelerinde çukurcuk oluşumu da bu düşüncüyü doğrulamaktadır. (Şekil 108-111). Kırılma yüzeyinde basamak oluşumu, literatürde UİT yapılı malzemelerin sünek-gevrek geçiş davranışının incelendiği çalışmalarda da görülmüştür ve bu durum büyük oranda tane incelenmesi ve yönlenece dayandırılarak açıklanmıştır [78, 147-149].

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kütleli ve sac formdaki IF-çeliğine uygulanan eş kanallı açısall ekstrüzyon (EKAE) ve eş kanallı açısall sac ekstrüzyonu (EKASE) işlemleri sonrasında, içyapı ve mekanik özelliklerde ortaya çıkan değişimler sistematik bir şekilde incelendi. Bu incelemelerden çıkarılan genel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Kütleli formdaki IF-çeliğine farklı rota ve paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi söz konusu çeliğin başlangıçta sahip olduğu iri taneli içyapısını incelterek mikron-altı tane boyutuna sahip yeni ultra-ince taneli (UİT) içyapıyı oluşturmaktadır. Farklı rotalarda uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi sonrasında söz konusu çeliğin ortalama tane boyutu 420nm-820nm aralığında değişmekte ve deformasyona dayalı olarak oluşan tane sınırları büyük oranda geniş açılı tane sınırı (GATS) karakterindedir. Ayrıca, tane incilmesi büyük oranda bir paso sonrasında ortaya çıkmakta ve paso sayısının (deformasyon miktarının) artırılması ile tane incilmesi daha düşük bir hızda devam etmektedir.
2. En küçük ortalama tane boyutu (420 nm) rota-Bc'de gerçekleştirilen 8 pasoluk EKAE işlemi sonrasında elde edilirken, bunu 530 nm ortalama tane boyutu ile rota-E, 550 nm ortalama tane boyutu ile rota-A'da ve 820 nm tane boyutu ile rota-C'de gerçekleştirilen 8 pasoluk EKAE işlemleri izlemektedir. Tane morfolojisi açısından bakıldığında Bc, C ve E rotalarında gerçekleştirilen işlemler sonrası nispeten daha eş eksenli bir tane yapısı elde edilirken, rota-A'da gerçekleştirilen işlem sonrası ise aratan paso sayısı ile etkinleşen yönelmiş ve uzamış bir tane morfolojisi ortaya çıkmaktadır.
3. Çok pasolu EKAE işlemi sonrası IF-çeliğinin içyapısında özellikle tane sınırları ve çevresinde dislokasyon yığınları oluşmakta ve tane içine doğru gidildikçe bu oluşum azalmaktadır.
4. Sac formundaki IF-çeliğine sürekli olarak aşırı plastik deformasyon uygulamak için geliştirilen EKASE işlemi sac formundaki IF-çeliğine başarı ile uygulanmıştır. IF-çeliği saclara uygulanan çok pasolu EKASE işlemi sonrasında ise kütleli forma göre daha düşük bir tane inceme etkisi oluşmaktadır. Uygulanan EKASE işlemi sonrasında IF-çeliği sacların içyapısında daha çok dar açılı tane sınırları (DATS) ile birbirinden ayrılan taneler oluşmaktadır.

5. Uygulanan EKAE işlemi IF-çeliğinin kristalografik yönelimi üzerinde önemli bir etki oluşturmaktadır. Bu etki bir pasoluk işlem sonrası belirgin bir şekilde ortaya çıkmakta ve artan paso sayısı ile önemli bir değişim sergilememektedir. EKAE öncesi durumda, haddelenerek üretilmiş IF-çeliğinin yapısında  $\{112\}\langle 110\rangle$  kristalografik yönelim bileşenleri ortaya çıkmaktadır. Bir paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrasında ise  $\{110\}\langle 112\rangle$  ve  $\{112\}\langle 111\rangle$  bileşenlerinde oluşan bir kristalografik yönelim ortaya çıkmaktadır. Bu yönelim 8C, 8E ve 8Bc şartlarında uygulanan EKAE işlemleri sonrasında da görülmektedir. Ancak 8Bc şartındaki çeliğin yapısında,  $\{112\}\langle 111\rangle$  sistemine ait bileşenlerin daha yüksek şiddette ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. 8A şartında uygulanan işlem sonrasında ise sadece  $\{112\}\langle 111\rangle$  bileşenlerinin çok keskin bir şekilde oluştuğu bir kristalografik yönelim ortaya çıktığı anlaşılmaktadır.
6. Kütlesel formdaki IF-çeliğine uygulanan EKAE işlemi söz konusu çeliğin mukavemet değerlerinde çok yüksek oranlarda artışa neden olurken, süneklik değerlerini ise azaltmaktadır. Mukavemet değerlerindeki artış ilk paso sonrasında daha belirgin olarak ortaya çıkmakta ve artan paso sayısı ile birlikte artış hızı azalarak devam etmektedir. Farklı rotalarda uygulanan 8 pasoluk EKAE işlemi çeliğin 106 MPa olan akma dayanımı değerini 6-7 kat artırmaktadır. Mukavemet değerlerinde elde edilen bu yüksek artış, tane boyutu sertleşmesi (Hall-Petch etkisi) ve dislokasyon sertleşmesi etkilerinin birlikte ortaya çıkmasından kaynaklanmaktadır. İri taneli başlangıç durumunda %53 olan kopma uzaması değeri, UİT yapısının oluşmasıyla %9-%16 aralığında değerler almaktadır. Süneklik değerlerinde meydana gelen azalma ise, UİT yapıları çeliğin sergilediği yetersiz pekleşme davranışından kaynaklanan deformasyon lokalizasyonu nedeniyle ortaya çıkmaktadır.
7. Mukavemet değerlerinde elde edilen artış, işlem sırasında elde edilen tane boyutu inceliğiyle orantılı olarak gelişmektedir. En küçük tane boyutunun elde edildiği 8Bc şartlarında uygulanan işlem sonrası en yüksek mukavemet değerleri elde edilirken, en düşük mukavemet değeri ise en büyük tane boyutunun meydana geldiği 8C'de uygulanan işlem sonrası oluşmaktadır.
8. Sac formda IF-çeliğine uygulanan EKASE işlemi sonrasında mukavemet değerlerinde artış, süneklik değerlerinde ise yine azalma olmaktadır. EKASE işlemi öncesinde 194 MPa akma dayanımı değerleri, 8 paso sayısında uygulanan EKASE işlemi sonrasında 2,5 kat artarak 516 MPa değerine çıkmaktadır. EKASE işlemi öncesinde, %53 olan kopma uzaması değeri ise azalarak yaklaşık %10-%11 aralığında değerler almaktadır.

9. EKAE işlemi sonrasında IF-çeliğinde yeniden kristalleşmenin başladığı sıcaklık uygulanan paso sayısına ve EKAE rotasına göre değişmektedir. Bir paso sayısında uygulanan işlem sonrasında yeniden kristalleşme 550°C'de başlarken, bu değer genelde uygulanan rota ve paso sayısına da bağlı olarak azalmaktadır. Rota-C, rota-Bc ve rota-E'de 8 paso sayısında uygulanan EKAE işlemi sonrasında yeniden kristalleşmenin başladığı sıcaklık değeri 450°'ye kadar düşmektedir. Rota-A'da aynı paso sayısında uygulanan işlem sonrasında ise yeniden kristalleşme daha düşük bir değer olan 400°C'de başlamaktadır. Bütün şartlarda uygulanan EKAE işlemi sonrası yeniden kristalleşme sıcaklığı değişmemekte ve 650°C olarak gerçekleşmektedir.
10. Farklı rotalarda 8 paso sayısında EKAE işlemi uygulanmış durumdaki IF-çeliği 600°C'de tavlandığında, yeniden kristalleşme hızlı bir şekilde başlamakta ve artan tavlama süresi ile bu hız azalarak yapının tamamı yaklaşık 480 dakika sonrası yeniden kristalleşmektedir.
11. EKAE işlemi uygulanmış durumdaki UİT yapıları IF-çeliğinin mukavemet değeri artan tavlama sıcaklığı ile azalmakta, süneklik değerleri ise artmaktadır. Uygulama açısından, rota-E'de 8 paso sayısında EKAE uygulanmış durumdaki IF-çeliğinin 600°C'de bir saat süre ile tavlama ile en uygun mukavemet-süneklik dengesi elde edilmektedir. Söz konusu tavlama işlemi sonrasında IF-çeliğinin akma dayanımı, çekme dayanımı, üniform uzama ve kopma uzaması değerleri sırasıyla 320 MPa, 416 MPa, % 16,3 ve %40,0 olarak gerçekleşmektedir.
12. Kütleli formdaki IF-çeliğine uygulanan EKAE işlemi, iri taneli çeliğin sahip olduğu yüksek şekillendirilebilirlik özelliğini, işlem sonrasında azalan deformasyon sertleşme kabiliyeti nedeniyle belli oranda azaltmaktadır. EKAE işlemi sonrası artan mukavemet değeri bu çeliğin şekillendirilebilmesi için gerekli zımba kuvvetinin de artmasına neden olmaktadır. Uygulama rotaları karşılaştırıldığında, 8 paso sonrası en düşük şekillendirilebilirlik rota-A'da gerçekleştirilen işlem sonrası, en yüksek şekillendirilebilirlik ise rota-C'de uygulanan işlem sonrası elde edilmektedir.
13. EKAE işlemi sonrası farklı sıcaklık ve sürelerde uygulanan tavlama, IF-çeliğinin şekillendirilebilirlik kabiliyetini uygulanan rotadan bağımsız olarak yeniden iyileştirmektedir. Bu durum EKAE işlemi öncesinde azalan deformasyon sertleşme kabiliyetinin tavlama işlemleri ile yeniden geri kazanılmasına dayandırılmaktadır. Mukavemet-şekillendirilebilirlik optimizasyonu açısından bakıldığında, UİT yapıları

çeliğin 600°C’de en az 30 dakika tavlmasının gerekli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

14. EKAE öncesi iri tane yapılı çeliğe uygulanan Erichsen testi sonrası örnek yüzeyinde belirgin bir şekilde ortaya çıkan ve “portakal kabuğu etkisi” olarak bilinen yüzeysel pürüzleşme, UİT yapısının oluşması sonrası önemli oranda ortadan kalkmaktadır. Özellikle tavllanmış durumdaki UİT çelik Erichsen deneyleri sonrasında çok daha pürüzsüz bir deformasyon yüzeyi sergilemektedirler. Bu durum, EKAE sonrasında uygulanacak uygun bir tavlama işlemi ile kolayca şekillendirilebilir ve mükemmel yüzey kalitesine sahip çeliklerin üretilebileceğini göstermektedir.
15. Uygulanan çok pasolu EKAE işlemi IF-çeliğinin oda sıcaklığı çevresindeki tokluk değerinin, 8E şartında işleme tabi tutulan çelik hariç azaltmaktadır.
16. Uygulanan EKAE işlemi IF-çeliğinin sünek-gevrek geçiş davranışını önemli oranda iyileştirmektedir. 8E şartlarında uygulanan EKAE işlemi, iri taneli başlangıç malzemesinin sahip olduğu -40 °C’lik geçiş sıcaklığını önemli oranda azaltarak -90 °C’ye ötelemektedir. Ayrıca başlangıç durumunda daha dik bir sünek-gevrek geçiş karakteristiği gösteren eğri, uygulanan EKAE işlemi sonrasında belli oranda yatıklaşarak daha kontrollü bir sünek-gevrek geçişi sağlamaktadır. Bu durum UİT yapı oluşumu ile başlangıçta etkin olan klivaj tipi kırılma mekanizmasının değişerek basamaklı bir kırılma davranışının daha etkili olmasından kaynaklanmaktadır.

## 6. ÖNERİLER

1. IF-çeliğine EKAE işlemleri daha yüksek sıcaklıklarda uygulanarak mukavemet-süneklik optimizasyonu açısından uygun işlem sıcaklığı belirlenebilir.
2. EKAE ile üretilmiş UİT yapıları IF-çeliğinin farklı deney sıcaklıklarında mekanik özellikleri incelenebilir.
3. Şekillendirilebilirlik özelliklerinin incelenmesinde, sonlu elemanlar yöntemi gibi hesaplamalı yaklaşımlar kullanılabilir.
4. EKAE ile üretilmiş UİT yapıları IF-çeliğinin sünek-gevrek geçişi davranışına toparlanma ve yeniden kristalleşmenin etkisi incelenebilir.
5. Farklı EKAE rotalarında elde edilen UİT yapıları IF-çeliğinin farklı gerilme koşulları altındaki çatlak ilerleme hızı deneysel olarak incelenebilir.



## 7. KAYNAKLAR

1. Hoile, S., Processing and Properties of Mild Interstitial Free Steels, Materials Science and Technology, 16 (2000) 1079-1093.
2. Wang, Z. ve Wang, X., A New Technology to Improve the  $\delta$ -Value of Interstitial-Free (IF) Steel Sheet, Journal of Materials Processing Technology, 113 (2001) 659-661.
3. Samajdar, I., Verlinden, B. ve Van Houtte, P., Development of Recrystallization Texture in IF-Steel: An Effort to Explain Developments in Global Texture from Microtextural Studies, Acta Materialia, 46 (1998) 2751-2763.
4. Gupta, A.K. ve Ravi Kumar, D., Formability of Galvanized Interstitial-Free Steel Sheets, Journal of Materials Processing Technology, 172 (2006) 225-237.
5. Saha, R. ve Ray, R., Texture and Grain Boundary Character of a Ti + Nb-IF Steel after Large Cold Rolling Reductions, Journal of Materials Science, 42 (2007) 9548-9552.
6. Saray, O., Purcek, G., Karaman, I., Neindorf, T. ve Maier, H.J., Equal-Channel Angular Sheet Extrusion of Interstitial-Free (IF) Steel: Microstructural Evolution and Mechanical Properties, Materials Science and Engineering A, 528 (2011) 6573-6583.
7. Valiev, R.Z. ve Langdon, T.G., Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement, Progress in Materials Science, 51 (2006) 881-981.
8. Azushima, A., Kopp, R., Korhonen, A., Yang, D.Y., Micari, F., Lahoti, G.D., Groche, P., Yanagimoto, J., Tsuji, N., Rosochowski, A. ve Yanagida, A., Severe Plastic Deformation (SPD) Processes for Metals, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 57 (2008) 716-735.
9. Valiev, R.Z., Islamgaliev, R.K. ve Alexandrov, I.V., Bulk Nanostructured Materials from Severe Plastic Deformation, Progress in Materials Science, 45 (2000) 103-189.
10. Rosochowski, A., Processing Metals by Severe Plastic Deformation, Solid State Phenomena, 101-102 (2005) 9.
11. Mishra, R.S., Ma, Z.Y. ve Charit, I., Friction Stir Processing: A Novel Technique for Fabrication of Surface Composite, Materials Science and Engineering A, 341 (2003) 307-310.
12. Segal, V.M., Materials Processing by Simple Shear, Materials Science and Engineering A, 197 (1995) 157-164.
13. Kim, H.S., Seo, M.H. ve Hong, S.I., Plastic Deformation Analysis of Metals During Equal Channel Angular Pressing, Journal of Materials Processing Technology, 113 (2001) 622-626.

14. Lowe, T.C. ve Zhu, Y.T., Commercialization of Nanostructured Metals Produced by Severe Plastic Deformation Processing, Advanced Engineering Materials, 5 (2003) 373-378.
15. Zhu, Y.T., Lowe, T.C. ve Langdon, T.G., Performance and Applications of Nanostructured Materials Produced by Severe Plastic Deformation, Scripta Materialia, 51 (2004) 825-830.
16. Yoon, S.C., Quang, P., Hong, S.I. ve Kim, H.S., Die Design for Homogeneous Plastic Deformation During Equal Channel Angular Pressing, Journal of Materials Processing Technology, 187-188 (2007) 46-50.
17. Dumoulin, S., Roven, H.J., Werenskiold, J.C. ve Valberg, H.S., Finite Element Modeling of Equal Channel Angular Pressing: Effect of Material Properties, Friction and Die Geometry, Materials Science and Engineering A, 410-411 (2005) 248-251.
18. Segal, V.M., Engineering and Commercialization of Equal Channel Angular Extrusion (ECAE), Materials Science and Engineering A, 386 (2004) 269-276.
19. Kim, H.S., Seo, M.H. ve Hong, S.I., On the Die Corner Gap Formation in Equal Channel Angular Pressing, Materials Science and Engineering A, 291 (2000) 86-90.
20. Iwahashi, Y., Wang, J., Horita, Z., Nemoto, M. ve Langdon, T.G., Principle of Equal-Channel Angular Pressing for the Processing of Ultra-Fine Grained Materials, Scripta Materialia, 35 (1996) 143-146.
21. Gholinia, A., Prangnell, P.B. ve Markushev, M.V., The Effect of Strain Path on the Development of Deformation Structures in Severely Deformed Aluminium Alloys Processed by ECAE, Acta Materialia, 48 (2000) 1115-1130.
22. Furukawa, M., Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M. ve Langdon, T.G., The Shearing Characteristics Associated with Equal-Channel Angular Pressing, Materials Science and Engineering A, 257 (1998) 328-332.
23. Barber, R.E., Dudo, T., Yasskin, P.B. ve Hartwig, K.T., Product Yield for ECAE Processing, Scripta Materialia, 51 (2004) 373-377.
24. Yamashita, A., Horita, Z. ve Langdon, T.G., Improving the Mechanical Properties of Magnesium and a Magnesium Alloy through Severe Plastic Deformation, Materials Science and Engineering A, 300 (2001) 142-147.
25. Yamashita, A., Yamaguchi, D., Horita, Z. ve Langdon, T.G., Influence of Pressing Temperature on Microstructural Development in Equal-Channel Angular Pressing, Materials Science and Engineering A, 287 (2000) 100-106.
26. Chen, Y.C., Huang, Y.Y., Chang, C.P. ve Kao, P.W., The Effect of Extrusion Temperature on the Development of Deformation Microstructures in 5052 Aluminium Alloy Processed by Equal Channel Angular Extrusion, Acta Materialia, 51 (2003) 2005-2015.

27. Tsuji, N., Matsubara, Y. ve Saito, Y., Dynamic Recrystallization of Ferrite in Interstitial Free Steel, Scripta Materialia, 37 (1997) 477-484.
28. Belyakov, A., Miura, H. ve Sakai, T., Dynamic Recrystallization in Ultra Fine-Grained 304 Stainless Steel, Scripta Materialia, 43 (2000) 21-26.
29. Sakai, T., Miura, H. ve Yang, X., Ultrafine Grain Formation in Face Centered Cubic Metals During Severe Plastic Deformation, Materials Science and Engineering A, 499 (2009) 2-6.
30. Shin, D.H., Pak, J.-J., Kim, Y.K., Park, K.-T. ve Kim, Y.-S., Effect of Pressing Temperature on Microstructure and Tensile Behavior of Low Carbon Steels Processed by Equal Channel Angular Pressing, Materials Science and Engineering A, 325 (2002) 31-37.
31. Stolyarov, V.V., Lapovok, R., Brodova, I.G. ve Thomson, P.F., Ultrafine-Grained Al-5 Wt.% Fe Alloy Processed by ECAP with Backpressure, Materials Science and Engineering A, 357 (2003) 159-167.
32. Lapovok, R.Y., The Role of Back-Pressure in Equal Channel Angular Extrusion, Journal of Materials Science, 40 (2005) 341-346.
33. Agnew, S.R., Horton, J.A., Lillo, T.M. ve Brown, D.W., Enhanced Ductility in Strongly Textured Magnesium Produced by Equal Channel Angular Processing, Scripta Materialia, 50 (2004) 377-381.
34. Xia, K., Wang, J.T., Wu, X., Chen, G. ve Gurvan, M., Equal Channel Angular Pressing of Magnesium Alloy AZ31, Materials Science and Engineering A, 410-411 (2005) 324-327.
35. McKenzie, P.W.J., Lapovok, R. ve Estrin, Y., The Influence of Back Pressure on ECAP Processed AA 6016: Modeling and Experiment, Acta Materialia, 55 (2007) 2985-2993.
36. Doherty, R.D., Hughes, D.A., Humphreys, F.J., Jonas, J.J., Jensen, D.J., Kassner, M.E., King, W.E., McNelley, T.R., McQueen, H.J. ve Rollett, A.D., Current Issues in Recrystallization: A Review, Materials Science and Engineering A, 238 (1997) 219-274.
37. Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M. ve Langdon, T.G., The Process of Grain Refinement in Equal-Channel Angular Pressing, Acta Materialia, 46 (1998) 3317-3331.
38. Zhu, Y.T. ve Lowe, T.C., Observations and Issues on Mechanisms of Grain Refinement During ECAP Process, Materials Science and Engineering A, 291 (2000) 46-53.
39. Prangnell, P.B., Bowen, J.R. ve Apps, P.J., Ultra-Fine Grain Structures in Aluminium Alloys by Severe Deformation Processing, Materials Science and Engineering A, 375-377 (2004) 178-185.

40. De Messemaeker, J., Verlinden, B. ve Van Humbeeck, J., On the Strength of Boundaries in Submicron IF Steel, Materials Letters, 58 (2004) 3782-3786.
41. Xue, Q., Beyerlein, I.J., Alexander, D.J. ve Gray Iii, G.T., Mechanisms for Initial Grain Refinement in OFHC Copper During Equal Channel Angular Pressing, Acta Materialia, 55 (2007) 655-668.
42. Hughes, D.A. ve Hansen, N., High Angle Boundaries Formed by Grain Subdivision Mechanisms, Acta Materialia, 45 (1997) 3871-3886.
43. Hurley, P.J. ve Humphreys, F.J., The Application of Ebsd to the Study of Substructural Development in a Cold Rolled Single-Phase Aluminium Alloy, Acta Materialia, 51 (2003) 1087-1102.
44. Su, C.W., Lu, L. ve Lai, M.O., A Model for the Grain Refinement Mechanism in Equal Channel Angular Pressing of Mg Alloy from Microstructural Studies, Materials Science and Engineering A, 434 (2006) 227-236.
45. Naydenkin, E.V. ve Grabovetskaya, G.P., Deformation Behavior and Plastic Strain Localization of Nanostructured Materials Produced by Severe Plastic Deformation, Materials Science Forum, 633-634 (2010) 107-119.
46. Kim, W.J., An, C.W., Kim, Y.S. ve Hong, S.I., Mechanical Properties and Microstructures of an Az61 Mg Alloy Produced by Equal Channel Angular Pressing, Scripta Materialia, 47 (2002) 39-44.
47. Saray, O. ve Purcek, G., Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Al-40 wt.%Zn Alloy Processed by Equal-Channel Angular Extrusion, Journal of Materials Processing Technology, 209 (2009) 2488-2498.
48. Purcek, G., Saray, O., Kul, O., Karaman, I., Yapici, G.G., Haouaoui, M. ve Maier, H.J., Mechanical and Wear Properties of Ultrafine-Grained Pure Ti Produced by Multi-Pass Equal-Channel Angular Extrusion, Materials Science and Engineering A, 517 (2009) 97-104.
49. Purcek, G., Saray, O., Kucukomeroglu, T., Haouaoui, M. ve Karaman, I., Effect of Equal-Channel Angular Extrusion on the Mechanical and Tribological Properties of as-Cast Zn-40Al-2Cu-2Si Alloy, Materials Science and Engineering A, 527 (2010) 3480-3488.
50. Purcek, G., Saray, O., Karaman, I. ve Kucukomeroglu, T., Effect of Severe Plastic Deformation on Tensile Properties and Impact Toughness of Two-Phase Zn-40Al Alloy, Materials Science and Engineering A, 490 (2008) 403-410.
51. Purcek, G., Altan, B.S., Miskioglu, I. ve Ooi, P.H., Processing of Eutectic Zn-5% Al Alloy by Equal-Channel Angular Pressing, Journal of Materials Processing Technology, 148 (2004) 279-287.
52. Pürçek, G., Improvement of Mechanical Properties for Zn-Al Alloys Using Equal-Channel Angular Pressing, Journal of Materials Processing Technology, 169 (2005) 242-248.

53. Mukai, T., Yamanoi, M., Watanabe, H. ve Higashi, K., Ductility Enhancement in AZ31 Magnesium Alloy by Controlling Its Grain Structure, Scripta Materialia, 45 (2001) 89-94.
54. Yu, C.Y., Kao, P.W. ve Chang, C.P., Transition of Tensile Deformation Behaviors in Ultrafine-Grained Aluminum, Acta Materialia, 53 (2005) 4019-4028.
55. Krasilnikov, N., Lojkowski, W., Pakiela, Z. ve Valiev, R., Tensile Strength and Ductility of Ultra-Fine-Grained Nickel Processed by Severe Plastic Deformation, Materials Science and Engineering A, 397 (2005) 330-337.
56. Lugo, N., Llorca, N., Cabrera, J.M. ve Horita, Z., Microstructures and Mechanical Properties of Pure Copper Deformed Severely by Equal-Channel Angular Pressing and High Pressure Torsion, Materials Science and Engineering A, 477 (2008) 366-371.
57. Edalati, K., Fujioka, T. ve Horita, Z., Microstructure and Mechanical Properties of Pure Cu Processed by High-Pressure Torsion, Materials Science and Engineering A, 497 (2008) 168-173.
58. Han, B., Mohamed, F. ve Lavernia, E., Mechanical Properties of Iron Processed by Severe Plastic Deformation, Metallurgical and Materials Transactions A, 34 (2003) 71-83.
59. Wei, Q., Jiao, T., Mathaudhu, S.N., Ma, E., Hartwig, K.T. ve Ramesh, K.T., Microstructure and Mechanical Properties of Tantalum after Equal Channel Angular Extrusion (ECAE), Materials Science and Engineering A, 358 (2003) 266-272.
60. Purcek, G., Yapici, G.G., Karaman, I. ve Maier, H.J., Effect of Commercial Purity Levels on the Mechanical Properties of Ultrafine-Grained Titanium, Materials Science and Engineering A, 528 (2011) 2303-2308.
61. Hughes, D.A. ve Hansen, N., Microstructure and Strength of Nickel at Large Strains, Acta Materialia, 48 (2000) 2985-3004.
62. Li, S., Gazder, A.A., Beyerlein, I.J., Pereloma, E.V. ve Davies, C.H.J., Effect of Processing Route on Microstructure and Texture Development in Equal Channel Angular Extrusion of Interstitial-Free Steel, Acta Materialia, 54 (2006) 1087-1100.
63. Wang, Y.M. ve Ma, E., Three Strategies to Achieve Uniform Tensile Deformation in a Nanostructured Metal, Acta Materialia, 52 (2004) 1699-1709.
64. Hansen, N. ve Ralph, B., The Strain and Grain Size Dependence of the Flow Stress of Copper, Acta Metallurgica, 30 (1982) 411-417.
65. Wei, Y.L., Godfrey, A., Liu, W., Liu, Q., Huang, X., Hansen, N. ve Winther, G., Dislocations, Boundaries and Slip Systems in Cube Grains of Rolled Aluminium, Scripta Materialia, 65 (2011) 355-358.

66. Tsuji, N., Kamikawa, N., Ueji, R., Takata, N., Koyama, H. ve Terada, D., Managing Both Strength and Ductility in Ultrafine Grained Steels, ISIJ international, 48 (2008) 1114-1121.
67. McFadden, S.X., Mishra, R.S., Valiev, R.Z., Zhilyaev, A.P. ve Mukherjee, A.K., Low-Temperature Superplasticity in Nanostructured Nickel and Metal Alloys, Nature, 398 (1999) 684-686.
68. Wang, Y., Chen, M., Zhou, F. ve Ma, E., High Tensile Ductility in a Nanostructured Metal, Nature, 419 (2002) 912-915.
69. Wang, Y.M. ve Ma, E., Strain Hardening, Strain Rate Sensitivity, and Ductility of Nanostructured Metals, Materials Science and Engineering A, 375-377 (2004) 46-52.
70. Höppel, H.W., Kautz, M., Xu, C., Murashkin, M., Langdon, T.G., Valiev, R.Z. ve Mughrabi, H., An Overview: Fatigue Behaviour of Ultrafine-Grained Metals and Alloys, International Journal of Fatigue, 28 (2006) 1001-1010.
71. Kim, W.-J., Hyun, C.-Y. ve Kim, H.-K., Fatigue Strength of Ultrafine-Grained Pure Ti after Severe Plastic Deformation, Scripta Materialia, 54 (2006) 1745-1750.
72. Agnew, S.R. ve Weertman, J.R., Cyclic Softening of Ultrafine Grain Copper, Materials Science and Engineering A, 244 (1998) 145-153.
73. Vinogradov, A., Hashimoto, S. ve Kopylov, V.I., Enhanced Strength and Fatigue Life of Ultra-Fine Grain Fe-36Ni Invar Alloy, Materials Science and Engineering A, 355 (2003) 277-285.
74. Vinogradov, A., Nagasaki, S., Patlan, V., Kitagawa, K. ve Kawazoe, M., Fatigue Properties of 5056 Al-Mg Alloy Produced by Equal-Channel Angular Pressing, Nanostructured Materials, 11 (1999) 925-934.
75. Ma, A., Suzuki, K., Saito, N., Nishida, Y., Takagi, M., Shigematsu, I. ve Iwata, H., Impact Toughness of an Ingot Hypereutectic Al-23 mass% Si Alloy Improved by Rotary-Die Equal-Channel Angular Pressing, Materials Science and Engineering A, 399 (2005) 181-189.
76. Meyer, L.W., Sommer, K., Halle, T. ve Hockauf, M., Microstructure and Mechanical Properties Affecting Crack Growth Behaviour in AA6060 Produced by Equal-Channel Angular Extrusion, Materials Science Forum, 584-586 (2008) 815-820.
77. Stolyarov, V.V., Valiev, R.Z. ve Zhu, Y.T., Enhanced Low-Temperature Impact Toughness of Nanostructured Ti, AIP, 2006.
78. Song, R., Ponge, D. ve Raabe, D., Mechanical Properties of an Ultrafine Grained C-Mn Steel Processed by Warm Deformation and Annealing, Acta Materialia, 53 (2005) 4881-4892.
79. Yanagida, A., Joko, K. ve Azushima, A., Formability of Steels Subjected to Cold ECAE Process, Journal of Materials Processing Technology, 201 (2008) 390-394.

80. Engel, U. ve Eckstein, R., Microforming-from Basic Research to Its Realization, Journal of Materials Processing Technology, 125-126 (2002) 35-44.
81. Rosochowski, A., Presz, W., Olejnik, L. ve Richert, M., Micro-Extrusion of Ultra-Fine Grained Aluminium, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 33 (2007) 137-146.
82. Topic, I., Höppel, H.W., Staud, D., Merklein, M., Geiger, M. ve Göken, M., Formability of Accumulative Roll Bonded Aluminum AA1050 and AA6016 Investigated Using Bulge Tests, Advanced Engineering Materials, 10 (2008) 1101-1109.
83. Lapovok, R., McKenzie, P., Thomson, P. ve Semiatin, S., Processing and Properties of Ultrafine-Grain Aluminum Alloy 5005 Sheet, Journal of Materials Science, 42 (2007) 1649-1659.
84. Lapovok, R., Timokhina, I., McKenzie, P.W.J. ve O'Donnell, R., Processing and Properties of Ultrafine-Grain Aluminium Alloy 6111 Sheet, Journal of Materials Processing Technology, 200 (2008) 441-450.
85. Ma, X., Lapovok, R., Gu, C., Molotnikov, A., Estrin, Y., Pereloma, E., Davies, C. ve Hodgson, P., Deep Drawing Behaviour of Ultrafine Grained Copper: Modelling and Experiment, Journal of Materials Science, 44 (2009) 3807-3812.
86. Yoda, R., Shibata, K., Morimitsu, T., Terada, D. ve Tsuji, N., Formability of Ultrafine-Grained Interstitial-Free Steel Fabricated by Accumulative Roll-Bonding and Subsequent Annealing, Scripta Materialia, 65 (2011) 175-178.
87. Horita, Z., Furukawa, M., Nemoto, M., Barnes, A.J. ve Langdon, T.G., Superplastic Forming at High Strain Rates after Severe Plastic Deformation, Acta Materialia, 48 (2000) 3633-3640.
88. Furukawa, M., Ma, Y., Horita, Z., Nemoto, M., Valiev, R.Z. ve Langdon, T.G., Microstructural Characteristics and Superplastic Ductility in a Zn-22% Al Alloy with Submicrometer Grain Size, Materials Science and Engineering A, 241 (1998) 122-128.
89. Valiev, R.Z., Salimonenko, D.A., Tsenev, N.K., Berbon, P.B. ve Langdon, T.G., Observations of High Strain Rate Superplasticity in Commercial Aluminum Alloys with Ultrafine Grain Sizes, Scripta Materialia, 37 (1997) 1945-1950.
90. Muñoz-Morris, M.A., Garcia Oca, C., Gonzalez-Doncel, G. ve Morris, D.G., Microstructural Evolution of Dilute Al-Mg Alloys During Processing by Equal Channel Angular Pressing and During Subsequent Annealing, Materials Science and Engineering A, 375-377 (2004) 853-856.
91. Neishi, K., Horita, Z. ve Langdon, T.G., Achieving Superplasticity in Ultrafine-Grained Copper: Influence of Zn and Zr Additions, Materials Science and Engineering A, 352 (2003) 129-135.

92. Neishi, K., Horita, Z. ve Langdon, T.G., Achieving Superplasticity in a Cu–40%Zn Alloy through Severe Plastic Deformation, Scripta Materialia, 45 (2001) 965-970.
93. Stolyarov, V.V., Zhu, Y.T., Raab, G.I., Zharikov, A.I. ve Valiev, R.Z., Effect of Initial Microstructure on the Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Ti During Cold Rolling, Materials Science and Engineering A, 385 (2004) 309-313.
94. Chaudhury, P.K., Cherukuri, B. ve Srinivasan, R., Scaling up of Equal-Channel Angular Pressing and Its Effect on Mechanical Properties, Microstructure, and Hot Workability of AA 6061, Materials Science and Engineering A, 410-411 (2005) 316-318.
95. Raab, G.J., Valiev, R.Z., Lowe, T.C. ve Zhu, Y.T., Continuous Processing of Ultrafine Grained Al by ECAP-Conform, Materials Science and Engineering A, 382 (2004) 30-34.
96. Utsunomiya, H., Hatsuda, K., Sakai, T. ve Saito, Y., Continuous Grain Refinement of Aluminum Strip by Conshearing, Materials Science and Engineering A, 372 (2004) 199-206.
97. Huang, Y. ve Prangnell, P.B., Continuous Frictional Angular Extrusion and Its Application in the Production of Ultrafine-Grained Sheet Metals, Scripta Materialia, 56 (2007) 333-336.
98. Valiev, R.Z., Semenova, I.P., Latysh, V.V., Rack, H., Lowe, T.C., Petruzalka, J., Dluhos, L., Hrusak, D. ve Sochova, J., Nanostructured Titanium for Biomedical Applications, Advanced Engineering Materials, 10 (2008) B15-B17.
99. Geiger, M., Kleiner, M., Eckstein, R., Tiesler, N. ve Engel, U., Microforming, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 50 (2001) 445-462.
100. Banerjee, K., Verma, A. ve Venugopalan, T., Improvement of Drawability of Titanium-Stabilized Interstitial-Free Steel by Optimization of Process Parameters and Texture, Metallurgical and Materials Transactions A, 39 (2008) 1410-1425.
101. Jeong, W., Strength and Formability of Ultra-Low-Carbon Ti-IF Steels, Metallurgical and Materials Transactions A, 31 (2000) 1305-1307.
102. Bowen, J.R., Gholinia, A., Roberts, S.M. ve Prangnell, P.B., Analysis of the Billet Deformation Behaviour in Equal Channel Angular Extrusion, Materials Science and Engineering A, 287 (2000) 87-99.
103. Gazder, A.A., Cao, W., Davies, C.H.J. ve Pereloma, E.V., An EBSD Investigation of Interstitial-Free Steel Subjected to Equal Channel Angular Extrusion, Materials Science and Engineering A, 497 (2008) 341-352.
104. Bhowmik, A., Biswas, S., Suwas, S., Ray, R.K. ve Bhattacharjee, D., Evolution of Grain-Boundary Microstructure and Texture in Interstitial-Free Steel Processed by Equal-Channel Angular Extrusion, Metallurgical and Materials Transactions A, 40 (2009) 2729-2742.



105. Li, S., Beyerlein, I.J. ve Bourke, M.A.M., Texture Formation During Equal Channel Angular Extrusion of FCC and BCC Materials: Comparison with Simple Shear, Materials Science and Engineering A, 394 (2005) 66-77.
106. De Messemaeker, J., Verlinden, B. ve Van Humbeeck, J., Texture of IF Steel after Equal Channel Angular Pressing (ECAP), Acta Materialia, 53 (2005) 4245-4257.
107. Beyerlein, I.J. ve Tóth, L.S., Texture Evolution in Equal-Channel Angular Extrusion, Progress in Materials Science, 54 (2009) 427-510.
108. Gibbs, M.A., Hartwig, K.T., Cornwell, L.R., Goforth, R.E. ve Payzant, E.A., Texture Formation in Bulk Iron Processed by Simple Shear, Scripta Materialia, 39 (1998) 1699-1704.
109. Kim, H.S., Ryu, W.S., Janecek, M., Baik, S.C. ve Estrin, Y., Effect of Equal Channel Angular Pressing on Microstructure and Mechanical Properties of IF Steel, Advanced Engineering Materials, 7 (2005) 43-46.
110. Niendorf, T., Canadinc, D., Maier, H.J., Karaman, I. ve Sutter, S.G., On the Fatigue Behavior of Ultrafine-Grained Interstitial-Free Steel, International Journal of Materials Research, 97 (2006) 1328-1336.
111. Niendorf, T., Canadinc, D., Maier, H.J. ve Karaman, I., On the Microstructural Stability of Ultrafine-Grained Interstitial-Free Steel under Cyclic Loading, Metallurgical and Materials Transactions A, 38 (2007) 1946-1955.
112. Niendorf, T., Canadinc, D., Maier, H.J. ve Karaman, I., The Role of Heat Treatment on the Cyclic Stress-Strain Response of Ultrafine-Grained Interstitial-Free Steel, International Journal of Fatigue, 30 (2008) 426-436.
113. Niendorf, T., Rubitschek, F., Maier, H., Canadinc, D. ve Karaman, I., On the Fatigue Crack Growth–Microstructure Relationship in Ultrafine-Grained Interstitial-Free Steel, Journal of Materials Science, 45 (2010) 4813-4821.
114. Niendorf, T., Maier, H.J., Canadinc, D. ve Karaman, I., Cyclic Stability of Ultrafine-Grained Interstitial-Free Steel at Elevated Temperatures, Materials Science and Engineering A, 503 (2009) 160-162.
115. Bramfitt, B.L. ve Benschoter, A.O., Metallographer's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels, ASM International, 2002.
116. Humphreys, F.J. ve Hatherly, M., Recrystallization and Related Annealing Phenomena, Elsevier Science & Tech, 2004.
117. Gazder, A.A., Torre, F.D., Gu, C.F., Davies, C.H.J. ve Pereloma, E.V., Microstructure and Texture Evolution of BCC and FCC Metals Subjected to Equal Channel Angular Extrusion, Materials Science and Engineering A, 415 (2006) 126-139.
118. Zhao, Y., Topping, T., Li, Y. ve Lavernia, E.J., Strength and Ductility of Bi-Modal Cu, Advanced Engineering Materials, 13 (2011) 865-871.

119. Momeni, A., Dehghani, K., Ebrahimi, G. ve Keshmiri, H., Modeling the Flow Curve Characteristics of 410 Martensitic Stainless Steel under Hot Working Condition, Metallurgical and Materials Transactions A, 41 (2010) 2898-2904.
120. Mandal, S., Sivaprasad, P. ve Dube, R., Kinetics, Mechanism and Modelling of Microstructural Evolution During Thermomechanical Processing of a 15Cr–15Ni–2.2Mo–Ti Modified Austenitic Stainless Steel, Journal of Materials Science, 42 (2007) 2724-2734.
121. Fleury, E. ve Ha, J.S., Small Punch Tests to Estimate the Mechanical Properties of Steels for Steam Power Plant: I. Mechanical Strength, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 75 (1998) 699-706.
122. Manahan, M.P., Browning, A.E., Argon, A.E. ve Harling, O.K., Miniaturized Disc Bend Test Technique Development and Application, the Use of Small-Scale Specimens for Testing Irradiated Material, ASTM, Albuquerque N.M., 1986.
123. Becker, R., Effects of Strain Localization on Surface Roughening During Sheet Forming, Acta Materialia, 46 (1998) 1385-1401.
124. Wouters, O., Vellinga, W.P., Tijum, R.V. ve de Hosson, J.T.M., On the Evolution of Surface Roughness During Deformation of Polycrystalline Aluminum Alloys, Acta Materialia, 53 (2005) 4043-4050.
125. Xu, C., Furukawa, M., Horita, Z. ve Langdon, T.G., The Evolution of Homogeneity and Grain Refinement During Equal-Channel Angular Pressing: A Model for Grain Refinement in ECAP, Materials Science and Engineering A, 398 (2005) 66-76.
126. Sergueeva, A.V., Stolyarov, V.V., Valiev, R.Z. ve Mukherjee, A.K., Advanced Mechanical Properties of Pure Titanium with Ultrafine Grained Structure, Scripta Materialia, 45 (2001) 747-752.
127. Zhu, K.Y., Vassel, A., Brisset, F., Lu, K. ve Lu, J., Nanostructure Formation Mechanism of A-Titanium Using SMAT, Acta Materialia, 52 (2004) 4101-4110.
128. Hayes, R.W., Witkin, D., Zhou, F. ve Lavernia, E.J., Deformation and Activation Volumes of Cryomilled Ultrafine-Grained Aluminum, Acta Materialia, 52 (2004) 4259-4271.
129. Hansen, N., Huang, X. ve Hughes, D.A., Microstructural Evolution and Hardening Parameters, Materials Science and Engineering A, 317 (2001) 3-11.
130. Stolyarov, V.V., Zhu, Y.T., Alexandrov, I.V., Lowe, T.C. ve Valiev, R.Z., Influence of ECAP Routes on the Microstructure and Properties of Pure Ti, Materials Science and Engineering A, 299 (2001) 59-67.
131. Segal, V.M., Equal Channel Angular Extrusion: From Macromechanics to Structure Formation, Materials Science and Engineering A, 271 (1999) 322-333.

132. Sun, P.-L., Kao, P.-W. ve Chang, C.-P., Effect of Deformation Route on Microstructural Development in Aluminum Processed by Equal Channel Angular Extrusion, Metallurgical and Materials Transactions A, 35 (2004) 1359-1368.
133. Purcek, G., Saray, O., Karaman, I. ve Maier, H.J., High Strength and High Ductility of Ultrafine-Grained, Interstitial-Free Steel Produced by ECAE and Annealing, Metallurgical and Materials Transactions A, 43A (2012) 1884-1894.
134. Nakashima, K., Horita, Z., Nemoto, M. ve Langdon, T.G., Influence of Channel Angle on the Development of Ultrafine Grains in Equal-Channel Angular Pressing, Acta Materialia, 46 (1998) 1589-1599.
135. Shin, D., Plastic Flow Characteristics of Ultrafine Grained Low Carbon Steel During Tensile Deformation, Metals and Materials International, 7 (2001) 573-577.
136. Belyakov, A., Kimura, Y. ve Tsuzaki, K., Recovery and Recrystallization in Ferritic Stainless Steel after Large Strain Deformation, Materials Science and Engineering A, 403 (2005) 249-259.
137. Gertsman, V.Y., Birringer, R., Valiev, R.Z. ve Gleiter, H., On the Structure and Strength of Ultrafine-Grained Copper Produced by Severe Plastic Deformation, Scripta Metallurgica et Materialia, 30 (1994) 229-234.
138. Cheng, S., Spencer, J.A. ve Milligan, W.W., Strength and Tension/Compression Asymmetry in Nanostructured and Ultrafine-Grain Metals, Acta Materialia, 51 (2003) 4505-4518.
139. Lojkowski W, On the Spreading of Grain Boundary Dislocations and Its Effect on Grain Boundary Properties, Acta Metallurgica et Materialia, 39 (1991) 1891-1899.
140. Nazarov, A.A., Romanov, A.E. ve Valiev, R.Z., Incorporation Model for the Spreading of Extrinsic Grain Boundary Dislocations, Scripta Metallurgica et Materialia, 24 (1990) 1929-1934.
141. Mathaudhu, S.N. ve Ted Hartwig, K., Grain Refinement and Recrystallization of Heavily Worked Tantalum, Materials Science and Engineering A, 426 (2006) 128-142.
142. Dobatkin, S.V., Szpunar, J.A., Zhilyaev, A.P., Cho, J.Y. ve Kuznetsov, A.A., Effect of the Route and Strain of Equal-Channel Angular Pressing on Structure and Properties of Oxygen-Free Copper, Materials Science and Engineering A, 462 (2007) 132-138.
143. Gubicza, J., Dobatkin, S.V., Khosravi, E., Kuznetsov, A.A. ve Lábár, J.L., Microstructural Stability of Cu Processed by Different Routes of Severe Plastic Deformation, Materials Science and Engineering A, 528 (2011) 1828-1832.
144. Goto, M., Han, S.Z., Yakushiji, T., Lim, C.Y. ve Kim, S.S., Formation Process of Shear Bands and Protrusions in Ultrafine Grained Copper under Cyclic Stresses, Scripta Materialia, 54 (2006) 2101-2106.

145. Huang, W.H., Yu, C.Y., Kao, P.W. ve Chang, C.P., The Effect of Strain Path and Temperature on the Microstructure Developed in Copper Processed by ECAE, Materials Science and Engineering A, 366 (2004) 221-228.
146. Tsuji, N., Okuno, S., Koizumi, Y. ve Minamino, Y., Toughness of Ultrafine Grained Ferritic Steels Fabricated by ARB and Annealing Process, Materials Transactions, 45 (2004) 2272-2281.
147. Song, R., Ponge, D., Raabe, D., Speer, J.G. ve Matlock, D.K., Overview of Processing, Microstructure and Mechanical Properties of Ultrafine Grained BCC Steels, Materials Science and Engineering A, 441 (2006) 1-17.
148. Shin, S.Y., Hwang, B., Kim, S. ve Lee, S., Fracture Toughness Analysis in Transition Temperature Region of API X70 Pipeline Steels, Materials Science and Engineering A, 429 (2006) 196-204.
149. Calcagnotto, M., Ponge, D. ve Raabe, D., Effect of Grain Refinement to 1 $\mu$ m on Strength and Toughness of Dual-Phase Steels, Materials Science and Engineering A, 527 (2010) 7832-7840.
150. Saray, O., Purcek, G., Karaman, I. ve Maier, H., Impact Toughness of Ultrafine-Grained Interstitial-Free Steel, Metallurgical and Materials Transactions A, 43 (2012) 4320-4330.

## ÖZGEÇMİŞ

Onur SARAY, 1982 yılında Ankara’da doğdu. 2000 yılında, Çankırı Süleyman Demirel Fen Lisesi’nden mezun oldu. 2005 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü’nden lisans derecesini, 2007 yılında da Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’ndan yüksek lisans derecesini aldı. 2005-2013 yılları arasında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde araştırma görevlisi olarak çalıştı. Bu süreçte, TÜBİTAK tarafından desteklenen 2, TÜBİTAK ve Rusya Bilimler Akademisi tarafından ortaklaşa desteklenen 1 ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenen 4 araştırma projesinde araştırmacı olarak görev aldı. 2011 yılında YÖK tarafından verilen “Yurtdışı Doktora Araştırma Bursu” almaya hak kazanarak Texas A&M Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde misafir araştırmacı olarak görev yaptı. 2012 yılında Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından verilen Teknogirişim Sermaye Desteği’ni almaya hak kazandı. Onur SARAY’ın yüksek lisans tezi dışında uluslararası hakemli bilimsel dergilerde yayınlanmış 15 adet makalesi ve 9 tanesi uluslararası olmak üzere 14 adet bildiri bulunmaktadır. Yayınlanmış makaleleri 85’in üzerinde atıf almıştır. Bu makalelerden doktora tezi kapsamında yapılan çalışmaları kapsayanları aşağıda sıralanmıştır.

Onur SARAY çok iyi derecede İngilizce bilmektedir.

Doktora tezi kapsamındaki yayınları:

1. Saray, O., Purcek, G., Karaman, I., Neindorf, T. ve Maier, H.J., Equal-Channel Angular Sheet Extrusion of Interstitial-Free (IF) Steel: Microstructural Evolution and Mechanical Properties, Materials Science and Engineering A, 528, (2011), 6573-6583.
2. Purcek, G., Saray, O., Karaman, I. ve Maier, H.J., High Strength and High Ductility of Ultrafine-Grained, Interstitial-Free Steel Produced by ECAE and Annealing, Metallurgical and Materials Transactions A, 43A, (2012), 1884-1894.
3. Saray, O., Purcek, G., Karaman, I. ve Maier, H., Impact Toughness of Ultrafine-Grained Interstitial-Free Steel, Metallurgical and Materials Transactions A, 43, (2012), 4320-4330.
4. Saray, O., Purcek, G., Karaman, I. ve Maier, H., Formability of Ultra-fine Grained Interstitial Free Steels, Metallurgical and Materials Transactions A, Kabul edildi. DOI: 10.1007/s11661-013-1781-0.