

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**1040 ÇELİĞİNİN SICAK YIĞILMASINDA
MALZEME MODELLEME**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Ozan Serhat YÜCE

Anabilim Dalı: MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Programı: MALZEME ve İMALAT

HAZİRAN 2008

**1040 ÇELİĞİNİN SICAK YIĞILMASINDA
MALZEME MODELLEME**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Ozan Serhat YÜCE
(503041320)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30 Nisan 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Haziran 2008**

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Şafak YILMAZ

Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Halit TÜRKMEN (İ.T.Ü.)

Yrd.Doç.Dr. Turgut GÜLMEZ (İ.T.Ü.)

Haziran 2008

ÖNSÖZ

İnsanlık, belki de var olduğu ilk günden bu yana, hep bir şeyleri merak etmiş, incelemiş ve bulduklarıyla yetinmeyip araştırmaya devam etmiştir. Hiç bitmeyen bu merak ve araştırmalar sonucu bulduklarına yenilerini eklemiş ve teknoloji kavramının ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Ekonomideki gelişimlerin başlıca temel dayanağını teknolojik yeniliklerin sunmuş olduğu fırsatlar oluşturmaktadır. Malzeme teknolojisi açısından teknolojik gelişmelerin ilk basamağını malzeme özelliklerinin incelenmesi teşkil etmekte ve bu özellikler diğer bir tabir ile davranışlar malzemelerin içyapılarından etkilenmektedir.

Malzeme içyapıları imalat esnasında uygulanan ısı ve deformasyondan etkilenerak değişim gösterebildiklerinden, imalat süreci sonunda malzeme özellikleri başlangıç malzemesinden ya da tasarımda dikkate alınandan farklı olabilmektedir.

Bu çalışmada, çeliklerin sıcak yığıma işlemi esnasında ve sonrasında mikro yapı değişimlerine ait literatürde bulunan ve kabul edilen malzeme modelleme kriterleri incelenmiştir. Ardından 1040 çeliği üzerinde yapılan çeşitli sıcaklıklardaki sıcak yığıma deneyleri sonrasında numunelerin sertlikleri, mikro yapı görünümleri incelenmiş, sonuçlar modellemeler ile karşılaştırılmış ve irdelenmiştir.

Öncelikle tüm yaşamım boyunca kararlarımın doğruluğuna inanıp bana olan desteklerini hiç esirgemeyen aileme; bilgi, deneyim ve sabrı ile bana rehberlik eden danışman hocam Sayın Doç. Dr. Şafak YILMAZ' a ve varlıkları ile hayatıma anlam katan arkadaşlarım Görkem KIZILTAN, Emrah DENİZ ve Nur PEHLİVANOĞLU' na teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2008

Ozan Serhat YÜCE

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	1
2. SICAK ŞEKİL DEĞİŞİMİ SÜRECİNDE İÇYAPIDA ETKİLİ OLAN MEKANİZMALAR VE MODELLENMESİ	3
2.1. Toparlanma	3
2.2. Yeniden Kristalleşme	4
2.3. Çeliklerde İmalat Sonrası Oluşan Tane Boyutunun Tahmini	6
2.3.1. Tane boyutuna sıcak deformasyonun etkisi	7
2.3.2. Yeniden kristalleşme sıcaklığı altındaki sıcaklıklarda deformasyonun tane boyutuna etkisi	8
2.4. İmalat Malzemesinde İçyapı Gelişimi	9
2.4.1. İçyapının statik değişimi	9
2.4.2. İçyapının dinamik değişimi	13
2.4.3. İçyapının meta-dinamik değişimi	15
2.4.4. Tane büyümesi	18
2.5. Çeliklerin Sıcak Dövülmesinde Mekanik Özellik Modelleri	21
2.5.1. Zyuzin denklemleri	21
2.5.2. Misaka denklemleri	22
2.5.3. Shida denklemleri	22
2.5.4. Johnson ve Cook denklemleri	23
2.6. Sıcak Şekillendirme İçin Malzeme Modelleri	24
2.6.1. P. D. Hodgson modeli	24
2.6.2. Sellars modeli	26
2.6.3. Senuma modeli	27

3. DENEYSEL ÇALIŞMA	30
3.1. Deney Numunesi Malzemesi Ve Hazırlanışı	30
3.2. Deney Ekipmanları Ve Cihazlar	31
3.3. Deney Görüntüleri	34
3.4. Numunelerin Metalografik İnceleme İçin Hazırlanması	36
3.5. Numunelerin Sertlik Ölçümleri	38
3.6. Numunelerin Geometrisi	39
3.7. Sertlik Ölçüm Sonuçları	45
3.8. Numune Mikroyapılarının İncelenmesi	58
3.8.1. 800 °C’de işlem gören numunelerin mikroyapı görüntüleri	61
3.8.2. 900 °C’de işlem gören numunelerin mikroyapı görüntüleri	63
3.8.3. 1000 °C’de işlem gören numunelerin mikroyapı görüntüleri	65
3.8.4. 1100 °C’de işlem gören numunelerin mikroyapı görüntüleri	67
4. İRDELEME	70
4.1. Model 1: Senuma Modeli	71
4.2. Model 2: Sellars Modeli	76
4.3. Model 3: Hodgson Modeli	81
4.4. Modellerin Karşılaştırılması	86
5. SONUÇLAR	106
KAYNAKLAR	107
EKLER	112
A. Mikroyapı Görüntüleri Karşılaştırması	112
ÖZGEÇMİŞ	116

KISALTMALAR

SYK	: Statik Yeniden Kristalleşme
DYK	: Dinamik Yeniden Kristalleşme
MDYK	: Meta-dinamik Yeniden Kristalleşme
YK	: Yeniden Kristalleşme
gg	: Tane Büyümesi
HV₂	: Mikro Vickers Sertliği
HRC	: Rockwell C Sertliği
HV_A	: A Bölgesi Vickers Sertliği
HV_B	: B Bölgesi Vickers Sertliği
HV_C	: C Bölgesi Vickers Sertliği
HV_O	: O Bölgesi Vickers Sertliği
C-Mn	: Karbon Mangan
Fe-C	: Demir-Karbon

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Haddeleme İçin Statik Yeniden Kristalleşmeye Uğramış Kısım Denkleminin Sabitleri.....	10
Tablo 2.2 Haddelemede Malzemenin % 50 Statik Yeniden Kristalleşmeye Uğraması İçin Gerekli Süre Denklemi İçin Sabitler.....	11
Tablo 2.3 Bazı Az Karbonlu Çelikler İçin Statik Yeniden Kristalleşme Modelleri.....	12
Tablo 2.4 Haddelemede Dinamik Yeniden Kristalleşme İçin Kritik Genleme Denklemi Sabitleri.....	14
Tablo 2.5 Haddelemede Dinamik Yeniden Kristalleşmeye Uğramış Kısım Oranı Denklemi Sabitleri.....	14
Tablo 2.6 Haddeleme İçin Meta-Dinamik Yeniden Kristalleşmeye Uğramış Kısım Oranı Denklemi Sabitleri	16
Tablo 2.7 Haddelemede % 50 Meta-Dinamik Yeniden Kristalleşmeye Uğraması İçin Gerekli Süre Denklemi Sabitleri.....	17
Tablo 2.8 Haddelemede Meta-Dinamik Yeniden Kristalleşmeye Uğramış Tane Boyutu Denklemi Sabitleri.....	17
Tablo 2.9 Haddeleme İçin Statik Yeniden Kristalleşmede Tane Büyümesi Katsayıların Değişimi Denklemi Sabitleri.....	19
Tablo 2.10 Yeniden Kristalleşme Tiplerine Göre Değişik Çeliklerin Tane Büyümesi Denklemi Sabitleri.....	20
Tablo 3.1 Deney Numunesi Malzemesinin İçeriği.....	30
Tablo 3.2 Yığılma Deneylerindeki Şekil Değişimi Miktarları ve Uygulama Sıcaklıkları.....	31
Tablo 3.3 Numunelere Göre Şekil Değişimi İşlemine Ait Başlangıç ve Bitiş Sıcaklık Farkları ve Şekil Değişimi Miktarları.....	35
Tablo 3.4 $\varepsilon = -0,92$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Temas ve Göbek Çapları İle Gerçek Anma ve Gerçek Yerel Şekil Değişimleri.....	41
Tablo 3.5 $\varepsilon = -0,51$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Temas ve Göbek Çapları İle Gerçek Anma ve Gerçek Yerel Şekil Değişimleri.....	42
Tablo 3.6 $\varepsilon = -0,22$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Temas ve Göbek Çapları İle Gerçek Anma ve Gerçek Yerel Şekil Değişimleri.....	42
Tablo 3.7 Deney Numunelerinde Ortalama ve Yerel Şekil Değişimi Hızları..	44
Tablo 3.8 800 °C’ de $\varepsilon = -0,92$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.....	45
Tablo 3.9 800 °C’ de $\varepsilon = -0,51$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.....	46
Tablo 3.10 800 °C’ de $\varepsilon = -0,22$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.....	46
Tablo 3.11 900 °C’ de $\varepsilon = -0,92$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.....	48

Tablo 3.12	900 °C' de $\varepsilon = -0,51$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.....	48
Tablo 3.13	900 °C' de $\varepsilon = -0,22$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.....	49
Tablo 3.14	1000 °C' de $\varepsilon = -0,92$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.....	50
Tablo 3.15	1000 °C' de $\varepsilon = -0,51$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.....	51
Tablo 3.16	1000 °C' de $\varepsilon = -0,22$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.....	51
Tablo 3.17	1100 °C' de $\varepsilon = -0,92$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.....	53
Tablo 3.18	1100 °C' de $\varepsilon = -0,51$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.....	53
Tablo 3.19	1100 °C' de $\varepsilon = -0,22$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.....	54
Tablo 4.1	Senuma Modelinin ε üst (B ve C Bölgeleri) Değerlerine Uygulanması İle Elde Edilen Modelleme Sonuçları.....	74
Tablo 4.2	Senuma Modelinin ε merkez (O ve A Bölgeleri) Değerlerine Uygulanması İle Elde Edilen Modelleme Sonuçları.....	75
Tablo 4.3	Sellars Modelinin ε üst (B ve C Bölgeleri) Değerlerine Uygulanması İle Elde Edilen Modelleme Sonuçları.....	79
Tablo 4.4	Sellars Modelinin ε merkez (O ve A Bölgeleri) Değerlerine Uygulanması İle Elde Edilen Modelleme Sonuçları.....	80
Tablo 4.5	Hodgson Modelinin ε üst (B ve C Bölgeleri) Değerlerine Uygulanması İle Elde Edilen Modelleme Sonuçları.....	84
Tablo 4.6	Hodgson Modelinin ε merkez (O ve A Bölgeleri) Değerlerine Uygulanması İle Elde Edilen Modelleme Sonuçları.....	85
Tablo 4.7	Hodgson, Sellars ve Senuma Modelleri İle Hesaplanan Statik Yeniden Kristalleşmiş Tane Boyutlarının B – C ve O - A Bölgelerine Göre Karşılaştırılması.....	88
Tablo 4.8	Hodgson, Sellars ve Senuma Modelleri İle Hesaplanan Statik Yeniden Kristalleşmiş Kısım Oranlarının B – C ve O - A Bölgelerine Göre Karşılaştırılması.....	89
Tablo 4.9	Hodgson, Sellars ve Senuma Modelleri İle Hesaplanan Metadinamik Yeniden Kristalleşmiş Tane Boyutlarının B – C ve O - A Bölgelerine Göre Karşılaştırılması.....	91
Tablo 4.10	Hodgson, Sellars ve Senuma Modelleri İle Hesaplanan Metadinamik Yeniden Kristalleşmiş Kısım Oranlarının B – C ve O - A Bölgelerine Göre Karşılaştırılması.....	92
Tablo 4.11	Hodgson, Sellars ve Senuma Modelleri İle Hesaplanan Dinamik Yeniden Kristalleşmiş Tane Boyutlarının B – C ve O - A Bölgelerine Göre Karşılaştırılması.....	94
Tablo 4.12	Hodgson, Sellars ve Senuma Modelleri İle Hesaplanan Dinamik Yeniden Kristalleşmiş Kısım Oranlarının B – C ve O - A Bölgelerine Göre Karşılaştırılması.....	95
Tablo 4.13	Tablo 4.7, Tablo 4.9 ve Tablo 4.11 Verilerine Göre Uygulanan Üç Modelin Tane Boyutu Hesaplamalarının Karşılaştırılması.....	97

Tablo 4.14	Uygulanan Modellere Göre Tane Büyümesine Uğramış Olan Yeniden Kristalleşmiş Tane Boyutları.....	98
Tablo 4.15	Uygulanan Modellere Göre Tane Büyümesine Uğramış Olan Yeniden Kristalleşmemiş Tane Boyutları.....	100
Tablo 4.16	Deney Numunelerinin Ortalama Sertlik Değerleri İncelemesi Sonucu İçyapı Derecelendirilmesi.....	101
Tablo 4.17	Uygulanan Üç Model İçin İşlem Sıcaklığı Sonrasındaki 10sn.'lik Süre İçinde Elde Edilen Ortalama Tane Boyutu Değerleri.....	103
Tablo 4.18	Uygulanan Modellerin Sonuçlarına Göre Oda Sıcaklığındaki Tane Boyutu Tahmini İçin Tane Boyutu Derecelendirilmesi ve Sertlik Değerleri İncelemesi Sonucu İçyapı Derecelendirilmesi İle Karşılaştırılması.....	104

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1 : Deney Numunesi ve Ölçüleri.....	30
Şekil 3.2 : Yığmanın Gerçekleştirildiği Hidrolik Pres.....	31
Şekil 3.3 : Numunelerin Isıtıldığı Fırın.....	32
Şekil 3.4 : K Tipi Termo Eleman.....	33
Şekil 3.5 : IRISYS IRS4010 Termal Kamera.....	33
Şekil 3.6 : Deney Esnasındaki Termal Kamera ve Şekil Değişimi Görüntüleri.....	34
Şekil 3.7 : Metalografik Numune Zımparalama ve Parlatma Tezgahı.....	37
Şekil 3.8 : HMT Shimadzu Mikro Sertlik Ölçüm Cihazı.....	38
Şekil 3.9 : Sertlik Ölçümü İçin Belirlenen Karakteristik Bölgeler.....	39
Şekil 3.10 : Deney Numunelerinin Kalıp Dışında Havada Soğuma Eğrisi.....	40
Şekil 3.11 : 800 °C İçin Şekil Değişimi Miktarına Göre Karakteristik Bölgelerdeki Sertlik Değerleri.....	47
Şekil 3.12 : 900 °C İçin Şekil Değişimi Miktarına Göre Karakteristik Bölgelerdeki Sertlik Değerleri.....	50
Şekil 3.13 : 1000 °C İçin Şekil Değişimi Miktarına Göre Karakteristik Bölgelerdeki Sertlik Değerleri.....	52
Şekil 3.14 : 1100 °C İçin Şekil Değişimi Miktarına Göre Karakteristik Bölgelerdeki Sertlik Değerleri.....	55
Şekil 3.15 : Uygulanan $\epsilon = -0,22$ ' lik Şekil Değişimi Miktarında Bütün Sıcaklıklar İçin Karakteristik Bölgelerdeki Sertlik Değerleri.....	56
Şekil 3.16 : Uygulanan $\epsilon = -0,51$ Şekil Değişimi Miktarında Bütün Sıcaklıklar İçin Karakteristik Bölgelerdeki Sertlik Değerleri.....	57
Şekil 3.17 : Uygulanan En Büyük Şekil Değişimi ($\epsilon = -0,92$) Miktarına Göre Bütün Sıcaklıklar İçin Karakteristik Bölgelerdeki Sertlik Değerleri.....	58
Şekil 3.18 : Mikroyapı Görüntülemeye Kullanılan Optik Mikroskop, SOIF XJP-6A.....	59
Şekil 3.19 : Fe-C Diyagramı.....	60
Şekil 3.20 : 800 °C Numunelerinin O Noktaları Görüntüleri.....	61
Şekil 3.21 : 800 °C Numunelerinin B Noktaları Görüntüleri.....	62
Şekil 3.22 : 800 °C Numunelerinin C Noktaları Görüntüleri.....	63
Şekil 3.23 : 900 °C Numunelerinin A Noktaları Görüntüleri.....	64
Şekil 3.24 : 900 °C Numunelerinin B Noktaları Görüntüleri.....	64
Şekil 3.25 : 900 °C Numunelerinin C Noktaları Görüntüleri.....	65

Şekil 3.26	: 900 °C’de Maksimum Şekil Değişimi Numunelerinden Birinin O Noktası Görüntüsü.....	65
Şekil 3.27	: 1000 °C Numunelerinin A Noktaları Görüntüleri.....	66
Şekil 3.28	: 1000 °C Numunelerinin C Noktaları Görüntüleri.....	66
Şekil 3.29	: 1000 °C Numunelerinin B Noktaları Görüntüleri.....	67
Şekil 3.30	: 1100 °C Numunelerinin A Noktaları Görüntüleri.....	67
Şekil 3.31	: 1100 °C Numunelerinin C Noktaları Görüntüleri.....	68
Şekil 3.32	: 1100 °C Numunelerinin B Noktaları Görüntüleri.....	68
Şekil 3.33	: 1100 °C’de Maksimum Şekil Değişimi Numunelerinden birinin O Noktası Görüntüsü.....	69
Şekil A.1	: 800 °C Numunelerinin Mikro Yapı Görüntüleri, Sertlik, Şekil Değişimi ve Şekil Değişimi Hızlarının Karşılaştırılması.....	112
Şekil A.2	: 900 °C Numunelerinin Mikro Yapı Görüntüleri, Sertlik, Şekil Değişimi ve Şekil Değişimi Hızlarının Karşılaştırılması.....	113
Şekil A.3	: 1000 °C Numunelerinin Mikro Yapı Görüntüleri, Sertlik, Şekil Değişimi ve Şekil Değişimi Hızlarının Karşılaştırılması.....	114
Şekil A.4	: 1100 °C Numunelerinin Mikro Yapı Görüntüleri, Sertlik, Şekil Değişimi ve Şekil Değişimi Hızlarının Karşılaştırılması.....	115

SEMBOL LİSTESİ

A, B, C, C_1, C_2	: Sabitler
K, k_y, k_A, p, m	: Sabitler
n, l, q, r, s, u	: Sabitler
A_0	: Şekil değişimi öncesi kesit alanı
A_{yerel}	: Şekil değişimi sonrası karakteristik bölge alanı
D_0	: Şekil değişimi öncesi tane boyutu
D_{DYK}	: Dinamik yeniden kristalleşmiş tane boyutu
D_{MDYK}	: Meta-dinamik yeniden kristalleşmiş tane boyutu
D_{SYK}	: Statik yeniden kristalleşmiş tane boyutu
D_{gg}	: Tane büyümesi sonucu oluşan tane boyutu
$D_{DYK}^{100\%}$	: %100 dinamik yeniden kristalleşmiş tane boyutu
D_{ORT}	: Ortalama tane boyutu
ε	: Şekil değişimi miktarı, genleme
ε_{kritik}	: Kritik şekil değişimi miktarı
ε_{yerel}	: Karakteristik bölge şekil değişimi miktarı
$\varepsilon_{üst}$	: Temas (B – C) bölgesi şekil değişimi miktarı
ε_{merkez}	: Göbek (O – A) bölgesi şekil değişimi miktarı
$\varepsilon_{0,5}$	: %50 dinamik yeniden kristalleşme genlemesi
$\dot{\varepsilon}$	: Şekil değişimi hızı
$\dot{G}$	: Tane büyümesi hızı
h_0	: Şekil değişimi öncesi numune boyu
h	: Şekil değişimi sonucu numune boyu
Q	: Aktivasyon enerjisi
R	: Üniversal gaz sabiti
σ_y	: Akma gerilmesi
S_v	: Senuma modeli katsayısı
T	: Sıcaklık (K)
t	: zaman (sn.)
$t_{0,5 SYK}$	: %50 statik yeniden kristalleşme için gereken bekleme süresi
$t_{0,5 MDYK}$	: %50 meta-dinamik yeniden kristalleşme için gereken bekleme süresi
$\dot{T}_O$	: O bölgesi soğuma hızı
$\dot{T}_A$	: A bölgesi soğuma hızı
$\dot{T}_B$	: B bölgesi soğuma hızı
$\dot{T}_C$	: C bölgesi soğuma hızı

X_{YK}	: Yeniden kristalleşme kısmi oranı
X_{MDYK}	: Meta-dinamik yeniden kristalleşme kısmi oranı
X_{SYK}	: Statik yeniden kristalleşme kısmi oranı
X_{DYG}	: Dinamik yeniden kristalleşme kısmi oranı
Z	: Zener-Holloman Parametresi

1040 ÇELİĞİNİN SICAK YIĞILMASINDA MALZEME MODELLEME

ÖZET

Bu çalışmada sıcak yığma işleminin etkilerinin incelenmesi amacıyla sıcak şekillendirme koşullarındaki mikro yapı oluşumu araştırılmıştır. Araştırmalarda sıcaklık ve şekil değişimi etkisi ile malzeme yapısında oluşan mekanizmalar, oluşumları ve türleri irdelenerek literatürde sunulan örnekler dahilinde açıklanmaya çalışılmıştır. Elde edilen bilgiler ışığında yeniden kristalleşme ve tane büyümesi ve malzeme yapısına ait geliştirilmiş ve kabul gören matematiksel yaklaşımlar irdelenerek çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen eşitlikler ve modeller verilmiştir. Modellere deneysel sıcak yığma koşulları ve verileri uygulanarak bir karşılaştırma yapılmıştır.

Sıcak yığma işleminin uygulandığı deneysel çalışmada 1040 çeliği 800 °C, 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda; $\epsilon=-0,22$, $\epsilon= -0,51$ ve $\epsilon= -0,92$ şekil değişimi değerlerinde sıcak yığma işlemine maruz tutulmuştur. Yığılan numunelerin yığma eksenindeki kesiti üzerindeki sertlik değerleri ve mikro yapı farklılıkları incelenmiştir. Sertlik değerlerinin incelenmesinde numune kesim yüzeyi üzerinde 4 farklı karakteristik bölge tanımlanmıştır.

Mikro yapı görüntüleri ve sertlik ölçümleri sonucu elde edilen veriler yardımı ile literatürde sunulan içyapı modellerinden bazıları (Hodgson, Sellars ve Senuma) kullanılarak ortalama tane boyutu gelişimi modellenmiştir. Modellerden elde edilen sonuçlar kalitatif karşılaştırma amacı ile kullanılarak deney sonuçları ile olan uyumu değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçların uygulandığı bu modeller arasından Sellars modelinin deney sonuçlarına daha uygun tahminler geliştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

MATERIAL MODELLING OF 1040 STEEL IN HOT UPSETTING

SUMMARY

In this study, microstructure evolution in hot forging conditions had been investigated to predict the effects of hot upsetting process. The mechanism types and evolutions that occur in the material structure with the effect of temperature and strain were studied and explained by various examples from the scientific literature. In the light of this knowledge, recrystallization and grain growth and empirical equations that accepted by material's composition, are studied and then, some equations and models that had been suggested by many researchers were given. These models has been applied on the experimental conditions and compared with it.

1040 steel has been used for the experimental hot upsetting process in 4 different temperatures as 800 °C, 900 °C, 1000 °C and 1100 °C with 3 different strain of $\epsilon = -0,22$, $\epsilon = -0,51$ and $\epsilon = -0,92$. Hardness and microstructure distribution have been studied from the parallel to height cross section of hot forged specimens. To examine the hardness values, 4 different characteristical areas were defined and thus the effect of the shape of the specimens had been tried to be separated.

With the help of microstructure figures and results of hardness testes, some of the mentioned microstructure models had been used to model for the evolution of average grain size. The result obtained from the models used for qualitative comparison and evaluated with the experimental data. Between the models which applied to experimental results, it had been seen that the Sellars's model gives us more convenient predictions.

1.GİRİŞ VE AMAÇ

Malzeme teknolojisi açısından teknolojik gelişmelerin ilk basamağını malzeme özelliklerinin incelenmesi teşkil etmektedir. Malzeme özellikleri ise malzemelerin içyapılarından etkilenmektedir. Teknolojik bakımdan gelişmeler ve gereksinimler sonucu günümüzde arzu edilen malzemeyi tasarlamak, imal etmek ve işlemek temel hedef haline gelmiş bulunmaktadır.

Malzeme içyapıları imalat esnasında uygulanan ısı ve deformasyondan etkilenerек değişim gösterebilmektedir. Dolayısıyla imalat süreci sonunda malzeme özellikleri başlangıçtaki özelliklerden ya da tasarımda dikkate alınan özelliklerden farklı olabilmektedir.

İmalat işlemlerini mamulün malzeme özellikleri açısından avantaj teşkil edecek şekilde ya da en azından dezavantaj oluşturmayacak şekilde gerçekleştirmek, imalat esnasında malzeme içyapısının ve özelliklerinin modellenmesi konusunda bilgilere sahip olunmasını gerektirmektedir.

Birçok imalat yönteminde olduğu gibi dövme işleminde de bu tür bilgilere ihtiyaç vardır. Dövme esnasında artan dislokasyon yoğunluğu, doku oluşumu ve sıcaklık nedeni ile toparlanma, yeniden kristalleşme gibi içyapı değişiklikleri meydana gelmektedir.

Çelikte dayanım artışı sağlamanın yollarından birisi de küçük tane boyutu elde etmektir. Toparlanma, statik, dinamik ve meta-dinamik yeniden kristalleşme imalat süreci içinde meydana gelen ve içyapıyı belirleyen mekanizmalardır. Ostenit alanına ısıtılmış çelikte şekil değiştirme sıcaklığına, deformasyon miktarına ve deformasyon hızına bağlı olarak işlem sonrası sıcakta beklerken statik yeniden kristalleşme, işlem anında dinamik yeniden kristalleşme görülebilir. İşlem sonrası soğuma sonucu ostenit ferrite, perlite ya da beynite dönüşür. Dönüşümün kinetiği ve oda sıcaklığındaki içyapının faz düzeni dönüşüm öncesi ostenit içyapısından ve soğuma koşullarından doğrudan etkilenir. Çeliklerin şekil değişiminde dislokasyon

yoğunluğu da oldukça artar. Sıcak şekil değişiminde toparlanma ve yeniden kristalleşme mekanizmaları devreye girerek dislokasyon yoğunluğunu azaltır.

Bu çalışmada, 1040 çelik malzemesinin yığılmasında oluşan içyapılarının modellenmesi ile ilgili bilgi birikimini araştırmak amaçlanmıştır.

Dövme işleminde malzeme modelleme konusunda literatürde bulunan çeşitli matematik modeller incelenmiş, genel olarak modellemenin temelleri tanıtılarak kullanım sınırları incelenmiştir. Bilgiler deneysel bulgular ile karşılaştırılmıştır.

Bir çelik malzeme için oda sıcaklığında ortaya çıkacak içyapı, fazların türleri, şekilleri ve boyutları açısından şekil değişimi koşullarına bağlı olarak çok farklı olabilir. Bu sebeple, hem şekil değişimi esnasında meydana gelen içyapı oluşumunun fiziğini daha iyi anlayabilmek ve hem de son içyapıyı doğru modelleyerek kalite kontrolünü sağlayabilmek için matematik modeller oldukça önemlidir.

Şekil değişimi esnasındaki ve sonrasındaki içyapıyı bilebilmek için yeniden kristalleşme olayını, her prosesten sonraki tane boyutunu tanımlayabilmek gerekir. Ayrıca, şekil değişimi sonrasında meydana gelebilecek metadinamik yeniden kristalleşmeyi ve yüksek sıcaklıkta oluşan tane büyümesi olaylarını dikkate almak da sıcak dövmede dikkate alınması gereken malzeme modelleme konularından olmaktadır. Sıcak şekil değişimi ile oluşan içyapı birçok değişkene bağlı olmakla beraber bir modelleme denkleminde esas olarak sıcaklık, deformasyon miktarı ve hızı ile prosesler arası beklenen süre bulunmaktadır.

2. SICAK ŞEKİL DEĞİŞİMİ SÜRECİNDE İÇYAPIDA ETKİLİ OLAN MEKANİZMALAR VE MODELLENMESİ

Metaller oda sıcaklığında deforme edildikleri takdirde dislokasyon yoğunlukları yükselir. Bu durum sertlikte artışa neden olurken süneklikte azalmaya sebebiyet verir. Artan dislokasyon yoğunluğu iç enerjiyi artırır. Metaller yüksek sıcaklıklara ısıtıldıklarında bu enerji yeni tanelerin çekirdeklenmesinde, yani yeniden kristalleşmede kullanılır.

Yüksek sıcaklıklarda ilk olarak toparlanmanın görülür. Birbirine yakın dislokasyonlar alt tane sınırlarında yeniden düzenlenmek suretiyle bir miktar enerji bırakırlar. Alt tane sınırlarında düzenlenen dislokasyonlar, dislokasyon yoğunluğu düşük hücrelerin oluşmasına yol açarlar. Toparlanmayla dislokasyon yoğunluğu biraz azalmasına rağmen sertlik ve süneklik değerleri değişmez.

Asıl değişiklik yeniden kristalleşmede görülmektedir. Yeni taneler çekirdeklenerek büyürken, dislokasyon yoğunluğu oluşan yeni taneler içerisinde ilk değerine geri döner. Yeniden kristalleşme, pekleşmenin giderilmesinin yanısıra tane boyutunun kontrol edilmesine de yardımcı olur. Yeniden kristalleşme öncesi meydana gelen deformasyon ne kadar çok olursa, sonrasında elde edilecek yapı o kadar ince taneli olur. Bilindiği üzere, malzemelerin genellikle ince taneli bir yapıya sahip olmaları istenir. İri taneler tokluk ve dayanımı düşürdüğü gibi, plastik şekillendirmede yüzeyin portakal kabuğu görünümünde pürüzlü bir şekle bürünmesine de yol açar.

2.1 Toparlanma

Deformasyon anında tane boyutu aynı kalırken, dislokasyon yoğunluğu artar ve alt tane oluşumu gözlenir. Mekanizma kararlı hale geldiğinde ise dislokasyon yoğunluğu ve alt tane boyutları sabit hale gelir. Toparlanma ile içyapıdaki dislokasyon yoğunluğu önemli oranda değişmemekte, ancak dislokasyonlar yeniden düzenlenmektedir. Bu nedenle pekleşmenin sağladığı dayanım artışını kaybetmeden süneklik artabilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda şekil vermede, plastik deformasyon

esnasında dislokasyonlar oluşur oluşmaz toparlanma mekanizması aktif hale gelir. Toparlanma sonucu oluşan yeni dislokasyon dağılımı, plastik deformasyonla meydana gelen orman dislokasyonlarına göre enerji bakımından çok daha tercih edilebilir durumdadır. Toparlanmada malzeme yapısındaki dislokasyonlar daha düşük enerjiye sahip oldukları poliganizasyon adı verilen bir düzene girerler. Bu durumda dislokasyonlar gerçekte küçük açılı tane sınırı meydana getirmektedir (Lee Youngseog, 2004). Sıcaklık yeterince yüksekse, deformasyon sonrası “statik toparlanma” süresince dislokasyon dağılımı değişirken, dislokasyon yoğunluğu da bir miktar azaldığından malzeme bünyesinde yumuşama meydana gelir. Yapılan araştırmalarda elde edilen bilgilere göre toparlanma mekanizması ile meydana gelen maksimum yumuşama miktarı yaklaşık % 20 civarındadır. (Siamak, 2006) “Dinamik toparlanma” ise, dislokasyon dağılımının şekil değişimi esnasında yeniden düzenlenmesidir.

2.2 Yeniden Kristalleşme

Yeniden kristalleşme mekanizması ile, şekil verme sonucu yoğun dislokasyona sahip olan tane yapısı dislokasyon yoğunluğu düşük olan yeni yapıya dönüşür. Bu süreçte malzemenin mikro yapısında değişim meydana gelirken, kristal yapısı ve makro yapısında değişim gözlenmez. Yeni tanelerin çekirdeklenmesi ile birlikte dislokasyon yoğunluğu hızlı bir şekilde azalır. Yeniden kristalleşmeye bağlı olarak azalan dislokasyon yoğunluğu nedeniyle malzemenin pekleşme ile sağladığı dayanımda düşüş başlar. (Lee, 2004) Yeniden kristalleşme sonucu oluşan yeni tanelerin boyutu küçüldükçe malzemenin yumuşaması azalır.

Yeniden kristalleşme sıcak şekil deformasyon süresince meydana gelebileceği gibi şekil değişimi pasoları arasında ve şekil değişimi sonrasında metalin oda sıcaklığına soğuması sırasında da meydana gelebilir.

Genel olarak yeniden kristalleşme üç şekilde meydana gelebilir: Eğer yeniden kristalleşme deformasyondan sonra meydana geliyorsa buna statik yeniden kristalleşme (SYK) denir. Belirli şartlar gerçekleştiği takdirde yeniden kristalleşme deformasyon esnasında da meydana gelebilir. Buna dinamik yeniden kristalleşme (DYK) denir. Bazı durumlarda ise dinamik yeniden kristalleşme deformasyon

süresince tamamlanamaz. Bu tür durumlarda deformasyon sonrası tamamlanan yeniden kristalleşmeye meta-dinamik yeniden kristalleşme denir (MDYK).

Dinamik yeniden kristalleşme (DYK), şekil değişimi sırasında dislokasyon yoğunluğu ancak belirli bir seviyeye ulaştığı zaman meydana gelir. Bu kritik genleme miktarı ε_c olarak tanımlanır. ε_c 'de başlayan dinamik toparlanmanın sağladığı yumuşama, ε_p olarak tanımlanan kritik bir değeri aştığında baskın hale gelir. Yani, ε_c den itibaren gittikçe azalarak da olsa görülen pekleşme, ε_p aşıldığında yerini yumuşamaya bırakır.

Genleme değeri ε_c den az olduğu durumlarda DYK görülmez ancak, şekil değişimi sonrası statik yeniden kristalleşme meydana gelir. Bu alanda AISI 304 çeliği ile 1000 °C ve 0,5 s⁻¹ genleme hızında yapılan deneylerde kritik ve maksimum genleme miktarları sırasıyla ε_c için 0,5 ve ε_p için 0,7 olarak bulunmuştur. (Lee ve Hodgson, 2006)

Sıcak deformasyon esnasındaki yeniden kristalleşme kinetiğinin teorik olarak ele alınması oldukça zordur. Mevcut birçok model, Johnson ve Mehl (1938) ve Avrami (1939–1940) tarafından ileri sürülen, faz dönüşümü teorileri üzerine kurulmuştur. Yeniden kristalleşme için yeniden kristalleşmiş tane boyutunun D_{YK} , kuluçka döneminden (τ) sonra geçen zamanla (t) orantılı olduğu kabul edilmektedir. (Liu, 2001)

$$D_{YK} = \dot{G} \cdot (t - \tau) \quad (2.1)$$

Burada $\dot{G}$ büyüme hızını ifade etmektedir ve zamanla değişmediği kabul edilmektedir. Yapılan bir başka kabul ise, yeniden kristalleşmemiş bölgelerdeki çekirdeklenme hızı eksponansiyel olarak zamanla azalmakta olduğudur. Bunların ışığında yeniden kristalleşen hacmin oranı aşağıdaki (2.2) ile verilen Avrami eşitliği ile ifade edilebilmektedir.

$$X_{YK} = 1 - \exp \left[-Bt^{k_A} \right] \quad (2.2)$$

Burada B ve k_A sabitleri ifade etmektedir. Pratikte geniş ölçüde Avrami eşitliğinin normalize edilmiş bir biçimi kullanılmaktadır.

$$X_{YK} = 1 - \exp \left[\ln(1 - X) \cdot \left(\frac{t}{t_x} \right)^{k_A} \right] \quad (2.3)$$

X değeri yeniden kristalleşme oranını göstermektedir yani bu değer, yarım yeniden kristalleşme zamanı ($t_{0,5}$) için 0,5; 0,05 kadar yeniden kristalleşme için geçen zaman ($t_{0,05}$) için 0,05 veya %95'i tamamlanmış yeniden kristalleşme zamanı ($t_{0,95}$) için 0,95 olmaktadır. (Liu, 2001)

Termo-mekanik proses parametreleri ile t_x arasındaki ilişkinin tanımlanması için bir çok çalışma yapılmıştır, Sellars (1979 ve 1986), Hansen ve diğ. (1980), Yamamoto ve diğ. (1984), Andrade ve diğ. (1983), Abken ve Jonas (1984), Kwon ve DeArdo (1986), Choquet ve diğ. (1987), Campbell ve diğ. (1988), Kwon ve diğ. (1990), Penalba ve Carsi (1995), Medina ve diğ. (1991–1999), Carsi ve diğ. (1996), Cruz-Rivera ve diğ. (1996), Kuziak ve Cheng (1996), Cabrera ve diğ. (1997), Lee (1999).

2.3 Çeliklerde İmalat Sonrası Oluşan Tane Boyutunun Tahmini

Ostenitin ferrite dönüşümü sırasında ferrit esas olarak ostenit tane sınırlarında çekirdeklenmektedir. Soğuma nispeten yavaş ise toparlak ferrit taneleri oluşmaktadır. Bitişik ferrit tanelerinin bazıları benzer doğrultuda olabilirler. Dönüşüm esnasında genellikle bir ostenit tanesi birçok ferrit tanesine bölünmektedir. Ostenit taneleri ne kadar küçük olursa o kadar küçük ferrit taneleri elde edilebilmektedir. Soğuma hızı arttıkça ferrit taneleri daha da küçük olmaktadır. Bilindiği gibi, Hall-Petch eşitliğine göre malzemede dayanım değeri azalan tane boyutuna bağlı olarak artış gösterir.

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (2.4)$$

Hall – Petch eşitliği tane sınırlarının dislokasyon hareketini engelleyen sınırlar olduğu prensibi üzerine kurulmuştur.

Kontrollü plastik şekillendirmenin temel gayesi çeliğin içi yapısını ince taneli hale dönüştürmek, böylelikle de tokluk ve dayanımı artırmaktır. İmalat esnasında ostenitin tane boyutunu bilmek ve ayarlamak sonuçta oluşacak ferritin tane boyutunu

belirlediğinden önem teşkil etmektedir. Şekil vermede tane boyutunun kontrol edilmesi genellikle üç yolla gerçekleşmektedir.

2.3.1 Tane boyutuna sıcak deformasyonun etkisi

Ostenit bölgesinde gerçekleştirilen şekil verme işleminde, artan dislokasyon yoğunluğuna da bağlı olarak, deformasyon sonrasında yüksek sıcaklıkta yeterli süre beklenirse “STATİK YENİDEN KRİSTALLEŞME” meydana gelmektedir. Her yeniden kristalleşme ostenit tane boyutunu küçülttüğünden imalatla art arda uygulanan deformasyon tane küçülmesini daha da artırır.

Genellikle yeniden kristalleşme sonucu oluşan ostenit tanelerinin çapı artan şekil değiştirme ile hızlı bir biçimde küçülür. Ancak yeniden kristalleşme ile elde edilebilecek tane boyutu küçülmesinin bir alt sınırı bulunmaktadır.

Yeniden kristalleşmiş ostenit taneleri için çeşitli denklemler literatürlerde bulunmaktadır. Bu eşitliklerin çoğunda; yeniden kristalleşme öncesi tanelerin boyutu D_0 , genleme ε , Zener-Holloman bağıntısı kullanılarak ifadeler geliştirilmiştir. Zener-Holloman bağıntısı, (2.5) eşitliği ile verilmektedir. (Backofen, 1972)

$$Z = \varepsilon \times e^{\frac{Q}{R.T}} \quad (2.5)$$

Malzemeler oda sıcaklığı koşullarında kayma mekanizması ile şekil değişimine uğrarken bir yandan da dislokasyon yoğunluğunun artışı ile pekleşmektedir. Yüksek sıcaklıklarda ve düşük şekil değiştirme hızlarında deforme edilen malzemelerde şekil değişimi dislokasyon kayması ve tane sınırı kayması yani sünme tarzında meydana gelir. Yüksek şekil değişimi hızlarında ise, sıcaklık yüksek olsa bile tane sınırı kaymasına yeterli zamanı tanımadığından şekil değişimi sadece dislokasyon hareketi ile olmaktadır.

Yüksek sıcaklıklarda dislokasyon kayması dislokasyon tırmanması ile meydana gelmektedir. Bu nedenle deformasyon şekil değiştirme hızı ile tırmanma hızının etkileşimine maruz kalmakta, ayrıca bu etkileşimin derecesi sıcaklıktan oldukça etkilenmektedir. Hıza bağlı olarak yüksek sıcaklıkta şekil verme anında bir miktar pekleşme ve bunun takibinde ise toparlanma görülebilmektedir. Eğer deformasyon

esnasında dislokasyon yoğunluğu yeterli seviyeye ulaşıyorsa, yeniden kristalleşme şekillendirme esnasında gerçekleşebilmektedir. Toparlanmanın ve yeniden kristalleşmenin deformasyon anında oluşması durumunda bu iki oluşum “DİNAMİK TOPARLANMA” ve “DİNAMİK YENİDEN KRİSTALLEŞME” olarak adlandırılmaktadır.

Dinamik yeniden kristalleşme ile meydana gelen yeni tanelerde bir miktar ikizlenme görülebilmektedir. Dinamik olarak yeniden kristalleşen tanelerin ortalama çapı Zener-Holloman bağıntısının bir fonksiyonu olarak aşağıda belirtilmektedir. (ASM Seminer Notları, 1966)

$$D_{DYK} = A \times Z^{-P} \quad (2.6)$$

Burada D_{DYK} tanelerin ortalama çapını, Z ise Zener-Holloman bağıntısını ifade etmektedir. A ve p ise malzemeye ait katsayıları teşkil etmektedir. Bununla beraber statik olarak yeniden kristalleşen tanelerin ortalama çapını veren bir fonksiyon da aşağıdaki (2.7) numaralı denklemle belirtilmektedir. (Backofen, 1972)

$$D_{YK} = C_1 + C_2 \cdot \varepsilon^m \cdot \bar{\varepsilon}^n \cdot D^l \cdot \exp\left(\frac{Q_{RX}}{R \cdot T}\right) \quad (2.7)$$

Burada dikkat çeken en önemli unsur, statik yeniden kristalleşmenin aksine, dinamik kristalleşme sonrası elde edilen tanelerin ortalama çapının başlangıçtaki çap değerinden bağımsız olmasıdır.

2.3.2 Yeniden kristalleşme sıcaklığı altındaki sıcaklıklarda deformasyonun tane boyutuna etkisi

Bu durumdaki sıcaklık ve şekil verme süresi yeniden kristalleşmeye yetmediğinden ostenit taneleri uzar ve tanelerin içlerinde deforme olmuş bir yapı korunarak malzeme soğumaya başlar. Deformasyon yapısının bulunması tane içlerinde ve sınırlarında ferrit çekirdeklenme hızı artırıcı etki yapar. Ferrit tanelerinin çekirdeklenmelerinin bu şekilde bilinçli olarak etkilenmesi malzemenin plastik şekil verilebilirliği açısından önemli bir etken oluşturmaktadır. Niobyum ve Titanyum gibi

elementler ostenitin yeniden kristalleşme sıcaklığını artırabildiklerinden dolayı bu amaca uygun olarak kullanılabilmektedirler. (Liu, 2001)

2.4 Plastik Şekil Verme Etkisiyle İçyapı Gelişimi

Öncelikle çekirdeklenmenin tane sınırlarında ve özellikle köşe birleşme noktalarında meydana geldiği, sonrasında tane içindeki dislokasyon bantları ve alt tane sınırları üzerinde olduğu bilinmektedir. Bu nedenlerle parçanın fazla deformasyona uğrayan kısımları küçük taneli bir yapıda olabilmektedirler.

Literatürde yaklaşık olarak 100µm' nin üzerindeki taneler iri boyutlu olarak kabul edilebilmektedir ve bunların yeniden kristalleşmeleri küçük boyutlu tanelere nazaran daha yavaş olmaktadır. (Backofen, 1972)

Alaşım elementlerinin oluşturdukları çökeltiler yeniden kristalleşmeyi geciktirmektedirler.

Bu alanda yapılmış olan çalışmaların çok büyük bir kısmı haddeme üzerine gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle de literatürdeki matematiksel ifadelerin büyük bir çoğunluğu haddeme işlemlerine yönelik olarak sunulmaktadır. Ancak mikro yapı mekanizmaları itibari ile bir fark taşımadığı için bu denklemlerin genel olarak sıcak şekil değişiminin diğer türleri için de geçerliliklerini koruduğu düşünülebilir.

2.4.1 İçyapının statik değişimi

Statik yeniden kristalleşmeyi ifade eden en popüler denklem Johnson – Mehl-Avrami- Kolmogorov tarafından ortaya koyulandır. (Lee, 2004)

Statik olarak yeniden kristalleşen bölgenin hacmi deformasyondan sonra geçen zamanın cinsi şeklinden ifade edilmektedir. Yeniden kristalleşen malzemenin kısmi oranı aşağıdaki ifadede elde edilebilmektedir.

$$X_{YK} = 1 - \exp \left[-A \times \left(\frac{t}{t_X} \right)^k \right] \quad (2.8)$$

k : Sabit bir katsayı.

t_x : x-oranı kadar malzemenin yeniden kristalleşmesi için geçen zaman.

t : Malzemenin sıcakta tutulduğu süre.

Yukarıdaki eşitliğe ait sabitler Tablo 2.1' de verilmektedir.

Tablo 2.1: Haddeleme İçin Statik Yeniden Kristalleşmeye Uğramış Kısım Denkleminin Sabitleri.

Katsayılar	A	k	Kaynak
C-Mn Çeliği	-0,693	2	Madakasira, Behera, Lahiri (2004)
AISI 316	-0,693	1	Lee (2004)
Nb Çeliği	-0,693	1,5	Beladi, Hodgson (2007)
Az Karbonlu Çelik	$-17,2 \times 10^{-4} d_0^{-0,48} Z^{-0,23}$	0,95	Siamak (2006)

Malzeme yapısının %50' sinin yeniden kristalleşmesi için geçen süreye yönelik aşağıdaki ifade benzeri literatürde birçok deneysel eşitlikler bulunmaktadır. (Lee, 2004)

$$t_{0,5X} = B \cdot \varepsilon^p \cdot D^q \cdot Z^r \cdot \overline{\varepsilon}^s \cdot \exp\left(\frac{Q_{RX}}{R \cdot T}\right) \quad (2.9)$$

Bu ifadedeki B, p, q, r, s malzemeye ait sabitlerdir. D, başlangıç tane boyutunu ifade etmektedir. Yukarıda ifade edilen eşitliğin haddeleme için önerilen sabitleri aşağıdaki Tablo 2.2' de verilmektedir.

Tablo 2.2: Haddelenmede Malzemenin % 50 Statik Yeniden Kristalleşmeye Uğraması İçin Gerekli Süre Denklemi İçin Sabitler.

Katsayılar	B	P	Q_{RX}	Kaynak
C-Mn Çeliği	$2,5 \times 10^{-19}$	-4	300000	Madakasira, Behera, Lahiri (2004)
AISI 316	$1,14 \times 10^{-13}$	-3,8	252000	Lee (2004)
Nb Çeliği	$2,35 \times 10^{-16}$	-3,5	250000	Beladi, Hodgson (2007)
Az Karbonlu Ç.	4.43×10^{-10}	-2,23	158000	Siamak (2006)

Malzeme modelinin oluşturulması amacıyla yeniden kristalleşme sonucu meydana gelen tane boyutunun da hesaplanabilmesi gerekmektedir. Bu amaçla en çok kullanılan eşitliklerden biri aşağıdaki denklem (2.10)' da verilmektedir. (Humphreys, 1995)

$$D_{SYK} = C_1 + C_2 \cdot \varepsilon^m \cdot \bar{\varepsilon}^n \cdot D^l \cdot \exp\left(\frac{Q_{RX}}{R \cdot T}\right) \quad (2.10)$$

İfadedeki sabitler malzeme türüne göre seçilmektedir.

Çökeltilerin yeniden kristalleşmeyi güçleştirici etkisi nedeniyle çelikler için yeniden kristalleşmenin görülmediği sıcaklığı alaşım elementlerinin % ağırlık miktarına göre veren ifade şu şekilde verilmektedir. (Humphreys, 1995)

$$T = 887 + 464[C] + (6445[Nb] - 644\sqrt{[Nb]}) + (723[V] - 230\sqrt{[V]}) + 890[Ti] + 363[Al] - 357[Si] \quad (2.11)$$

Yeniden kristalleşme sonrası oluşan yapıdaki son tane boyutu karışım prensibine göre aşağıdaki şekilde araştırmalarda kullanılmaktadır. (Siamak, 2006)

$$D_{SON} = X_{YK} \cdot D_{YK} + (1 - X_{YK}) \cdot D \quad (2.12)$$

D : Yeniden kristalleşme öncesi tane boyutu.

D_{YK} : Yeniden kristalleşmiş tane boyutu.

X_{YK} : Yapının kristalleşme oranı.

Aşağıdaki tabloda, basit karbonlu çeliklerinin statik yeniden kristalleşme durumları ile ilgili farklı modellemeler verilmektedir. (Liu, 2001)

Tablo 2.3: Bazı Az Karbonlu Çelikler İçin Statik Yeniden Kristalleşme Modelleri.

(1) Sellars ve Whiteman (1979): $X = 1 - \exp \left(\ln 0,5 \times \left(\frac{t}{t_{0,5}} \right)^2 \right)$ $t_{0,5} = 2,5 \times 10^{-19} \varepsilon^{-4} D_0^2 \exp \left(\frac{300000}{RT} \right)$
(2) Senuma ve Yada (1986): $t_{0,5} = 2,2 \times 10^{-12} \cdot S_v^{-0,5} \cdot \dot{\varepsilon}^{-2} \cdot \varepsilon^{-2} \cdot D_0^2 \cdot \exp \left(\frac{300000}{RT} \right); X = 1 - \exp \left(\ln 0,5 \times \left(\frac{t-t_0}{t_{0,5}} \right)^2 \right)$ $S_v = \frac{24}{\pi D_0} \{ 0,491 \exp(\varepsilon) + 0,155 \exp(-\varepsilon) + 0,1433 \exp(-3\varepsilon) \}$
(3) Kwon ve ark. (1990): $X = 1 - \exp \left(\ln 0,5 \times \left(\frac{t}{t_{0,5}} \right)^2 \right); t_{0,5} = 3,32 \times 10^{-15} \cdot Z^{-0,121} \cdot \varepsilon^{-3,144} \cdot D_0^{1,41452} \cdot \exp \left(\frac{285000}{RT} \right)$
(4) Roberts ve ark. (1983): $X = 1 - \exp \left(\ln 0,5 \times \left(\frac{t}{t_{0,5}} \right)^2 \right); t_{0,5} = 5 \times 10^{-21} \varepsilon^{-4} D_0^2 \exp \left(\frac{330000}{RT} \right)$
(5) Hodgson ve Gibbs(1990): $X = 1 - \exp \left(\ln 0,5 \times \left(\frac{t}{t_{0,5}} \right)^{1,5} \right); t_{0,5} = 0,53 \times 10^{-5} Z^{-0,82} \exp \left(\frac{240000}{RT} \right)$

2.4.2 İçyapının dinamik değişimi

Dövmeye ve haddeme gibi yüksek şekil verme hızlarında imalat yapılıyorsa dinamik yeniden kristalleşme çekirdekleri öncelikli olarak dislokasyonların yoğun olarak biriktiği yüksek açılı tane sınırlarında meydana gelecektir. Oluşacak olan bu yeniden kristalleşme çekirdeğinin büyüme yönü ise etrafındaki dislokasyon yoğunluğunun fazla olduğu tarafa doğru olacaktır.

Eğer başlangıç tane boyutu küçük ise dislokasyonların tane sınırına ulaşıp birikmesi daha az deformasyonla sağlanacağından ϵ_{kritik} değeri de daha küçük olacaktır. Bu değerin hesaplanması için literatürde aşağıdaki eşitlik önerilmektedir. (Totten, 2004)

$$\epsilon_{kritik} = A \cdot Z^p \cdot D^q \quad (2.13)$$

Buradaki A, p ve q değerleri sabitleri teşkil etmektedir. Ve genellikle aşağıdaki aralıktaki değerler kullanılmaktadır.

$$A : 4 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$$

$$p : 0,15 \sim 0,18$$

$$q : 0,2 \sim 0,5$$

Yine bu ifade içinde kullanılan Zener-Holloman bağıntısı içinde Q aktivasyon enerjisi de çelikler için yaklaşık olarak 320kJ/mol olarak kullanılmaktadır. (Totten, 2004)

Yukarıda ifade edilen denklem için gerekli sabitler aşağıdaki Tablo 2.4' de verilmektedir.

Tablo 2.4: Haddedelemde Dinamik Yeniden Kristalleşme İçin Kritik Genleme Denklemi Sabitleri.

Malzeme	A	p	q	Kaynak
C-Mn Çeliği	$4,9 \times 10^{-4}$	0,17	0,3	Madakasira, Behera, Lahiri (2004)
AISI 316	$6,97 \times 10^{-4}$	0,17	0,3	Lee (2004)
Nb Çeliği	$5,10 \times 10^{-4}$	0,17	0,3	Beladi, Hodgson (2007)
Az Karbonlu Çelik	$6,5 \times 10^{-4}$	0,132	0,43	Siamak (2006)

Dinamik yeniden kristalleşme sonucu elde edilen malzemenin kısmi hacmini veren ifade aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$X_{DYK} = 1 - \exp \left[B \cdot \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{kritik}}{C \cdot \varepsilon_{kritik}} \right)^K \right] \quad (2.14)$$

Çeliğin bileşimine göre B: -0,4 ~ -2 arasında, K: 1 ~ 1,5 arasında, C: 1 ~ 1,3 aralığında değişmektedir. Yukarıdaki denklem için gerekli olan sabitler alt kısımdaki Tablo 2.5’ de verilmektedir.

Tablo 2.5: Haddedelemde Dinamik Yeniden Kristalleşmeye Uğramış Kısım Oranı Denklemi Sabitleri.

Malzeme	B	k	Kaynak
C-Mn Çeliği	- 0,693	1	Madakasira, Behera, Lahiri (2004)
AISI 316	-0,8	1,4	Lee (2004)
Nb Çeliği	-0,682	2	Beladi, Hodgson (2007)
Az Karbonlu Ç.	$-17,2 \times 10^{-4} d_0^{-0,48} Z^{-0,23}$	1,6	Siamak (2006)

Dinamik yeniden kristalleşme sürekli olarak devam eden bir mekanizma olduğu için yeni tanelerin oluşumu ve dolayısı ile tane sınırları sürekli yer değiştirir. Bu nedenle deformasyon miktarı ile birlikte dinamik olarak yeniden kristalleşen tane hacim oranı artar. % 100 dinamik yeniden kristalleşmiş malzemede tane boyutu sabit bir haldedir. (Lee ve Hodgson, 2001)

$$D_{DYK} = \sqrt{D_0^2 (1 - X_{DYK}^2) + (X_{DYK} D_{DYK}^{100\%})^2} \quad (2.15)$$

2.4.3 İçyapının meta-dinamik değişimi

Dinamik yeniden kristalleşme deformasyon sonrasında da devam ediyorsa buna “META DİNAMİK YENİDEN KRİSTALLEŞME” adı verilmektedir. Statik ve meta-dinamik yeniden kristalleşme yumuşama mekanizması açısından benzer olmasına karşın, statik yeniden kristalleşme büyük oranda deformasyondan sonraki bekleme süresine bağlı iken, meta-dinamik yeniden kristalleşme de durum böyle değildir.

İki durum arasındaki diğer bir önemli fark ise; statik yeniden kristalleşme şekil değişimi esnasında herhangi bir yeniden kristalleşme meydana gelmeden bir bekleme süresi sonucunda oluşur.

Oysa meta-dinamik yeniden kristalleşme her zaman dinamik yeniden kristalleşme olduktan sonra meydana gelir. Statik yeniden kristalleşmenin aksine, meta-dinamik yeniden kristalleşmede çekirdeklenme süreci için herhangi bir süreye ihtiyaç yoktur. Çünkü dinamik yeniden kristalleşmede oluşan tanelerden yararlanır.

Meta-dinamik yeniden kristalleşen tanelerin hacim oranını veren formül statik yeniden kristalleşmedekinin aynısıdır sadece sabitlerin değerleri farklıdır (Beladi ve Hodgson, 2007)

$$X_{MDYK} = 1 - \exp \left[-A_1 \left(\frac{t}{t_{50}} \right)^k \right] \quad (2.16)$$

Yukarıda ifade edilen denklem için sabitler alttaki Tablo 2.6’ da verilmektedir.

Tablo 2.6: Haddeleme İçin Meta-Dinamik Yeniden Kristalleşmeye Uğramış Kısım Oranı Denklemi Sabitleri.

Katsayılar	A_1	k	Kaynak
C-Mn Çeliği	-0,693	1,5	Madakasira, Behera, Lahiri (2004)
AISI 316	-0,693	1,5	Lee (2004)
Nb Çeliği	-0,693	1,2	Beladi, Hodgson (2007)
Az Karbonlu Çelik	$-17,2 \times 10^{-4} d_0^{-0,48} Z^{-0,23}$	1,2	Siamak (2006)

Çeliklerin %50 oranında meta-dinamik yeniden kristalleşmesi için gereken zamanı veren ifade aşağıdaki şekilde önerilmektedir.

$$t_{0,5MDX} = A \cdot Z^s \cdot \exp\left(\frac{Q}{R \cdot T}\right) \quad (2.17)$$

$$A : 1 \times 10^{-5} \sim 1,12 \times 10^{-5}$$

$$s : -0,6 \sim -0,8$$

$$Q : 200 \sim 300 \text{ kJ / mol} \text{ arasında değerler almaktadır.}$$

Yukarıda ifade edilen denkleme ilişkin olarak değerler aşağıdaki Tablo 2.7' de verilmektedir.

Tablo 2.7: Haddelenmede % 50 Meta-Dinamik Yeniden Kristalleşmeye Uğraması İçin Gerekli Süre Denklemi Sabitleri.

Katsayılar	A	Q	Kaynak
C-Mn Çeliği	$1,06 \times 10^{-0.5}$	300000	Madakasira, Behera, Lahiri (2004)
AISI 316	1,1	230000	Lee (2004)
Nb Çeliği	$1,05 \times 10^4$	250000	Beladi, Hodgson (2007)
Az Karbonlu Ç.	$1,23 \times 10^5$	135000	Siamak (2006)

Meta-dinamik olarak yeniden kristalleşmiş tanelerin boyutunu veren ifade ise (2.18) eşitliğinde verilmektedir. Bu denkleme ait sabitler alttaki Tablo 2.8’ de sunulmaktadır.

$$D_{MDYK} = A \cdot Z^u \quad (2.18)$$

$A : 1000 \sim 25000$

$u : -0,1 \sim -0,25$

$Q : 312 \sim 320 \text{ kJ} / \text{mol}$, arasında verilmektedir.

Tablo 2.8: Haddelenmede Meta-Dinamik Yeniden Kristalleşmeye Uğramış Tane Boyutu Denklemi Sabitleri.

Katsayılar	A	u	Kaynak
C-Mn Çeliği	$1,8 \times 10^3$	-0,15	Madakasira, Behera, Lahiri (2004)
AISI 316	$2,6 \times 10^4$	-0,23	Lee (2004)
Nb Çeliği	$1,5 \times 10^3$	-0,25	Beladi, Hodgson (2007)
Az Karbonlu Çelik	$520 d_0^{-0,3}$	-0,08	Siamak (2006)

Meta dinamik yeniden kristalleşmenin görüldüğü bir yapı için ortalama tane boyutunu hesaplarken her aşamada oluşan tanelerin kısmi oranlarını ve tane boyutlarını dikkate almak gerekmektedir. (Lee ve Hodgson, 2001)

$$\bar{D} = D_{DYK} + (D_{MDYK} - D_{DYK}) \cdot X_{MDYK} \quad (2.19)$$

X_{MDYK} : Meta dinamik yeniden kristalleşme kısmi oranı.

D_{DYK} : Dinamik yeniden kristalleşen tanelerin boyutu.

D_{MDYK} : Meta-dinamik yeniden kristalleşen tanelerin boyutu.

Bunların yanı sıra zaman bağlı olarak tane boyutunu veren bir ifade ise aşağıdaki (2.20) eşitliği ile verilmektedir. (Beladi ve Hodgson, 2007)

$$D_{(t)} = D_{DYK} + 1,1 \cdot (D_{MDYK} - D_{DYK}) \cdot \left[1 - \exp \left(-295 \cdot \varepsilon^{0,1} \cdot \exp \left(\frac{-800}{T} \right) \right) \right] \cdot t \quad (2.20)$$

3.4.4 Tane büyümesi

Tane sınırlarında fazla enerji biriktiği zaman taneler yüzey alanını azaltarak büyüme yoluna gider. İlk tane boyutu ve haddelme esnasındaki sıcaklık tane büyümesini önemli ölçüde etkiler. Küçük taneler büyüklerine oranla daha hızlı büyürken yüksek sıcaklıklarda büyüme daha hızlı gerçekleşir. Çözünen atomların ve katışkılarının varlığı da tane büyümesini etkileyen diğer faktörlerdir. Sıcakta bekletilen malzemede oluşacak olan tane büyümesi açısından da ifadeler literatürde bulunmaktadır. (Lee ve Hodgson, 2001)

Tane büyümesinin modellenmesi için kuvvet yasasına dayanan ampirik eşitlikler ve Zener eşitliğine dayanan fiziksel modeller olmak üzere geniş ölçüde iki yaklaşım kullanılmaktadır. (Liu, 2001)

Ampirik eşitlikler, izotermal ısıtma esnasındaki tane büyümesi davranışlarını tanımlamak için geniş ölçüde kullanılmaktadır. Kuvvet yasası ilişkisi izotermal ısıtma işlem esnasında normal tane büyümesi için ilk olarak Beck (1948) tarafından aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir. (Liu, 2001)

$$D^n - D_{YK\%100}^n = K_1 \cdot t \quad (2.21)$$

Burada D ilk tane çapını, $D_{YK\%100}$ ise son tane çapını ifade ederken, t ise ısıtıl işlem süresini ifade etmektedir. Burada n ve k_1 ise sabitlerdir. Sellars ve Whiteman (1979) tarafından K_1 değerinin Arrhenius tipi bir eşitlikle ifade edilebileceğini belirtilmiştir. Bunun ardından ifade aşağıdaki şekilde düzenlenebilmektedir. (Liu, 2001)

$$D^n = D_{YK\%100}^n + K \cdot t \cdot \exp\left(\frac{Q}{R \cdot T}\right) \quad (2.22)$$

t : Yeniden kristalleşme sonrasında geçen zaman.

n, k : Sabitler.

$D_{YK\%100}$: %100 yeniden kristalleşmiş tane boyutu.

Burada n ve K sabit, Q ise tane büyümesi için gereken aktivasyon enerjisini ifade etmektedir. Basit karbonlu ve mikro alaşımlı çeliklerde tane büyümesi için bazı ampirik eşitlikler aşağıdaki Tablo 2.8 ve Tablo 2.9’da verilmektedir.

Tablo 2.9: Haddelenme İçin Statik Yeniden Kristalleşmede Tane Büyümesi Katsayıların Değişimi Denklemi Sabitleri. (Lee ve Hodgson, 2001)

Katsayılar	n	k	Q	Kaynak
C-Mn Çeliği,	7	1.45×10^{27}	-400000	Madakasira, Behera, Lahiri (2004)
AISI 316,	2	4×10^7	-113000	Lee (2004)
AISI 316,	7	1.5×10^{27}	-400000	Lee (2004)

Aşağıda bulunan Tablo 2.9 ise genel olarak sıcak şekil değişimine bağlı olarak yeniden kristalleşme tipine göre farklı denklem sabitleri verilmektedir. (Liu, 2001)

Tablo 2.10: Yeniden Kristalleşme Tiplerine Göre Değişik Çeliklerin Tane Büyümesi Denklemi Sabitleri. (Sellars ve Whiteman, 1979; Hodgson ve diğ. (1992); Manohar ve diğ. (1996))

Çelik Türü	n	K	Q	YK Tipi
C-Mn	10	$3,87 \times 10^{32}$	400kj/mol $T > 1273$ K	STATİK
	10	$5,02 \times 10^{53}$	914kj/mol $T < 1273$ K	
Az C-Mn	2	$4,27 \times 10^{12}$	278,4 kcal/mol	STATİK
0,22C-0,9Mn	2	$1,44 \times 10^{12}$	266,6 kcal/mol	STATİK
C-Mn Ve C-Mn-V	7	$1,45 \times 10^{27}$	400kj/mol	STATİK VEYA METADİNAMİK
C-Mn-Ti	10	$2,6 \times 10^{28}$	437kj/mol	STATİK VEYA METADİNAMİK
C-Mn-Nb	4,5	$4,1 \times 10^{23}$	435kj/mol	STATİK VEYA METADİNAMİK

Önerilen bir diğer ifade ise şu şekildedir. (Lee ve Hodgson, 2001)

$$D^n = D_{YK\%100}^n + t \cdot 10^{\left(a - \frac{b}{T}\right)} \quad (2.23)$$

Denklem (2.22) ve denklem (2.23) ile verilen bu iki eşitlikte çelik türlerine bağlı kalmak kaydıyla; n : 2 ~ 10 arasında, K : $4,27 \times 10^{12} \sim 2,6 \times 10^{28}$ arasında, Q : 67 ~ 440 kj/mol aralığında, a : 6,5 ~ 9,5 arasında ve b : 5900 ~ 11000 aralığında değişmektedir.

2.5 Çeliklerin Sıcak Dövülmesinde Mekanik Özellik Modelleri

Şekil değişimi prosesinde plastik olarak şekil değiştiren çeliklerin sıcaklık, genleme hızı, genleme miktarı ve kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak plastik davranışlarını ortaya koyan çeşitli matematiksel modeller oluşturulmuştur. Bu denklemlerde genleme, sıcaklık, genleme hızı parametrelerinin gerilme değeri ile ilişkisi ortaya koyulmuştur. Haddelemeye ait olarak oluşturulan denklemlerden bazıları aşağıdaki gibidir.

2.5.1 Zyunzin denklemi (Lee, 2004)

Aşağıdaki denklem değişik kalite çelikler üzerinde yapılmış olan deneyler sonucunda ortaya koyulmuştur. Zyunzin'in denkleminin uygulama sıcaklık aralığı 900 ile 1200 °C' dir ve 10^{-1} ile 10^{-2} s^{-1} genleme hızları arasında işlem gören ve genleme değeri 0,5 den az olan çelikler için uygulanmaktadır.

$$\sigma = \sigma_0 \cdot k_T \cdot k_{\dot{\epsilon}} \cdot k_{\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon}} \quad (2.24)$$

Denklemdaki sabitler aşağıdaki gibidir;

σ_0 = Herhangi bir kimyasal kompozisyondaki malzeme için akma gerilmesi değeri

k_T = Sıcaklık parametresi için katsayı

$k_{\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon}}$ = Genleme değeri için katsayı

$k_{\dot{\epsilon}}$ = Genleme hızı için katsayı

Sıcaklık ve genleme hızı aralığının dar olması nedeniyle eşitlik sınırlı sayıda uygulama alanı bulabilir.

2.5.2 Misaka denklemi (Misaka, 1967)

Aşağıdaki denklem ile deformasyona karşı malzemenin gösterdiği ortalama dayanım sıcaklık, genleme, genleme hızı ve karbon içeriğinin fonksiyonu olarak saptanmıştır.

$$\bar{\sigma}_m = \exp \left(0,216 - 1,75 \cdot [C] + 0,594 \cdot [C]^2 + \frac{2851 + 2968 \cdot [C] - 1126 \cdot [C]^2}{T} \right) \cdot \varepsilon^{0,21} \cdot \dot{\varepsilon}^{0,13} \quad (2.25)$$

Denklemde T, °C cinsinden sıcaklık ve [C] ise karbon içeriğini ifade etmektedir. Bu denklemin uygulama aralığı ise 1.2 % karbona kadar, 750 – 1200 °C arası sıcaklığa, 0,5 kadar genleme ile 30 - 200 s⁻¹ genleme hızları arasındadır.

2.5.3 Shida denklemi (Shida, 1969)

Bu denklemin uygulama aralığı ise 0,07–1,2 % karbon, 700–1200 °C arası sıcaklık, 0,7 kadar genleme ile 100 s⁻¹ genleme hızı arasındadır. Çeliklerin plastik şekil verme sırasında akma dayanımı (σ_y); karbon içeriği, genleme, genleme hızı ve malzemenin deformasyon direnç fonksiyonu $\sigma_d(C, T_n)$ ve normalizasyon sıcaklığı (T_n) nin fonksiyonu olarak ifade edilmektedir;

$$\sigma_y = \sigma_d(C, T_n) \cdot f_w(\bar{\varepsilon}) \cdot f_r(\dot{\varepsilon}) \quad (2.26)$$

Deformasyon direnç fonksiyonu ise;

$$\sigma_d = 0.28 \exp \left(\frac{5}{T_n} - \frac{0.01}{C + 0.05} \right) \quad T_n > T_p \quad (2.27)$$

veya;

$$\sigma_d = 0.28 g(C, T_n) \exp \left(\frac{C + 0.32}{0.19(C + 0.41)} - \frac{0.01}{C + 0.05} \right) \quad T_n \leq T_p \quad (2.28)$$

$$T_n = \frac{T_n + 273}{1000} \quad \text{ve} \quad T_p = 0.95 \frac{C + 0.41}{C + 0.32} \quad (2.29)$$

Bu denklemlerdeki T Celcius cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir. Yukarıda verilen denklemlerde T_p sıcaklığı T_n sıcaklığını aşarsa malzemede faz dönüşümü meydana gelmektedir.

2.5.4 Johnson ve Cook denklemi (Johnson ve Cook, 1983)

Denklem malzemenin plastik deformasyonuna ve genleme hızına bağlı olarak dayanım değişimini ortaya koymuştur. Bu modele göre gerilmenin genleme, genleme hızı ve sıcaklığa bağlı olarak değişimi;

$$\bar{\sigma} = \left[A + B \bar{\epsilon}^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T} \right)^k \right] \quad (2.30)$$

fonksiyonu ile ifade edilmektedir. Denklemdeki A, B, C, n ve k malzeme sabitleri olup deney sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen regresyon analizleri sonucu ortaya çıkarılmışlardır. T, T_0 ve T_m sırasıyla mevcut, referans ve erime sıcaklıklarıdır.

$$\bar{\sigma} = \left[A + B \bar{\epsilon}^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T} \right)^k \right] H(t) \quad (2.31)$$

$$H(t) = \frac{1}{1 - [1 - (\sigma_f)_{rec} / (\sigma_f)_{def}] u(T)} \quad (2.32)$$

U(T) sıcaklığa bağlı bir adım fonksiyondur.

$$u(T) = 0, \quad \text{eğer } T < T_c$$

$$= 1, \quad \text{eğer } T > T_c;$$

T_c sıcaklığı dinamik yeniden kristalleşme veya faz dönüşümünün meydana geldiği sıcaklık değeridir. $(\sigma_f)_{rec}$ ve $(\sigma_f)_{def}$ ise yeniden kristalleşme öncesi ve sonrası gerilme değerleridir.

2.6 Sıcak Şekillendirme İçin Malzeme Modelleri

Literatürde birçok matematiksel malzeme modeline rastlanmasına karşın, birçoğu tam kapsamlı olmamakta veya çözümleme için etkin rol oynayan katsayıların belirlenmesinde sorunlar bulunmaktadır. Çeşitli makale ve çalışmalarda karşılaşılan ve yoğun olarak kullanılan C-Mn çelikleri ile az karbonlu çelikler için önerilen 3 farklı malzeme modeli aşağıda tanıtılmaktadır.

2.6.1 P. D. Hodgson modeli: (Phaniraj, Behera ve Lahiri, 2004)

Hodgson modeli silindir haddeme üzerine yapılan araştırmalardan çıkarılmış denklemlerden oluşmaktadır. Hodgson modeli statik ve meta-dinamik yeniden kristalleşmeyi ele almaktadır. Bu nedenle kritik şekil değişimi miktarlarının yani ε_{kritik} değerlerinin hesaplanmasında denklem (2.33) den yararlanılmaktadır.

$$\varepsilon_{kritik} = \frac{5}{6} \cdot \varepsilon_P \quad (2.33)$$

ε_P değeri uç genleme (peak strain) miktarıdır, ve denklem (2.34) yardımı ile hesaplanır.

$$\varepsilon_P = 5,6 \cdot 10^{-4} \cdot D_0^{0,3} \cdot Z^{0,17} \quad (2.34)$$

D_0 şekil değişimi öncesindeki ostenit tane boyutunu ifade etmektedir. Literatürde ki birçok çalışma için bu değer 100µm olarak tanımlanmakta ve kabul edilmektedir. (Phaniraj, Behera ve Lahiri, 2004) Z ise (2.35) ile verilmekte olan Zener-Holloman eşitliğini ifade etmektedir.

$$Z = \dot{\varepsilon} \cdot \exp\left(\frac{300000}{R \cdot T}\right) \quad (2.35)$$

$\dot{\varepsilon}$ şekil değişimi hızını ifade etmektedir. R üniversal gaz sabiti ve T ise Kelvin cinsinden sıcaklık değeridir.

Malzemenin %50'lik kısmının statik olarak yeniden kristalleşmesi için gereken süre (2.36) ile ifade edilen denklem ile hesaplanabilmektedir.

$$t_{0,5SYK} = 2,3 \cdot 10^{-15} \cdot D_0^2 \cdot \varepsilon^{-2,5} \cdot \exp\left(\frac{230000}{R \cdot T}\right) \quad (2.36)$$

Statik yeniden kristalleşme oranı (2.37) numaralı denklemle verilir ve denklemdeki “t” değeri şekil değişiminden sonra sıcakta bekleme miktarını ifade etmektedir.

$$X_{SYK} = 1 - \exp\left[-0,693 \cdot \left(\frac{t}{t_{0,5SYK}}\right)\right] \quad (2.37)$$

Yapının %50’lik kısmının meta-dinamik yeniden kristalleşmesi için gereken süre denklemi ise şu şekilde denklem (2.38) ile verilmektedir.

$$t_{0,5MDYK} = 1,1 \cdot Z^{-0,8} \cdot \exp\left(\frac{230000}{R \cdot T}\right) \quad (2.38)$$

Meta-dinamik olarak yeniden kristalleşen kısmının oranının hesaplanması için denklem (2.39) kullanılmaktadır.

$$X_{MDYK} = 1 - \exp\left[-0,693 \cdot \left(\frac{t}{t_{0,5SYK}}\right)^{1,5}\right] \quad (2.39)$$

Statik yeniden kristalleşme ile oluşabilecek tane boyutu;

$$D_{SYK} = 343 \cdot D_0^{0,4} \cdot \varepsilon^{-0,5} \cdot \exp\left(\frac{-450000}{R \cdot T}\right) \quad (2.40)$$

şeklinde belirtilmektedir. Meta-dinamik yeniden kristalleşen tane boyutuna ait denklem ise aşağıdaki şekilde sunulmaktadır.

$$D_{MDYK} = 2,6 \cdot 10^4 \cdot Z^{-0,23} \quad (2.41)$$

Aynı zamanda tane büyümesi içinde şu şekilde denklem (2.42) verilmektedir.

$$D_{gg}^7 = D_*^7 + 1,45 \cdot 10^{27} \cdot t \cdot \exp\left(\frac{-400000}{R \cdot T}\right) \quad (2.42)$$

Bu ifadede ki t D_* başlangıç boyutundaki tanelerin sıcakta beklediği süreyi ifade etmektedir.

2.6.2 Sellars modeli: (Phaniraj, Behera ve Lahiri, 2004)

Sellars modeli de Hodgson da olduğu gibi haddeme üzerine yapılan araştırmalardan çıkarılmış denklemlerden oluşmaktadır.

Sellars modeli de statik ve meta-dinamik yeniden kristalleşmeyi ele almaktadır. Bu nedenle kritik şekil değişimi miktarlarının yani ε_{kritik} değerlerinin hesaplanmasında denklem (2.43) den yararlanılmaktadır. Bu denklem Hodgson'un kullandığı denklem ile aynıdır.

$$\varepsilon_{kritik} = \frac{5}{6} \cdot \varepsilon_P \quad (2.43)$$

ε_P değeri denklem (2.44) yardımı ile hesaplanır.

$$\varepsilon_P = 4,9 \cdot 10^{-4} \cdot D_0^{0,3} \cdot Z^{0,15} \quad (2.44)$$

Zener-Holloman eşitliği ise şu şekilde verilmektedir.

$$Z = \dot{\varepsilon} \cdot \exp\left(\frac{312000}{R \cdot T}\right) \quad (2.45)$$

Sellars'a göre malzemenin %50'lik kısmının statik olarak yeniden kristalleşmesi için gereken süre:

$$t_{0,5SYK} = 2,5 \cdot 10^{-19} \cdot D_0^2 \cdot \varepsilon^{-4} \cdot \exp\left(\frac{300000}{R \cdot T}\right) \quad (2.46)$$

biçiminde ifade edilmektedir. Statik olarak yeniden kristalleşen kısım oranı (2.47) ile hesaplanmaktadır.

$$X_{SYK} = 1 - \exp \left[-0,693 \cdot \left(\frac{t}{t_{0,5SYK}} \right)^2 \right] \quad (2.47)$$

Yapının %50'lik kısmının meta-dinamik yeniden kristalleşmesi için gereken süre (2.48) ile hesaplanmaktadır.

$$t_{0,5MDYK} = 1,06 \cdot 10^{-5} \cdot Z^{-0,6} \cdot \exp \left(\frac{300000}{R \cdot T} \right) \quad (2.48)$$

Meta-dinamik olarak yeniden kristalleşen kısmın oranının hesaplanması için alttaki (2.49) denkleminde yararlanılmaktadır.

$$X_{MDYK} = 1 - \exp \left[-0,693 \cdot \left(\frac{t}{t_{0,5SYK}} \right) \right] \quad (2.49)$$

Sellers tarafından ifade edilen (2.50) ve (2.51) tane boyutu denklemleri statik ve meta-dinamik yeniden kristalleşme sonrası oluşan tane boyutlarını vermektedir.

$$D_{SYK} = 0,5 \cdot D_0^{0,67} \cdot \varepsilon^{-1} \quad (2.50)$$

$$D_{MDYK} = 1,8 \cdot 10^3 \cdot Z^{-0,15} \quad (2.51)$$

Tane büyümesi içinde şu şekilde bir denklem önerilmektedir.

$$D_{gg}^{10} = D_*^{10} + 5,02 \cdot 10^{53} \cdot t \cdot \exp \left(\frac{-914000}{R \cdot T} \right) \quad (2.52)$$

2.6.3 Senuma modeli: (Totten, Xie ve Funatani, 2004)

Senuma modelinin, çeşitli sıcak deformasyon yöntemleri için kullanılabileceği belirtilmektedir. (Totten, Xie ve Funatani 2004)

Senuma'nın önerdiği bu malzeme modelinde statik ve dinamik yeniden kristalleşme ele alınmakta ve dinamik yeniden kristalleşme olup olmadığını ifade etmek için kullanılan ε_{kritik} değeri denklem (2.53) ile verilmektedir.

$$\varepsilon_{kritik} = 4,76 \cdot 10^{-4} \cdot \exp\left(\frac{8000}{T}\right) \quad (2.53)$$

Zener-Holloman eşitliği aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır ve bu ifade deki Q aktivasyon enerjisi birim olarak (cal/mol*K) biçiminde kullanıldığı belirtilmektedir.

$$Z = \dot{\varepsilon} \cdot \exp\left(\frac{63800}{R \cdot T}\right) \quad (2.54)$$

Malzemenin %50'lik kısmının statik olarak yeniden kristalleşmesi için gereken süre şu denklemden elde edilmektedir.

$$t_{0,5SYK} = 0,286 \cdot 10^{-7} \cdot S_v^{-0,5} \cdot \varepsilon^{-2} \cdot \dot{\varepsilon}^{-0,2} \cdot \exp\left(\frac{30000}{T}\right) \quad (2.55)$$

Sv katsayısı şu şekilde tanımlanmaktadır.

$$S_v = \left(\frac{24}{\pi \cdot D_0}\right) \cdot (0,491 \cdot e^{\varepsilon} + 0,155 \cdot e^{-\varepsilon} + 0,1433 \cdot e^{-3\varepsilon}) \quad (2.56)$$

Statik olarak yeniden kristalleşen kısım oranı (2.57) ile hesaplanmaktadır.

$$X_{SYK} = 1 - \exp\left[-0,693 \cdot \left(\frac{t}{t_{0,5SYK}}\right)^2\right] \quad (2.57)$$

Yapının %50'lik kısmının dinamik olarak yeniden kristalleşmesine neden olan şekil değişimi miktarını veren denklem şu şekilde belirtilmektedir.

$$\varepsilon_{0,5} = 1,144 \cdot 10^{-3} \cdot D_0^{0,28} \cdot \dot{\varepsilon}^{0,05} \cdot \exp\left(\frac{6420}{T}\right) \quad (2.58)$$

Dinamik olarak yeniden kristalleşen kısım oranı ise şu denklemle belirtilmektedir.

$$X_{DYK} = 1 - \exp\left[-0,693 \cdot \left(\frac{(\varepsilon - \varepsilon_C)}{\varepsilon_{0,5}}\right)^2\right] \quad (2.59)$$

Senuma tarafından ifade edilen (2.60) ve (2.61) deki tane boyutu denklemleri statik ve dinamik olarak yeniden kristalleşme sonrası oluşan tane boyutlarını vermektedir.

$$D_{SYK} = \frac{5}{(S_v \cdot \varepsilon)^{0,6}} \quad (2.60)$$

$$D_{DYK} = 22600 \cdot Z^{-0,27} \quad (2.61)$$

Tane büyümesi içinde şu şekilde bir denklem önerilmektedir.

$$D_{gg}^2 = D_*^2 + 1,44 \cdot 10^{12} \cdot t \cdot \exp\left(\frac{-63800}{R \cdot T}\right) \quad (2.62)$$

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

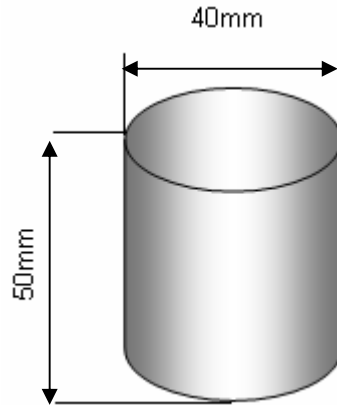
3.1. Deney Numunesi Malzemesi ve Hazırlanışı

Deneyisel çalışmada kullanılan numuneler AISI 1040 çeliğinden silindirik biçimli olarak hazırlanmıştır. Tablo 3.1’ de bu malzemenin içerdiği elementlerin miktarı verilmektedir.

Tablo 3.1: Deney Numunesi Malzemesinin İçeriği.

NUMUNE MALZEMESİ	C İÇERİĞİ %	Mn İÇERİĞİ %	P İÇERİĞİ %	S İÇERİĞİ %
AISI 1040	0,37 – 0,44	0,60 – 0,90	0,040	0,050

Numuneler tek bir başlangıç çapı ve başlangıç boyunda hazırlanmıştır. 40mm çapındaki çubuktan kesilerek ve taban yüzeyleri 50mm boya sahip olacak şekilde tornalanmak suretiyle işlenmiştir. Çeşitli sıcaklıklarda gerçekleştirilen deneyler için toplamda 38 adet numune hazırlanmıştır. Numunelerin başlangıç ölçüleri aşağıdaki Şekil 3.1’ de verilmektedir.



Şekil 3.1 : Deney Numunesi ve Ölçüleri.

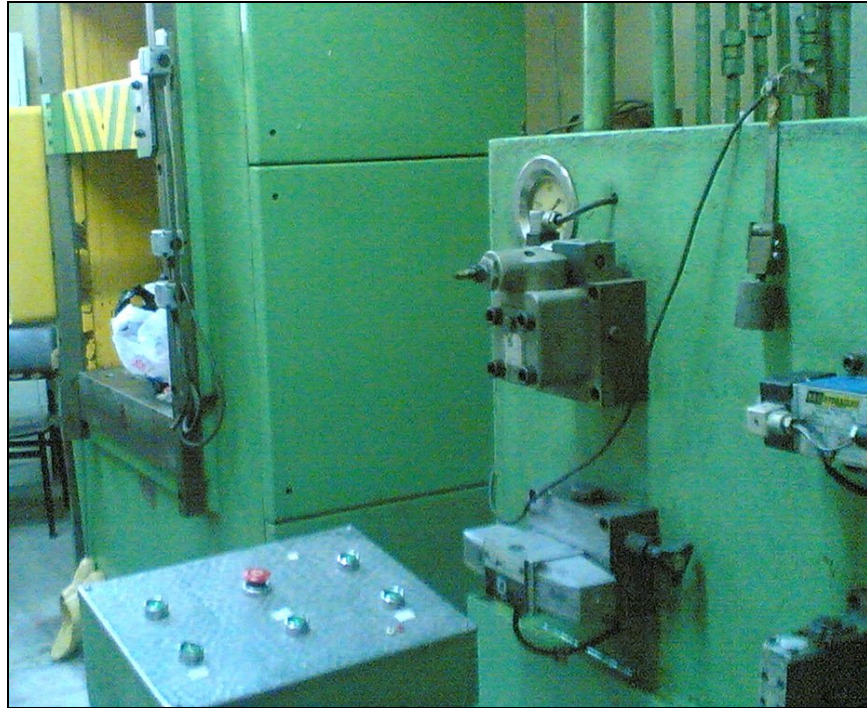
40, 30 ve 20mm yüksekliklere yığılan numunelerin şekil değişimi miktarları ve deneylerin uygulama sıcaklıkları aşağıdaki Tablo 3.2’ de verilmektedir.

Tablo 3.2: Yığma Deneylerindeki Şekil Değişimi Miktarları ve Uygulama Sıcaklıkları.

ŞEKİL DEĞİŞİMİ	800 DERECE	900 DERECE	1000 DERECE	1100 DERECE
$\Delta h / h_0 = 0,20$	3 adet	3 adet	4 adet	3 adet
$\Delta h / h_0 = 0,40$	3 adet	3 adet	3 adet	3 adet
$\Delta h / h_0 = 0,60$	4 adet	3 adet	3 adet	3 adet

3.2 Deney Ekipmanları ve Cihazlar

Yığma işlemi 200 ton kapasiteli bir hidrolik preste gerçekleştirildi. Aşağıdaki resimde deneysel çalışmada kullanılan presin resmi görülebilmektedir.



Şekil 3.2 : Yığmanın Gerçekleştirildiği Hidrolik Pres.

Yığılma kalıbı olarak ısıtmasız, düzlemsel açık kalıp kullanılmıştır. Yığılma strok mesafesinin bitirilmesinde yığılma son boyu ölçüsünde imal edilen takozlar kullanılmıştır.

Numunelerin ısıtılmasında, 1200 °C sıcaklığa kadar ısıtma yapabilen sıcaklık kontrollü bir fırın kullanılmıştır. Kullanılan fırına ait resim aşağıda verilmektedir.



Şekil 3.3 : Numunelerin Isıtıldığı Fırın.

Kullanılan fırının sıcaklık göstergesinin yapabileceği sapmalardan ve fırının iç kısmındaki bölgesel sıcaklık farklılıklarının etkisinden sakınmak için sıcaklık fırın içerisine uzatılıp numunelere temas ettirilen K tipi bir termokupl ile hassas bir biçimde ölçülmüştür. Kullanılan sıcaklık ölçer 1400 °C sıcaklığa kadar ölçüm alabilmektedir. (Şekil 3.4)



Şekil 3.4 : K Tipi Termo Eleman.

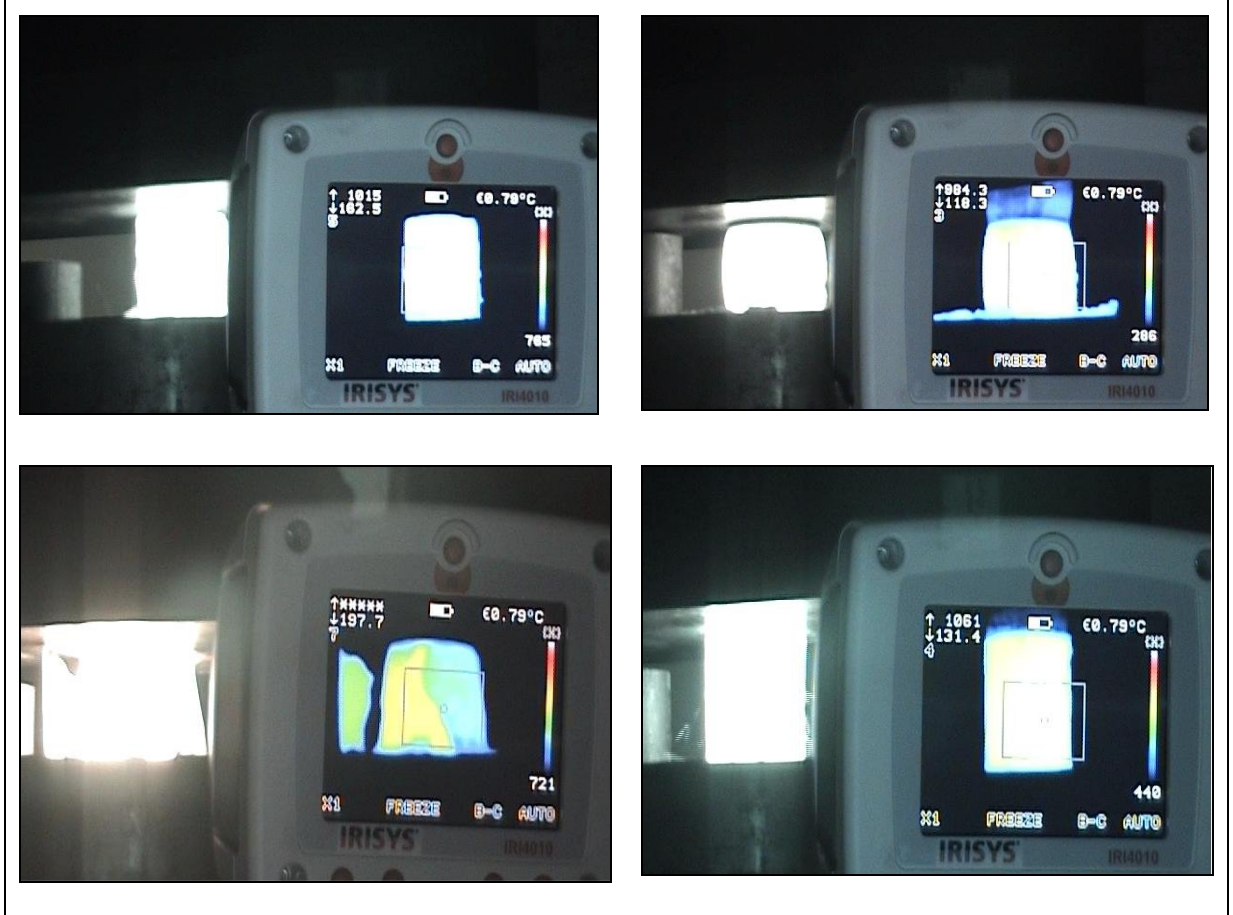
Ayrıca deney esnasında numunelerin sıcaklık değişiminin takip edilmesi amacıyla 1200 °C ‘ye kadar ölçüm alabilen termal bir kameradan (Şekil 3.5) yararlanılmıştır. Termal kameranın sürekli kayıt alamaması nedeni ile termal kamera ekranı ve şekil değiştiren numune görüntüleri, bir video kamera ile kaydedilmiştir.



Şekil 3.5 : IRISYS IRS4010 Termal Kamera.

3.3 Deney Görüntüleri

Deneyisel çalışmalar 4 ayrı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Bu sıcaklıklar 800, 900, 1000 ve 1100 °C olarak belirlenmiştir. Numuneler ait işlem görüntülerinde bazı kareler aşağıdaki Şekil 3.6’ da verilmektedir.



Şekil 3.6 : Deney Esnasındaki Termal Kamera ve Şekil Değişimi Görüntüleri.

Deneyisel çalışmalarda $\ln(h/h_0)$ ile hesaplanan 3 ayrı gerçek şekil değişimi oranları olan $\varepsilon = -0,22$; $\varepsilon = -0,51$ ve $\varepsilon = -0,92$ değerleri uygulanmıştır. Bunun temel amacı malzeme mikro yapısındaki değişikliklerin şekil değişiminden ve işlem sıcaklıklarından etkilenmesini değerlendirmektir. Tablo 3.3’ de deneylerdeki termal kamera ile okunan işlem başlangıç ve bitiş sıcaklık değerleri, şekil değişimi süresi ve miktarına ait değerler verilmektedir.

Tablo 3.3: Numunelere Göre Şekil Değişimi İşlemine Ait Başlangıç ve Bitiş Sıcaklık Farkları ve Şekil Değişimi Miktarları.

NUMUNE KODU	İŞLEM SICAKLIĞI (C)	ε	BAŞLANGIÇ SICAKLIĞI (C)	BİTİŞ SICAKLIĞI (C)	SICAKLIK FARKI (C)	İŞLEM SÜRESİ (sn.)
801	800	-0,92	812,11	800,02	-12,09	8,00
802			830,67	807,00	-23,67	7,72
803			804,67	807,86	3,19	7,68
804			851,24	860,79	9,55	7,24
805		-0,51	807,64	810,83	3,19	5,68
806			832,04	842,65	10,61	4,80
807			850,71	861,10	10,39	4,72
808		-0,22	826,68	821,90	-4,78	2,64
809			836,86	819,97	-16,89	2,64
810			853,63	827,89	-25,74	2,64
901	900	-0,92	937,45	977,16	39,71	7,24
902			928,27	957,61	29,34	7,16
903			922,44	960,16	37,72	7,22
904		-0,51	940,10	915,79	-24,31	4,60
905			932,53	953,57	21,04	4,68
906			932,67	972,83	40,16	4,64
907		-0,22	933,17	964,23	31,06	2,52
908			923,17	951,79	28,62	2,56
909			928,70	953,71	25,01	2,68
101	1000	-0,92	1041,82	1063,61	21,79	7,08
102			1014,09	1065,85	51,76	6,92
103			1038,95	1056,16	17,21	7,00
104		-0,51	1011,16	1014,98	3,82	4,44
105			1046,60	1096,32	49,72	4,24
106			1009,66	1081,02	71,36	4,52
107		-0,22	1012,45	987,30	-25,15	2,60
108			1009,31	1105,88	96,57	3,24
109			1025,56	1078,15	52,59	2,60
110			1014,09	1059,98	45,89	2,60
111	1100	-0,92	1096,60	1118,31	21,71	6,60
112			1090,94	*	-	6,48
113			1097,99	1114,49	16,50	6,68
114		-0,51	1082,93	*	-	4,36
115			1119,27	1098,23	-21,04	2,16
116			1093,37	*	-	4,40
117		-0,22	1093,81	*	-	2,68
118			1116,40	1102,06	-14,34	2,64
119			1092,42	*	-	2,68

Tablo 3.3’ deki verilerden görüldüğü üzere şekil değişimi esnasında numunelerin sıcaklığında işlem esnasında büyük artışlar ve azalışlar görülmektedir. Ayrıca 1100°C de yapılan bazı deneylerde sıcaklıktaki değişimler termal kameranın

algılama sınırları dışına çıkışabilmiştir. Bu nedenle termal kameranın okuduğu değerlere güvenilemeyeceği düşünülerek deformasyon anındaki sıcaklık değişimi değerlendirme dışı tutulmuştur. Yalnız, termal kamerayı görüntülemekte olan diğer kameranın zaman göstergesinden yararlanılarak deformasyon hızları hesaplanmıştır.

3.4 Numunelerin Metalografik İnceleme İçin Hazırlanması

Deneyler sonucunda numunelerin oda koşullarında soğumaya bırakılması ardından tamamen soğumuş olan numuneler üzerine numaratorler yardımı ile numune kodları yazılmıştır.

Verilen numaralarda ilk rakam 800, 900 ve 1000 °C için sıcaklıkları ifade etmektedir. Ancak 1100 °C için ilk iki rakam sıcaklığı ifade etmektedir. 800 °C için 10, 900 °C için 9, 1000 °C için 10 ve 1100 °C için ise 9 olmak üzere 38 adet numuneye işlem yapılmıştır.

Metalografi incelemesi için numunelerin hazırlanmasında ilk yapılan işlem, yığılmış parçaları merkezlerinden dekupaj testeresi ile kesmektir. Bu kesimin ardından yüzey hazırlamayı kolaylaştırmak için, parçalar planya tezgâhına bağlanarak ince bir talaş kaldırma işlemi uygulanmıştır. Bunu takiben numuneler kaba taşlamayla taşlanıp, ardından zımparalama işlemine geçilmiştir. İlk olarak 180 kum zımpara uygulanmıştır. Bütün numunelerin zımparalanmasında parçaların büyük boyutlu olmaları nedeni ile bakalite alınmadan ve otomatik tezgahtan yararlanmadan zımparalamalar elle gerçekleştirilmiştir. 180 kumu takiben 320, 400, 600 ve 1000 kumluk zımparalar ile zımparalama işlemine devam edilmiştir. Bu zımparalama işlemleri Şekil 3.7’ de resmi verilen zımparalama ve parlatma makinesinde yapılmıştır.



Şekil 3.7 : Metalografik Numune Zımparalama ve Parlatma Tezgahı.

3.5 Numunelerin Sertlik Ölçümleri

1000 kumluk zımpara ile zımparalanmasından sonra numuneler üzerinden bölgesel olarak sertlik ölçümleri alınmıştır. Sertlik ölçümleri için HMV SHIMADZU mikro sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçüm cihazına ait görüntü Şekil 3.8’de yer almaktadır.

Kullanılan sertlik ölçüm cihazında hem mikro sertlik olarak Vickers değerleri hem de Rockwell C eşdeğerleri verilmektedir. Yapılan ölçümlerde mümkün olduğu ölçüde makro ölçüm alınmaya çalışılarak cihazın maksimum yük kapasitesi olan 19,614 N yük uygulanmıştır. Yükleme süresi 20 saniyedir ve lens büyütmesi 40X olarak seçilmiştir.

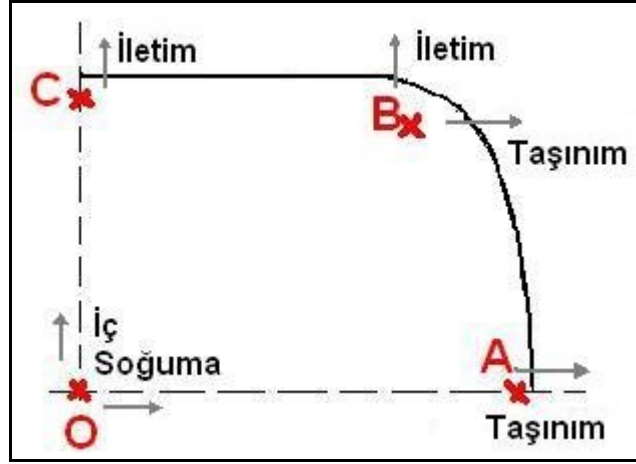


Şekil 3.8 : HMV Shimadzu Mikro Sertlik Ölçüm Cihazı.

Alınan sertlik ölçümlerinin birbirleri ile karşılaştırılmasında aynı karakteristik bölgelerin birbirleri ile karşılaştırılması amacı ile numuneler üzerinde 4 farklı karakteristik bölge tanımlanmış ve bu bölgelerden ölçümler alınmıştır.

Bu belirlenen karakteristik bölgeler; en yavaş soğuyan numune orta düzlem merkezleri (O Noktası), en çok şekil değiştiren ve hava ile soğuyan orta düzlemdeki yüzey kısmı (A Noktası), fiçilaşma etkisi ile en az şekil değiştiren ve hem hava ile hem de kalıba olan iletimle soğuyan temas yüzeyinin dış kısmı (B Noktası) ve son

olarak kalıba teması sayesinde sadece iletimle soğuyan ve fiçilaşma etkisiyle en az şekil değişimine uğrayan, silindir ekseninin geçtiği bölge (C Noktası) olarak tanımlanmıştır. Bu bölgelerin yerlerini ve soğuma tarzlarını ifade eden gösterim aşağıdaki Şekil3.9’ da verilmektedir.



Şekil 3.9 : Sertlik Ölçümü İçin Belirlenen Karakteristik Bölgeler.

Buradan da anlaşılacağı üzere teorik olarak soğuma hızlarının ($\dot{T}$) bölgeler arası durumu şu şekilde olacaktır.

$$\dot{T}_{O \text{ Noktası}} < \dot{T}_{A \text{ Noktası}} < \dot{T}_{C \text{ Noktası}} < \dot{T}_{B \text{ Noktası}}$$

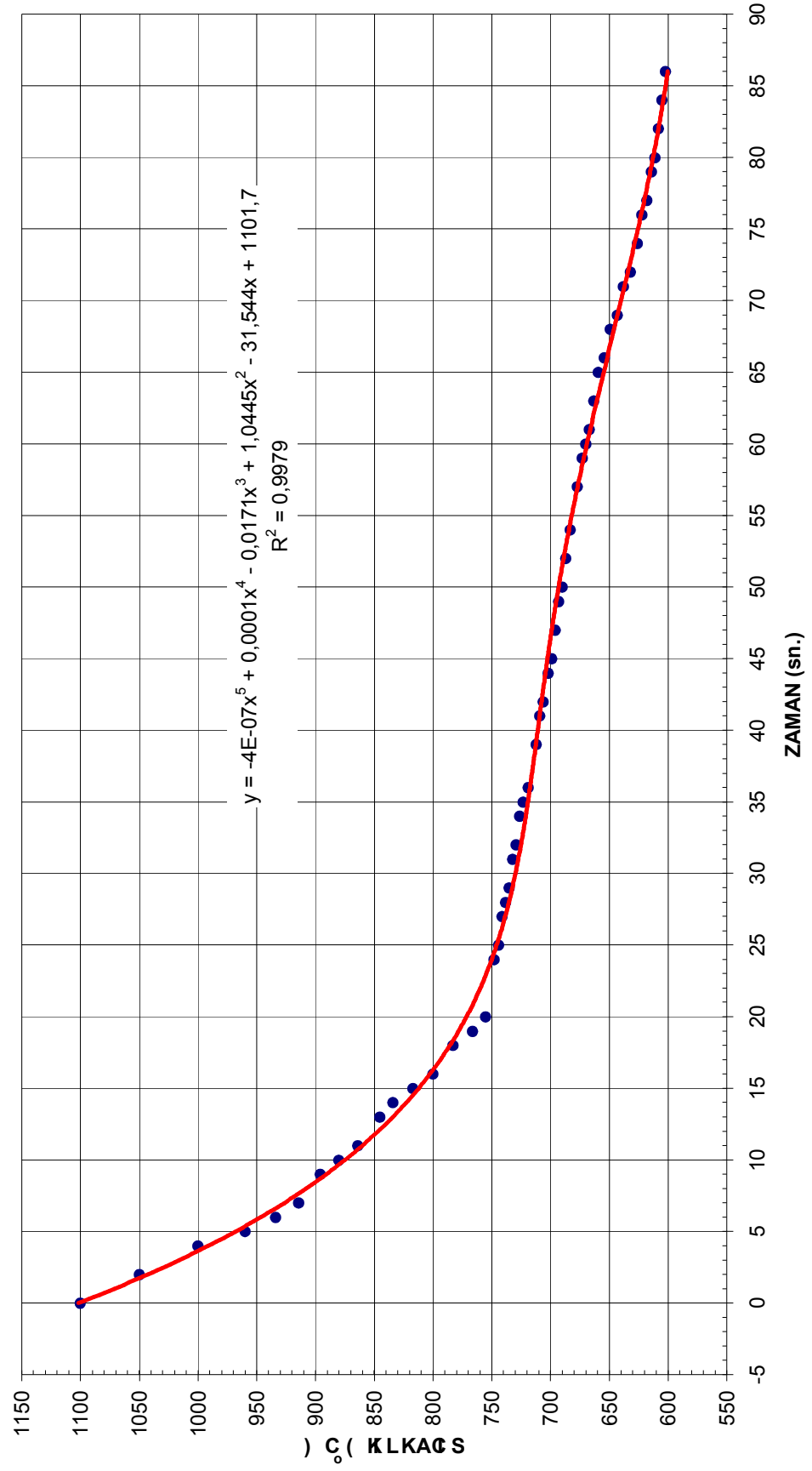
Numunelerin şekillendirmelerinin ardından sıcakta bekletilmemekte ve havada soğumaya bırakılmaktadır. Deney numunelerine ait kalıp dışında 600 °C’ ye kadar olan havada soğuma eğrisi yüzeyden termokupl ile ölçülerek ve kamera görüntülerinden faydalanılarak çıkartılmıştır ve Şekil 3.10 ile verilmektedir.

3.6 Numunelerin Geometrisi

Yığılma işleminden sonra numunelerin tablaya temas eden yüzeydeki çapları ve fiçilaşmanın maksimum ölçüde görüldüğü göbek çapları ölçülerek belirlenmiştir.

Elde edilen ölçümler sonucunda her numunenin bu çap değerlerine karşılık gelen yerel şekil değişimleri hesaplanmıştır. Bu yerel şekil değişimlerini ve çap ölçümleri Tablo 3.4, Tablo 3.5 ve Tablo 3.6’ de şekil değişimi miktarlarına göre gruplanmış olarak verilmektedir. Bu tablolarda aynı zamanda yerel çaplara ait ortalamalar ve yerel şekil değişimlerinin ortalamaları numune gruplarına göre verilmektedir.

DENEY NUMUNELERİN KALIP DIŞINDA HAVADA SOĞUMA EĞRİSİ



Şekil 3.10 : Deney Numunelerinin Kalıp Dışında Havada Soğuma Eğrisi.

Bu tablolardaki şekil değişimi miktarı;

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{H}{H_0} \right) \quad (3.1)$$

olarak gerçek anma şekil değişimini ifade etmektedir. Yerel şekil değişimi miktarı ise;

$$\varepsilon_{yerel} = -\ln \left(\frac{A_{yerel}}{A_0} \right) = -\ln \left(\frac{D_{yerel}^2}{D_0^2} \right) = \ln \left(\frac{H}{H_0} \right)_{yerel} \quad (3.2)$$

olarak ölçüm alınan karakteristik bölgelerde oluşan lokal şekil değişimini ifade etmektedir. Burada logaritmik ifadelerin önünde yer alan – işareti şekil değişiminin basma şeklinde gerçekleştirildiğini belirtmektedir.

Tablo 3.4: $\varepsilon = -0,92$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Temas ve Göbek Çapları İle Gerçek Anma ve Gerçek Yerel Şekil Değişimleri.

NUMUNE KODU	ε	TEMAS YÜZEYİ ÇAPI	Σüst	GÖBEK ÇAPI	Σmerkez
801	-0,92	53,40	-0,58	66,40	-1,01
802		55,40	-0,65	66,30	-1,01
803		55,40	-0,65	67,20	-1,04
804		54,20	-0,61	66,60	-1,02
ORTALAMA		54,60	-0,62	66,63	-1,02
901	-0,92	55,00	-0,64	67,75	-1,05
902		54,20	-0,61	67,00	-1,03
903		54,80	-0,63	67,30	-1,04
ORTALAMA		54,67	-0,62	67,35	-1,04
101	-0,92	52,20	-0,53	66,40	-1,01
102		54,40	-0,61	66,80	-1,03
103		54,20	-0,61	67,20	-1,04
ORTALAMA		53,60	-0,58	66,80	-1,03
111	-0,92	53,40	-0,58	67,30	-1,04
112		55,30	-0,65	67,50	-1,05
113		55,40	-0,65	67,40	-1,04
ORTALAMA		54,70	-0,63	67,40	-1,04

Tablo 3.5: $\varepsilon = -0,51$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Temas ve Göbek Çapları İle Gerçek Anma ve Gerçek Yerel Şekil Değişimleri.

NUMUNE KODU	ε	TEMAS YÜZEYİ ÇAPI	Çüst	GÖBEK ÇAPI	Çmerkez
805	-0,51	42,00	-0,10	55,50	-0,66
806		41,20	-0,06	55,40	-0,65
807		41,00	-0,05	55,20	-0,64
ORTALAMA		41,40	-0,07	55,37	-0,65
904	-0,51	41,20	-0,06	57,00	-0,71
905		41,30	-0,06	56,70	-0,70
906		41,20	-0,06	56,25	-0,68
ORTALAMA		41,23	-0,06	56,65	-0,70
104	-0,51	41,00	-0,05	55,60	-0,66
105		41,40	-0,07	55,40	-0,65
106		41,00	-0,05	55,60	-0,66
ORTALAMA		41,13	-0,06	55,53	-0,66
114	-0,51	42,00	-0,10	56,00	-0,67
115		41,20	-0,06	56,25	-0,68
116		41,40	-0,07	56,00	-0,67
ORTALAMA		41,53	-0,08	56,08	-0,68

Tablo 3.6: $\varepsilon = -0,22$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Temas ve Göbek Çapları İle Gerçek Anma ve Gerçek Yerel Şekil Değişimleri.

NUMUNE KODU	ε	TEMAS YÜZEYİ ÇAPI	Çüst	GÖBEK ÇAPI	Çmerkez
808	-0,22	40,40	-0,02	47,00	-0,32
809		40,70	-0,03	46,80	-0,31
810		40,50	-0,02	47,40	-0,34
ORTALAMA		40,53	-0,03	47,07	-0,33
907	-0,51	40,30	-0,01	47,60	-0,35
908		40,80	-0,04	47,70	-0,35
909		40,40	-0,02	47,30	-0,34
ORTALAMA		40,50	-0,02	47,53	-0,35
107	-0,51	40,30	-0,01	47,80	-0,36
108		41,30	-0,06	48,40	-0,38
109		40,20	-0,01	47,00	-0,32
110		40,60	-0,03	47,10	-0,33
ORTALAMA		40,60	-0,03	47,58	-0,35
114	-0,51	41,00	-0,05	48,20	-0,37
115		40,60	-0,03	47,50	-0,34
116		40,20	-0,01	47,00	-0,32
ORTALAMA		40,60	-0,03	47,57	-0,35

Tablo 3.5’de verilen $\varepsilon = -0,51$ ve Tablo 3.6’da verilen $\varepsilon = -0,22$ şekil değişimi değerlerinde temas yüzeyi çapının değişiminin oldukça az olduğu görülmektedir.

Aşağıda yer almakta olan Tablo 3.7’de, Tablo 3.3, 3.4, 3.5 ve 3.6 ile verilmekte olan veriler ışığında deney numunelerine ait hesaplanan ortalama ve yerel şekil değişimi hızları ile yığılma süreleri görülmektedir.

Tablo 3.7: Deney Numunelerine Ait Hesaplanan Ortalama ve Yerel Şekil Değişimi Hızları.

NUMUNE KODU	İŞLEM SICAKLIĞI (C)	ε	İŞLEM SÜRESİ (sn.)	ORTALAMA ŞEKİL DEĞİŞİMİ HIZI	YEREL ÜST ŞEKİL DEĞİŞİMİ HIZI	YEREL MERKEZ ŞEKİL DEĞİŞİMİ HIZI
801	800	-0,92	8,00	-0,11	-0,07	-0,13
802			7,72	-0,12	-0,08	-0,13
803			7,68	-0,12	-0,08	-0,14
804			7,24	-0,13	-0,08	-0,14
805		-0,51	5,68	-0,09	-0,02	-0,12
806			4,80	-0,11	-0,01	-0,14
807			4,72	-0,11	-0,01	-0,14
808		-0,22	2,64	-0,08	-0,01	-0,12
809			2,64	-0,08	-0,01	-0,12
810			2,64	-0,08	-0,01	-0,13
901	900	-0,92	7,24	-0,13	-0,09	-0,15
902			7,16	-0,13	-0,08	-0,14
903			7,22	-0,13	-0,09	-0,14
904		-0,51	4,60	-0,11	-0,01	-0,15
905			4,68	-0,11	-0,01	-0,15
906			4,64	-0,11	-0,01	-0,15
907		-0,22	2,52	-0,09	-0,01	-0,14
908			2,56	-0,09	-0,02	-0,14
909			2,68	-0,08	-0,01	-0,13
101	1000	-0,92	7,08	-0,13	-0,08	-0,14
102			6,92	-0,13	-0,09	-0,15
103			7,00	-0,13	-0,09	-0,15
104		-0,51	4,44	-0,12	-0,01	-0,15
105			4,24	-0,12	-0,02	-0,15
106			4,52	-0,11	-0,01	-0,15
107		-0,22	2,60	-0,09	-0,01	-0,14
108			3,24	-0,07	-0,02	-0,12
109			2,60	-0,09	0,00	-0,12
110			2,60	-0,09	-0,01	-0,13
111	1100	-0,92	6,60	-0,14	-0,10	-0,16
112			6,48	-0,14	-0,10	-0,16
113			6,68	-0,14	-0,10	-0,16
114		-0,51	4,36	-0,12	-0,02	-0,15
115			2,16	-0,24	-0,03	-0,32
116			4,40	-0,12	-0,02	-0,15
117		-0,22	2,68	-0,08	-0,02	-0,14
118			2,64	-0,08	-0,01	-0,13
119			2,68	-0,08	0,00	-0,12

3.7 Sertlik Ölçüm Sonuçları

Deney numunelerine ait sertlik ölçüm değerleri Tablo 3.8 ile Tablo 3.19 aralığındaki tablolarda ifade edilmektedir. Tablolarda verilen HV2 sertlik değerlerinin yanı sıra HRC eşdeğerleri de verilmiştir. Ayrıca işlem sıcaklığı, numune kodu ve ε - şekil değişimi - miktarı ile birlikte ε_{yemel} değerleri de verilmektedir.

Tablo 3.8: 800 °C'de $\varepsilon = -0,92$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.

SICAKLIK (C)	ε	NUMUNE NO	ÖLÇÜM NO	HV2 DEĞERLERİ				HRC KARŞILIKLARI			
				O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI	O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI
800	-0,92	ε Yerel		-1,02		-0,62		-1,02		-0,62	
		801	1	472	421	446	482	47	42,8	45	47,8
			2	496	436	450	499	48,8	44,1	45,3	49
			3		439	513	498		44,4	50	49
			4			448				45,1	
		ORTALAMA		484,00	432,00	464,25	493,00	47,90	43,77	46,35	48,60
		802	1	467	428	468	478	46,6	43,4	46,7	47,5
			2	492	437	492	552	48,5	44,2	48,5	52,5
			3		475	481	513		47,3	47,7	50
			4			467				46,6	
		ORTALAMA		479,50	446,67	477,00	514,33	47,55	44,97	47,38	50,00
		803	1	442	424	482	513	44,6	43	47,8	50
			2	464	438	494	502	46,4	44,3	48,7	49,2
			3		458	435	525		46	44	50,8
			4			489				48,3	
		ORTALAMA		453,00	440,00	475,00	513,33	45,50	44,43	47,20	50,00
		804	1	436	426	438	477	44,1	43,2	44,3	47,4
			2	431	410	437	518	43,7	41,8	44,2	50,3
			3		437	454	539		44,2	45,6	51,6
			4			471				47	
		ORTALAMA		433,50	424,33	450,00	511,33	43,90	43,07	45,28	49,77
		GENEL ORTALAMA			462,50	435,75	466,56	508,00	46,21	44,06	46,55

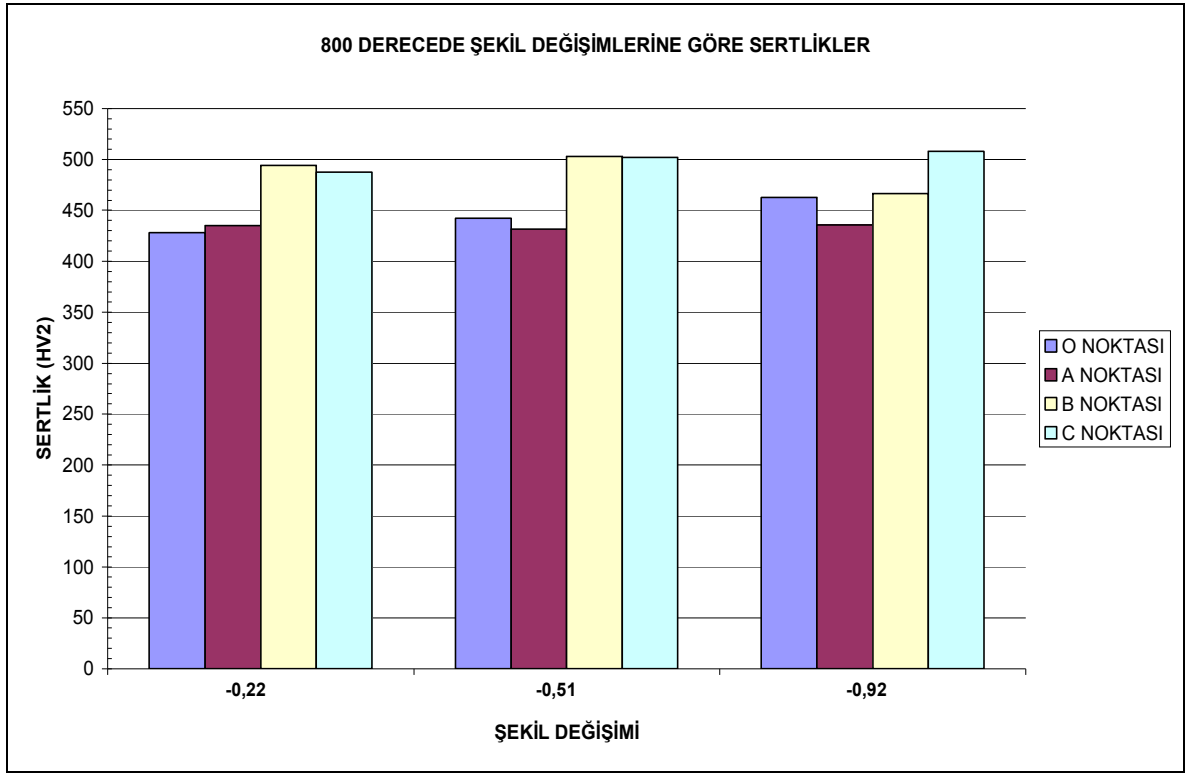
Tablo 3.9 800 °C’de $\epsilon = -0,51$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.

SICAKLIK (C)	ε	NUMUNE NO	ÖLÇÜM NO	HV2 DEĞERLERİ				HRC KARŞILIKLARI			
				O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI	O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI
800	-0,51	ε Yerel		-0,65		-0,07		-0,65		-0,07	
		805	1	438	417	537	510	44,3	42,4	51,5	49,8
			2	466	426	552	535	46,6	42,8	52,5	51,4
			3		433	534	530		43,9	51,3	51,1
			4			500				49,1	
		ORTALAMA		452,00	425,33	530,75	525,00	45,45	43,03	51,10	50,77
		806	1	444	435	420	481	44,8	44	42,7	47,7
			2	493	428	489	476	48,6	43,4	48,3	47,3
			3	460	434	531	506	46,1	44	51,1	49,5
			4			493				48,6	
		ORTALAMA		468,50	432,33	483,25	487,67	46,70	43,80	47,68	48,17
		807	1	392	451	512	475	40	45,4	49,9	47,3
			2	421	425	513	494	42,8	43,1	50	48,7
			3		438	490	509		44,3	48,4	49,7
			4			465				46,5	
		ORTALAMA		406,50	438,00	495,00	492,67	41,40	44,27	48,70	48,57
		GENEL ORTALAMA			442,33	431,89	503,00	501,78	44,52	43,70	49,16

Tablo 3.10 800 °C de $\epsilon = -0,22$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.

SICAKLIK (C)	ε	NUMUNE NO	ÖLÇÜM NO	HV2 DEĞERLERİ				HRC KARŞILIKLARI			
				O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI	O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI
800	-0,22	ε Yerel		-0,33		-0,03		-0,33		-0,03	
		808	1	432	443	507	474	43,8	44,7	49,6	47,2
			2	458	443	485	474	46	44,7	48	47,2
			3		459	499	486		46	49	48,1
			4			481				47,7	
		ORTALAMA		445,00	448,33	493,00	478,00	44,90	45,13	48,58	47,50
		809	1	422	418	480	455	42,9	42,5	47,6	45,7
			2	419	414	511	483	42,6	42,1	49,8	47,9
			3		441	485	509		44,5	48	49,7
			4			470				46,9	
		ORTALAMA		420,50	424,33	486,50	482,33	42,75	43,03	48,08	47,77
		810	1	424	424	502	463	43	43	49,2	46,3
			2	413	417	482	460	42	42,4	47,8	46,1
			3		435	483	505		44	47,9	49,4
			4			445				44,9	
		ORTALAMA		418,50	425,33	478,00	476,00	42,50	43,13	47,45	47,27
		GENEL ORTALAMA			428,00	432,67	485,83	478,78	43,38	43,77	48,03

Yukarıda verilmiş olan Tablo 3.8, Tablo 3.9 ve Tablo 3.10; 800 °C de yapılmış olan deneylere ait numunelerin sertlik ölçümlerini göstermektedir. Tablo verilerinden de görülebildiği üzere sertlik değerlerinin genel olarak artan şekil değişimi ile artış gösterdiği görülmektedir. Bu tablolara ilişkin olarak daha görsel bir ifade oluşturan Şekil 3.11’ de bu durum daha net bir biçimde görülebilmektedir.



Şekil 3.11 : 800 °C İçin Şekil Değişimi Miktarına Göre Karakteristik Bölgelerdeki Sertlik Değerleri.

Şekil 3.9' da belirtilen soğuma hızları durumuna göre $HV_B > HV_C > HV_A > HV_O$ olması beklenir. Ancak bu durum sadece $\varepsilon = -0,22$ 'lik yığılma deneyi sonuçlarında görülmektedir. $\varepsilon = -0,51$ 'lik şekil değişimi için $HV_B \geq HV_C > HV_O > HV_A$ ve $\varepsilon = -0,92$ için ise $HV_C > HV_B > HV_O > HV_A$ olarak belirlenmiştir.

Kalıba temas yüzeylerinin (B, C noktaları) sertlikleri (yaklaşık 500 HV₂) göbek kısmındaki (O, A noktaları) sertliklerinden (yaklaşık 450 HV₂) daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 3.11: 900 °C'de $\epsilon = -0,92$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.

SICAKLIK (C)	ε	NUMUNE NO	ÖLÇÜM NO	HV2 DEĞERLERİ				HRC KARŞILIKLARI			
				O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI	O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI
900	-0,92	ε Yerel		-1,04		-0,62		-1,04		-0,62	
		901	1	412	427	416	468	42	43,3	42,3	46,7
			2	408	415	418	459	41,6	42,2	42,5	46
			3	-	454	435	498	-	45,6	44	49
			4	-	-	416	-	-	-	42,3	-
		ORTALAMA		410,00	432,00	421,25	475,00	41,80	43,70	42,78	47,23
		902	1	425	430	445	506	43,1	43,6	44,9	49,5
			2	451	428	411	471	45,4	43,4	41,9	47
			3	-	463	436	467	-	46,3	44,1	46,6
			4	-	-	480	-	-	-	47,6	-
		ORTALAMA		438,00	440,33	443,00	481,33	44,25	44,43	44,63	47,70
		903	1	442	407	433	446	44,6	41,5	43,9	45
			2	480	411	402	462	47,6	41,9	41	46,3
			3	-	427	416	539	-	43,3	42,3	51,6
			4	-	-	407	-	-	-	41,5	-
		ORTALAMA		461,00	415,00	414,50	482,33	46,10	42,23	42,18	47,63
		GENEL ORTALAMA			436,33	429,11	426,25	479,56	44,05	43,46	43,19

Tablo 3.12: 900 °C'de $\epsilon = -0,51$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.

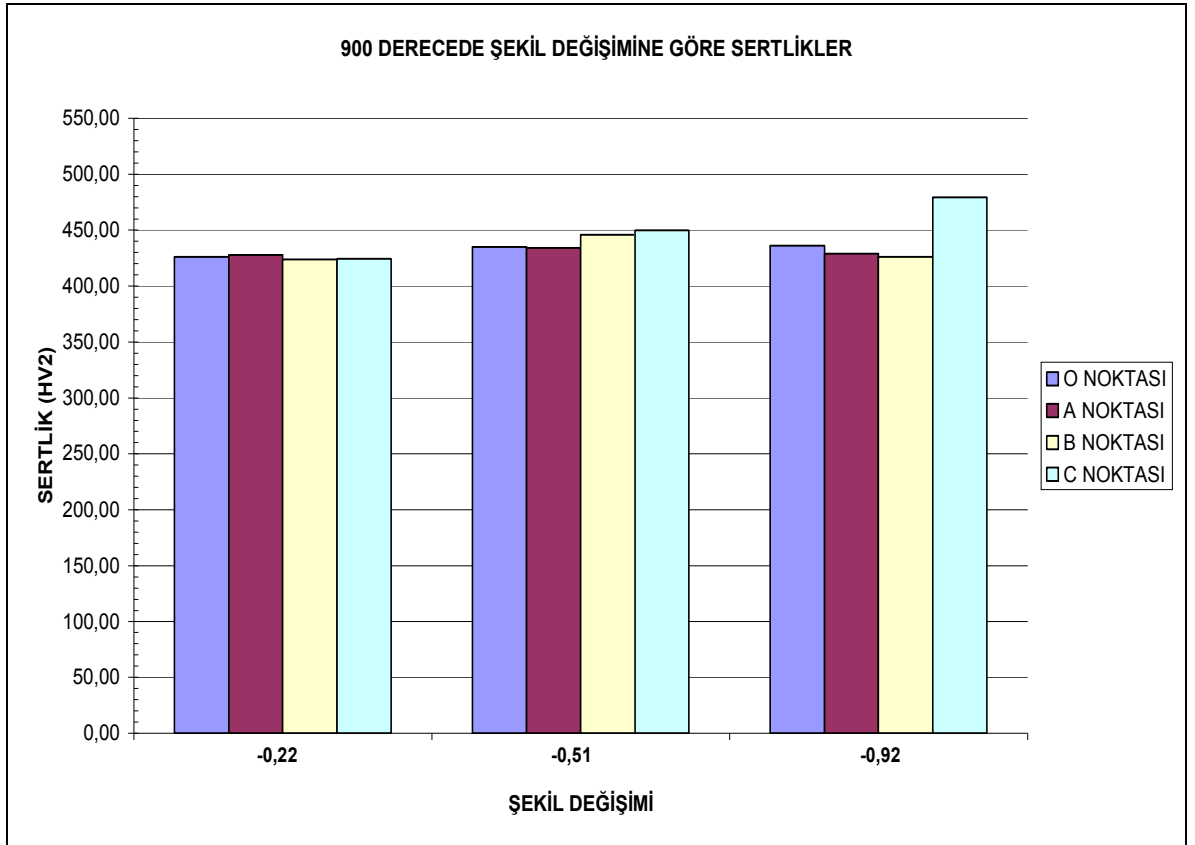
SICAKLIK (C)	ε	NUMUNE NO	ÖLÇÜM NO	HV2 DEĞERLERİ				HRC KARŞILIKLARI			
				O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI	O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI
900	-0,51	ε Yerel		-0,70		-0,06		-0,70		-0,06	
		904	1	394	419	473	448	40,2	42,6	47,1	45,1
			2	420	421	441	442	42,7	42,8	44,5	44,6
			3	-	429	443	423	-	43,5	44,7	43
			4	-	-	456	433	-	-	45,8	43,9
		ORTALAMA		407,00	423,00	453,25	436,50	41,45	42,97	45,53	44,15
		905	1	434	432	456	491	44	43,8	45,8	48,5
			2	465	439	453	497	46,5	44,4	45,5	48,9
			3	-	447	439	430	-	45	44,4	43,6
			4	-	-	449	-	-	-	45,2	-
		ORTALAMA		449,50	439,33	449,25	472,67	45,25	44,40	45,23	47,00
		906	1	456	421	450	437	45,8	42,8	45,3	44,2
			2	441	465	435	444	44,5	46,5	44	44,8
			3	-	433	433	440	-	43,9	43,9	44,5
			4	-	-	422	-	-	-	42,9	-
		ORTALAMA		448,50	439,67	435,00	440,33	45,15	44,40	44,03	44,50
		GENEL ORTALAMA			435,00	434,00	445,83	449,83	43,95	43,92	44,93

Tablo 3.13: 900 °C’de $\epsilon = -0,22$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.

SICAKLIK (C)	ε	NUMUNE NO	ÖLÇÜM NO	HV2 DEĞERLERİ				HRC KARŞILIKLARI			
				O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI	O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI
900	-0,22	ε Yerel		-0,34		-0,02		-0,34		-0,024845	
		907	1	392	420	432	418	40	42,7	43,8	42,5
			2	421	412	417	415	42,8	42	42,4	42,2
			3	-	420	447	423	-	42,7	45	43
			4	-	-	422	-	-	-	42,9	-
		ORTALAMA		406,50	417,33	429,50	418,67	41,40	42,47	43,53	42,57
		908	1	440	421	443	449	44,5	42,8	44,7	45,2
			2	442	437	398	397	44,6	44,2	40,6	40,5
			3	-	444	415	473	-	44,8	42,2	47,1
			4	-	-	450	-	-	-	45,3	-
		ORTALAMA		441,00	434,00	426,50	439,67	44,55	43,93	43,20	44,27
		909	1	427	423	399	417	43,3	43	40,7	42,4
			2	434	425	412	410	44	43,1	42	41,8
			3	-	448	426	417	-	45,1	43,2	42,4
			4	-	-	423	-	-	-	43	-
		ORTALAMA		430,50	432,00	415,00	414,67	43,65	43,73	42,23	42,20
		GENEL ORTALAMA			426,00	427,78	423,67	424,33	43,20	43,38	42,98

Yukarıda verilmiş olan Tablo 3.11, Tablo 3.12 ve Tablo 3.13; 900 °C de yapılmış olan deneylere ait numunelerin sertlik ölçümlerini göstermektedir. Bu verilerinden de görülebildiği üzere sertlik değerlerinin bu sıcaklık numuneleri için de genel olarak artan şekil değişimi ile çok az artış gösterdiği görülmektedir. 800 °C de ki deney numunelerinde görülen B ve C temas noktalarının sertlik artışı burada yalnız C noktası için, onunda yüksek şekil değişiminde meydana geldiği dikkat çekmektedir.

Bu tablolara ilişkin sonuçlar daha görsel bir ifade oluşturan aşağıdaki Şekil 3.12’de daha net bir biçimde görülebilmektedir. Bu grafikten de rahatlıkla görülebildiği üzere yüksek şekil değişimi miktarındaki C noktası haricindeki karakteristik noktaların sertlikleri soğuma hızları ve şekil değişimi miktarları ne olursa olsun birbirlerine çok yakın değerler vermektedir.



Şekil 3.12 : 900 °C için Bütün Şekil Değişimi Miktarında Karakteristik Bölgelerdeki Sertlik Değerleri.

Tablo 3.14: 1000 °C’de $\epsilon = -0,92$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.

SICAKLIK (C)	ε	NUMUNE NO	ÖLÇÜM NO	HV2 DEĞERLERİ				HRC KARŞILIKLARI			
				O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI	O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI
1000	-0,92	ε Yerel		-1,03		-0,59		-1,03		-0,59	
		101	1	383	387	384	411	39,1	39,5	39,2	41,9
			2	407	402	386	417	41,5	41	39,4	42,4
			3	-	437	387	462	-	44,2	39,5	46,3
			4	-	-	389	-	-	-	39,7	-
		ORTALAMA		395,00	408,67	386,50	430,00	40,30	41,57	39,45	43,53
		102	1	402	390	393	405	41	39,8	40,1	40,5
			2	402	380	398	387	41	38,8	40,6	38,7
			3	-	400	383	454	-	40,8	39,1	37,6
			4	-	-	369	-	-	-	36,9	-
		ORTALAMA		402,00	390,00	385,75	415,33	41,00	39,80	39,18	38,93
		103	1	347	380	389	416	35,2	38,8	39,7	42,3
			2	383	384	367	366	39,1	39,2	37,4	37,3
			3	-	379	381	403	-	38,7	38,9	41,1
			4	-	-	392	-	-	-	40	-
		ORTALAMA		365,00	381,00	382,25	395,00	37,15	38,90	39,00	40,23
		GENEL ORTALAMA			387,33	393,22	384,83	413,44	39,48	40,09	39,21

Tablo 3.15: 1000 °C’de $\epsilon = -0,51$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.

SICAKLIK (C)	ε	NUMUNE NO	ÖLÇÜM NO	HV2 DEĞERLERİ				HRC KARŞILIKLARI			
				O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI	O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI
1000	-0,51	ε Yerel		-0,66		-0,06		-0,66		-0,06	
		104	1	390	441	404	393	39,8	44,5	41,2	40,1
			2	410	442	406	403	41,8	44,6	41,4	41,1
			3	-	428	404	472	-	43,4	41,2	47
			4	-	-	386	431	-	-	39,4	43,7
		ORTALAMA		400,00	437,00	400,00	422,67	40,80	44,17	40,80	42,73
		105	1	406	408	375	441	41,4	41,6	38,3	44,5
			2	427	408	388	398	43,3	41,6	39,6	40,6
			3	-	419	397	448	-	42,6	40,5	45,1
			4	-	-	430	-	-	-	43,6	-
		ORTALAMA		416,50	411,67	397,50	429,00	42,35	41,93	40,50	43,40
		106	1	445	408	401	413	44,9	41,6	40,9	42
			2	465	426	397	425	46,5	43,2	40,5	43,1
			3	-	422	421	427	-	42,9	42,8	43,3
			4	-	-	410	-	-	-	41,8	-
		ORTALAMA		455,00	418,67	407,25	421,67	45,70	42,57	41,50	42,80
		GENEL ORTALAMA			423,83	422,44	401,58	424,44	42,95	42,89	40,93

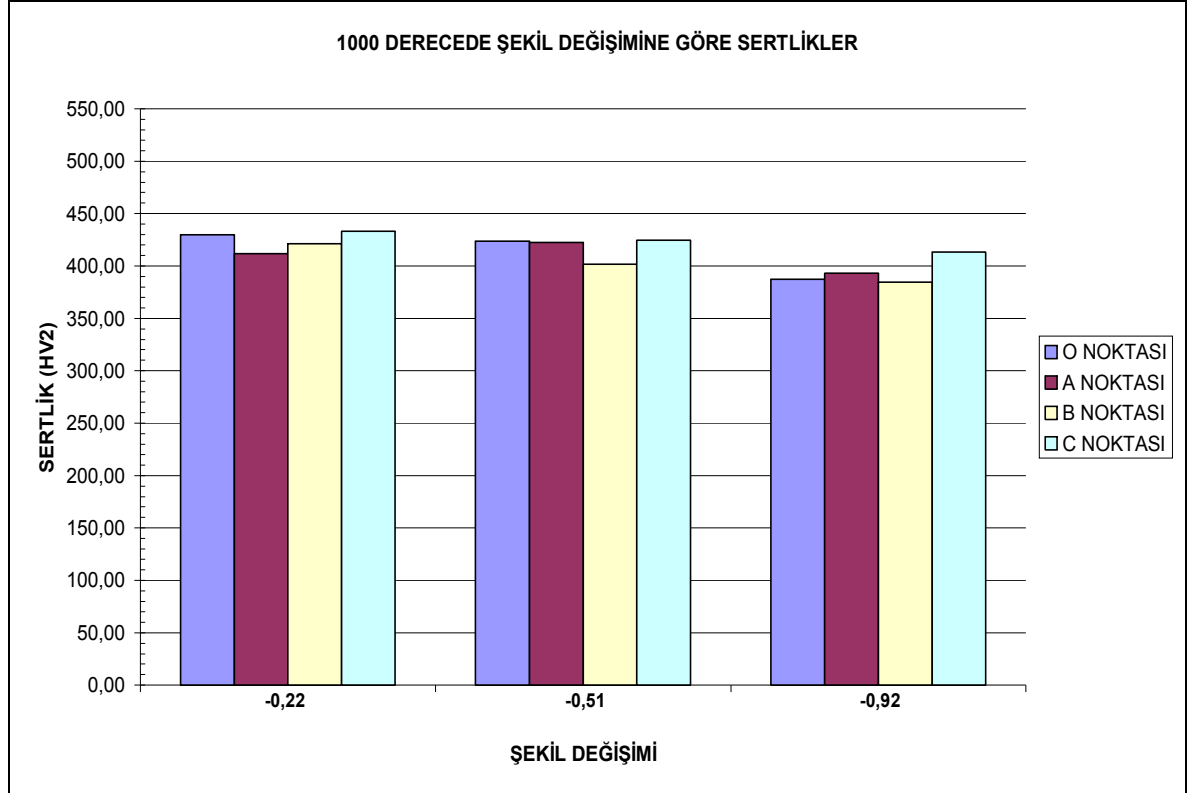
Tablo 3.16: 1000 °C’de $\epsilon = -0,22$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.

SICAKLIK (C)	ε	NUMUNE NO	ÖLÇÜM NO	HV2 DEĞERLERİ				HRC KARŞILIKLARI			
				O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI	O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI
1000	-0,22	ε Yerel		-0,35		-0,03		-0,35		-0,03	
		107	1	438	442	417	426	44,3	44,6	42,4	43,2
			2	456	440	437	421	45,8	44,5	44,2	42,8
			3	-	441	428	441	-	44,5	43,4	44,5
			4	-	-	452	-	-	-	45,5	-
		ORTALAMA		447,00	441,00	433,50	429,33	45,05	44,53	43,88	43,50
		108	1	421	404	421	410	42,8	41,2	42,8	41,8
			2	468	382	459	413	46,7	39	46	42
			3	-	413	429	448	-	42	43,5	45,1
			4	-	-	421	-	-	-	42,8	-
		ORTALAMA		444,50	399,67	432,50	423,67	44,75	40,73	43,78	42,97
		109	1	400	401	402	435	40,8	40,9	41	44
			2	415	385	422	432	42,2	39,3	42,9	43,8
			3	-	418	392	415	-	42,5	40	42,2
			4	-	-	409	454	-	-	41,7	45,6
			5	-	-	423	-	-	-	43	-
		ORTALAMA		407,50	401,33	409,60	434,00	41,50	40,90	41,72	43,90
		110	1	403	394	403	439	41,1	40,2	41,1	44,4
			2	439	404	399	447	44,4	41,2	40,7	45
			3	-	417	439	450	-	42,4	44,4	45,3
			4	-	-	401	-	-	-	40,9	-
		ORTALAMA		421,00	405,00	410,50	445,33	42,75	41,27	41,78	44,90
		GENEL ORTALAMA			430,00	411,75	421,53	433,08	43,51	41,86	42,79

Yukarıda verilmiş olan Tablo 3.14, Tablo 3.15 ve Tablo 3.16; 1000 °C de yapılmış olan deneylere ait numunelerin sertlik ölçümlerini göstermektedir. Bu verilerinden de görülebildiği üzere sertlik değerlerinin bu sıcaklık numuneleri için genel olarak artan şekil değişimi ile düşüş gösterdiği görülmektedir. Ayrıca bu sıcaklık verilerinde farklı bir sertlik dağılımı da dikkati çekmektedir.

Bu tablolara ilişkin olarak bahsedilen durum daha görsel bir ifade oluşturan şekil 3.13 deki grafikte daha net bir biçimde görülebilmektedir.

Karakteristik bölgelerin sertlik değerlerinin önceki sıcaklık değerlerindeki dağılımından farklı görülmesi bu sıcaklıktaki numunelerdeki etkileşimlerin diğer durumlardakinden farklılık gösterdiğine işaret etmektedir.



Şekil 3.13 : 1000 °C İçin Bütün Şekil Değişimi Miktarında Karakteristik Bölgelerdeki Sertlik Değerleri.

1000 °C’de de soğuma hızları farklılığına ve yerel şekil değişimi miktarı farklılığına rağmen sertlik değerlerinin tüm noktalarda birbirine yakın olduğu görülmektedir.

Tablo 3.17: 1100 °C’de $\epsilon = -0,92$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.

SICAKLIK (C)	ε	NUMUNE NO	ÖLÇÜM NO	HV2 DEĞERLERİ				HRC KARŞILIKLARI			
				O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI	O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI
1100	-0,92	ε Yerel		-1,04		-0,65		-1,04		-0,65	
		111	1	374	406	391	427	38,2	41,4	39,9	43,3
			2	404	391	373	389	41,2	39,9	38,1	39,7
			3	-	423	383	458	-	43	39,1	46
			4	-	-	409	-	-	-	41,7	-
	ORTALAMA		389,00	406,67	389,00	424,67	39,70	41,43	39,70	43,00	
	-0,92	112	1	385	369	381	412	39,3	37,6	38,9	42
			2	396	381	340	387	40,4	38,9	34,4	39,5
			3	-	414	342	445	-	42,1	34,6	44,9
			4	-	-	385	-	-	-	39,3	-
		ORTALAMA		390,50	388,00	362,00	414,67	39,85	39,53	36,80	42,13
	-0,92	113	1	395	374	385	374	40,3	38,2	39,3	38,2
			2	423	396	373	363	43	40,4	38,1	37
			3	-	425	390	422	-	43,1	39,8	42,9
			4	-	-	396	-	-	-	40,4	-
		ORTALAMA		409,00	398,33	386,00	386,33	41,65	40,57	39,40	39,37
	GENEL ORTALAMA			396,17	397,67	379,00	408,56	40,40	40,51	38,63	41,50

Tablo 3.18: 1100 °C’de $\epsilon = -0,51$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.

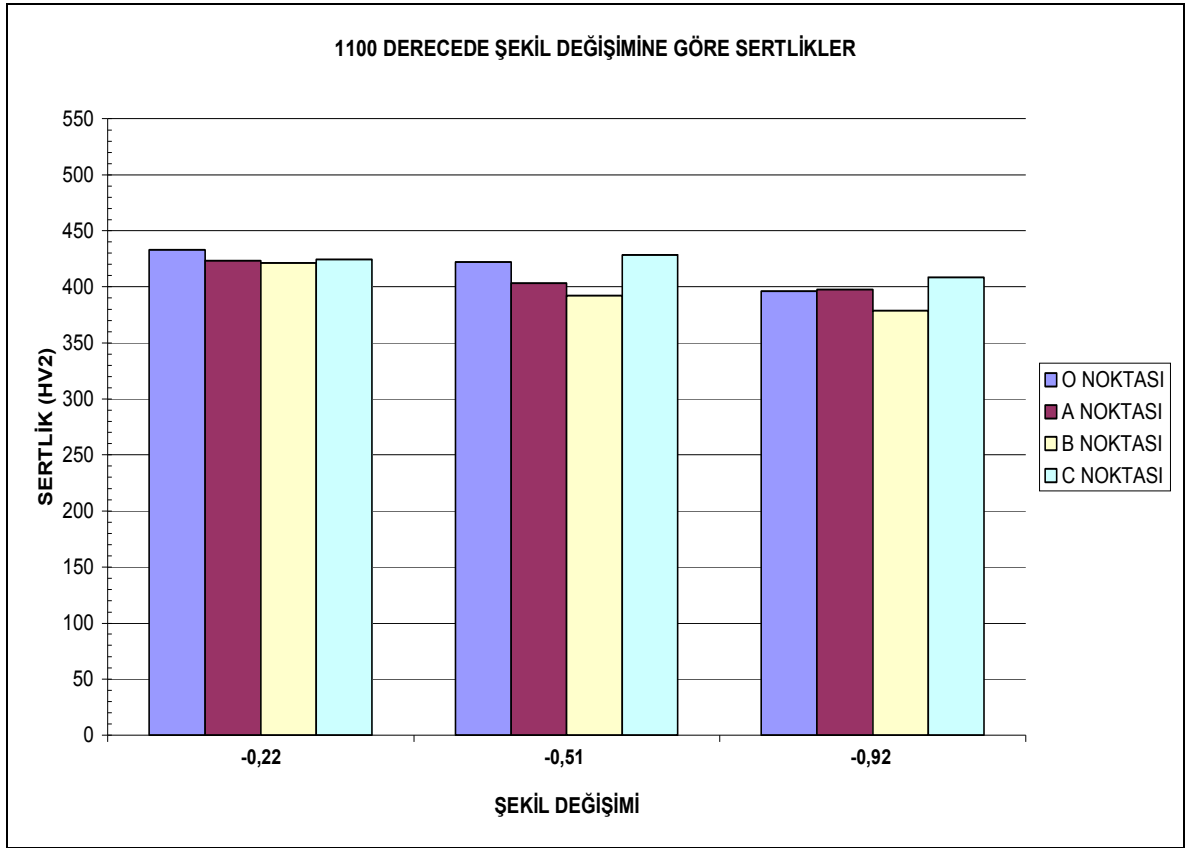
SICAKLIK (C)	ε	NUMUNE NO	ÖLÇÜM NO	HV2 DEĞERLERİ				HRC KARŞILIKLARI			
				O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI	O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI
1100	-0,51	ε Yerel		-0,68		-0,08		-0,68		-0,08	
		114	1	421	413	414	401	42,8	42	42,1	40,9
			2	467	396	384	438	46,6	40,4	39,2	44,3
			3	-	417	408	444	-	42,7	36,2	44,8
			4	-	-	402	-	-	-	41	-
	ORTALAMA		444,00	408,67	402,00	427,67	44,70	41,70	39,63	43,33	
	-0,51	115	1	416	375	390	415	42,3	38,3	39,8	42,2
			2	437	393	340	390	44,2	40,1	34,4	39,8
			3	-	451	361	459	-	45,4	36,7	46
			4	-	-	394	-	-	-	40,2	-
		ORTALAMA		426,50	406,33	371,25	421,33	43,25	41,27	37,78	42,67
	-0,51	116	1	376	368	413	509	38,4	37,5	42	49,7
			2	415	399	389	359	42,2	40,7	39,7	36,3
			3	-	416	403	443	-	42,3	41,1	44,7
			4	-	-	407	-	-	-	41,5	-
		ORTALAMA		395,50	394,33	403,00	437,00	40,30	40,17	41,08	43,57
	GENEL ORTALAMA			422,00	403,11	392,08	428,67	42,75	41,04	39,49	43,19

Tablo 3.19: 1100 °C’de $\epsilon = -0,22$ Şekil Değişimindeki Numunelerin Karakteristik Bölgelere Göre Sertlik Değerleri.

SICAKLIK (C)	ε	NUMUNE NO	ÖLÇÜM NO	HV2 DEĞERLERİ				HRC KARŞILIKLARI			
				O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI	O NOKTASI	A NOKTASI	B NOKTASI	C NOKTASI
1100	-0,22	ε Yerel		-0,35		-0,03		-0,35		-0,03	
		117	1	408	389	400	427	41,6	39,7	40,8	43,3
			2	453	414	428	439	45,5	42,1	43,4	44,4
			3	-	427	417	429	-	43,3	42,4	43,5
			4	-	-	431	-	-	-	43,7	-
	ORTALAMA		430,50	410,00	419,00	431,67	43,55	41,70	42,58	43,73	
	-0,22	118	1	416	426	406	397	42,3	43,2	41,4	40,5
			2	437	401	404	407	44,2	40,9	41,2	41,5
			3	-	440	415	444	-	44,5	42,2	44,8
			4	-	-	410	-	-	-	41,8	-
			5	-	-	455	-	-	-	45,7	-
	ORTALAMA		426,50	422,33	418,00	416,00	43,25	42,87	42,46	42,27	
	-0,22	119	1	442	429	407	427	44,6	43,5	41,5	43,3
			2	442	424	439	424	44,6	43	44,4	43
			3	-	460	423	428	-	46,1	43	43,4
			4	-	-	438	-	-	-	44,3	-
		ORTALAMA		442,00	437,67	426,75	426,33	44,60	44,20	43,30	43,23
GENEL ORTALAMA			433,00	423,33	421,25	424,67	43,80	42,92	42,78	43,08	

Yukarıda verilmiş olan Tablo 3.17, Tablo 3.18 ve Tablo 3.19; 1100 °C de yapılmış olan deneylere ait numunelerin sertlik ölçümelerini göstermektedir. Bu tablolara ilişkin olarak aşağıdaki Şekil 3.14’ten daha net bir ifade sağlanabilmektedir.

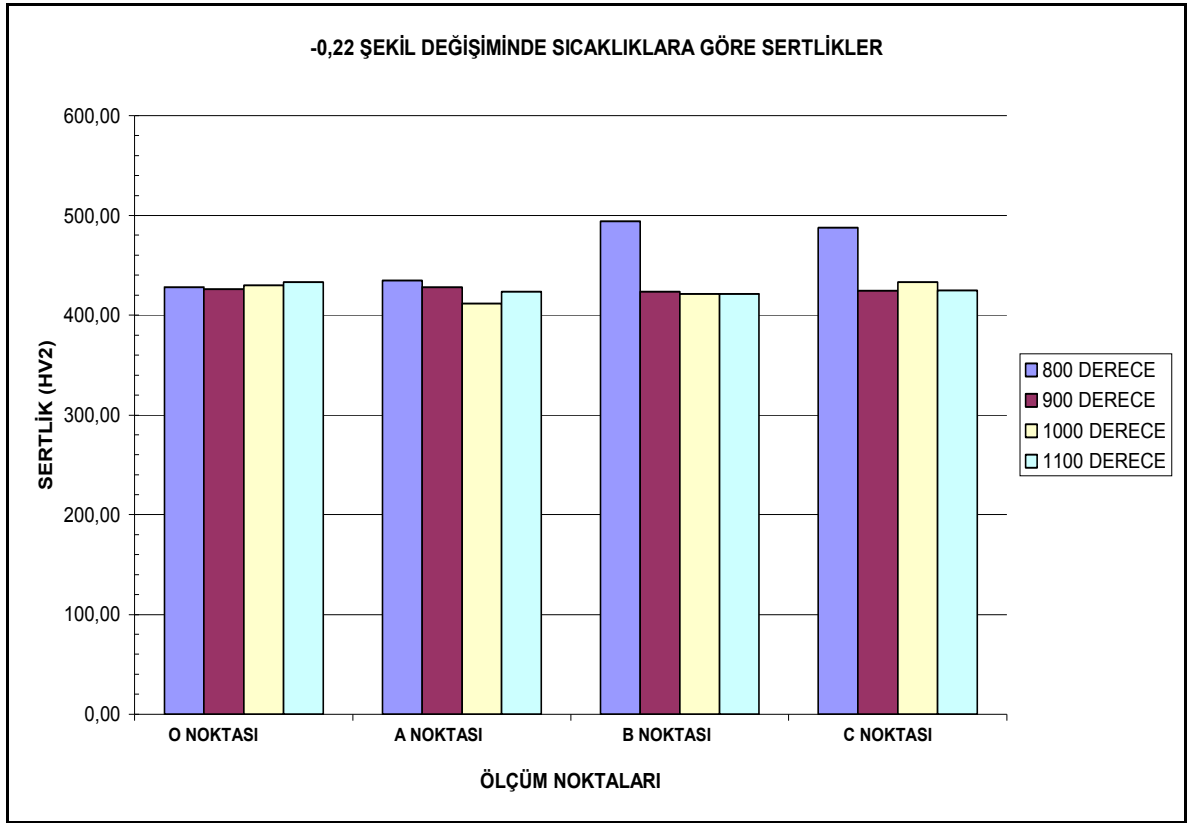
Bu verilerinden de görülebildiği üzere sertlik değerlerinin bu sıcaklık numuneleri için de 1000 °C de olduğu gibi karakteristik noktalar için genel olarak birbirine yakındır ve artan şekil değişimi ile biraz düşüş göstermektedir.



Şekil 3.14 : 1100 °C İçin Bütün Şekil Değişimi Miktarında Karakteristik Bölgelerdeki Sertlik Değerleri.

Şekil 3.15, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de aynı şekil değişimi miktarı için değişik sıcaklıklardaki karakteristik bölgelerin kendi içindeki sertlik değişimleri irdelenmektedir.

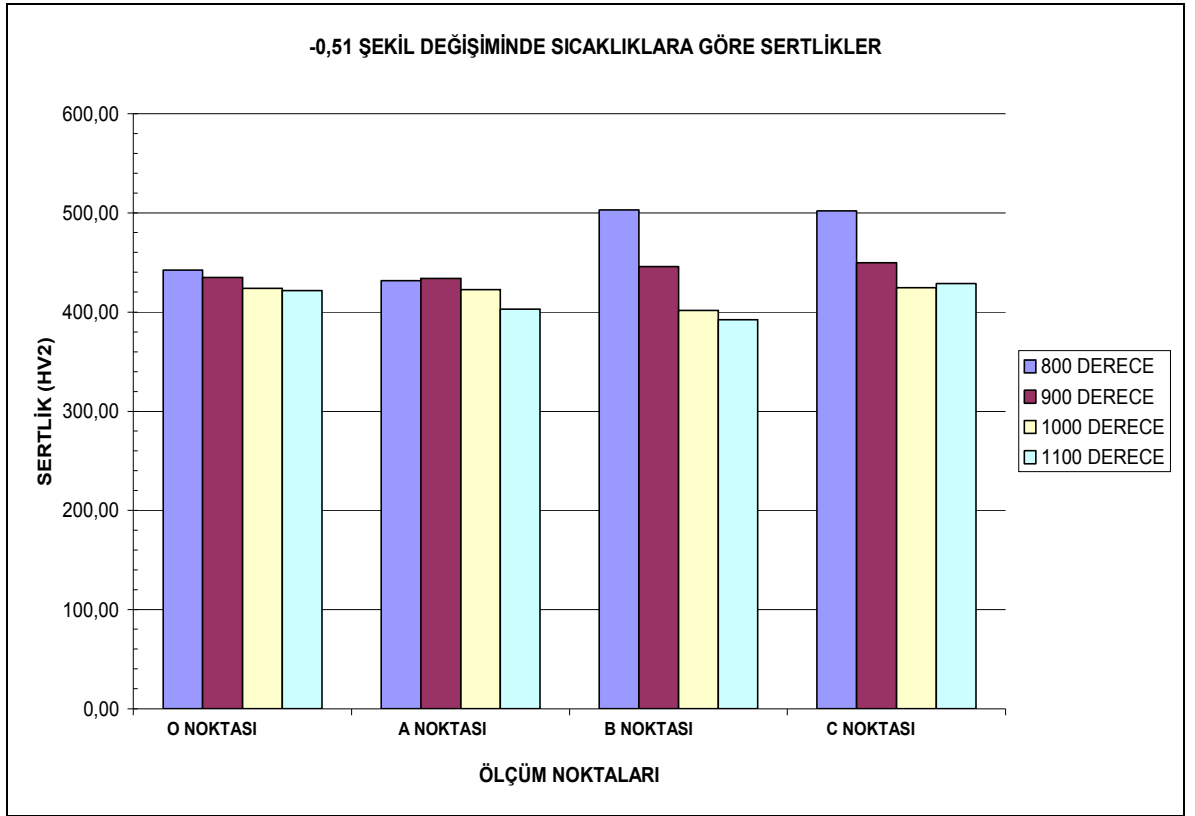
Şekil 3.15 numaralı grafikte görülebildiği üzere düşük şekil değişimi için ($\epsilon=-0,22$); sertlik değerlerinin O ve A noktalarında bütün sıcaklıklar için birbirine yakın değerler aldığı görülmektedir. 800 °C’deki numuneler için bu şekil değişimi miktarında B ve C noktalarında diğerlerinden oldukça farklı ve yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 3.15 : Uygulanan $\epsilon=-0,22$ 'lik Şekil Değişimi Miktarında Bütün Sıcaklıklar İçin Karakteristik Bölgelerdeki Sertlik Değerleri.

Şekil 3.16 numaralı aşağıdaki grafikte görülebildiği üzere $\epsilon=-0,51$ ' lik şekil değişimi miktarı için; sertlik değerleri O ve A noktaları için bütün sıcaklıklar da Şekil 3.15' deki değerlere benzer biçimde yakın değerler aldığı görülmektedir.

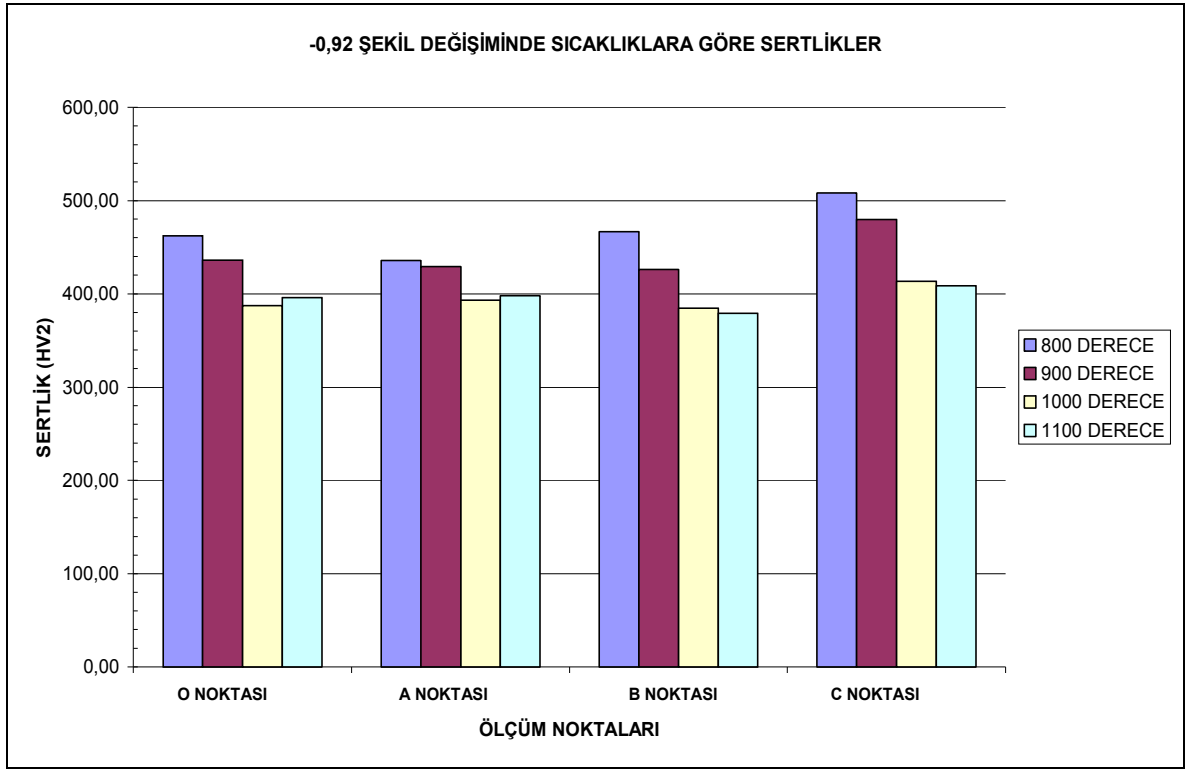
Bu görünüm B ve C noktaları için 800 ve 900 $^{\circ}\text{C}$ ' deki durumları içinde geçerliliğini korumakta ve yakın değer aralığında salınım göstermektedir. Ancak bu şekil değişimi için 1000 ve 1100 $^{\circ}\text{C}$ deki numuneler için en hızlı soğuyan B noktalarında sertlik diğerlerinden ve $\epsilon=-0,22$ için elde edilen sertlik değerlerinden genel olarak daha düşüktür.



Şekil 3.16 : Uygulanan $\epsilon = -0,51$ 'lik Şekil Değişimi Miktarında Bütün Sıcaklıklar İçin Karakteristik Bölgelerdeki Sertlik Değerleri.

Şekil 3.17 numaralı aşağıdaki grafikte görülebildiği üzere en büyük şekil değişimi için ($\epsilon = -0,92$); 1000 $^{\circ}\text{C}$ ve 1100 $^{\circ}\text{C}$ 'deki sertlik değerleri bütün karakteristik noktalar için birbirine yakın değerler aldığı görülmektedir

1000 $^{\circ}\text{C}$ ve 1100 $^{\circ}\text{C}$ deki değerler $\epsilon = -0,22$ ve $\epsilon = -0,51$ için elde edilen değerlerle karşılaştırıldığında O ve A noktalarına ait sertlik değerleri biraz daha düşüktür.



Şekil 3.17 : Uygulanan En Büyük Şekil Değişimi ($\epsilon = -0,92$) Miktarına Göre Bütün Sıcaklıklar İçin Karakteristik Bölgelerdeki Sertlik Değerleri.

3.8 Numune Mikroyapılarının İncelenmesi

Numunelerde mikro yapı incelemesi için tekrar zımparalama işlemine alınmışlardır. İlk olarak 1000 kumluk zımparalarla zımparalama yapılmıştır. Bunu takiben 1200 kum zımparalama gerçekleştirilmiştir. Bu zımparalama kademesinin ardından incelemeye uygun hale gelmesi için 1µm boyutundaki alümina partikülleri ve orta yumuşaklıktaki tabla çuhası ile tezgâhta parlatma işlemine tabi tutulmuşlardır. Mikroskop görüntüsü alınabilecek ölçüde bir parlatma işleminin ardından numuneler dağlama işlemine tabi tutulmuşlardır.

Dağlama için %2 oranında HNO_3 içeren “Nital” çözeltisinden faydalanılmıştır. Dağlayıcının %98’lik diğer kısmını ise “Etil Alkol” teşkil etmektedir. Bu dağlayıcı optik mikroskopi açısından büyük ölçüde bütün çelik türleri için kullanılabilir. (ASM Metals Handbook, 1992) Dağlayıcı numuneler üzerine pamuk üzerine damlatılmak sureti ile tatbik edilmiştir. Tatbik esnasında elle uygulanan dağlayıcı ile yeterli kararma elde edilmesinin ardından kimyasal

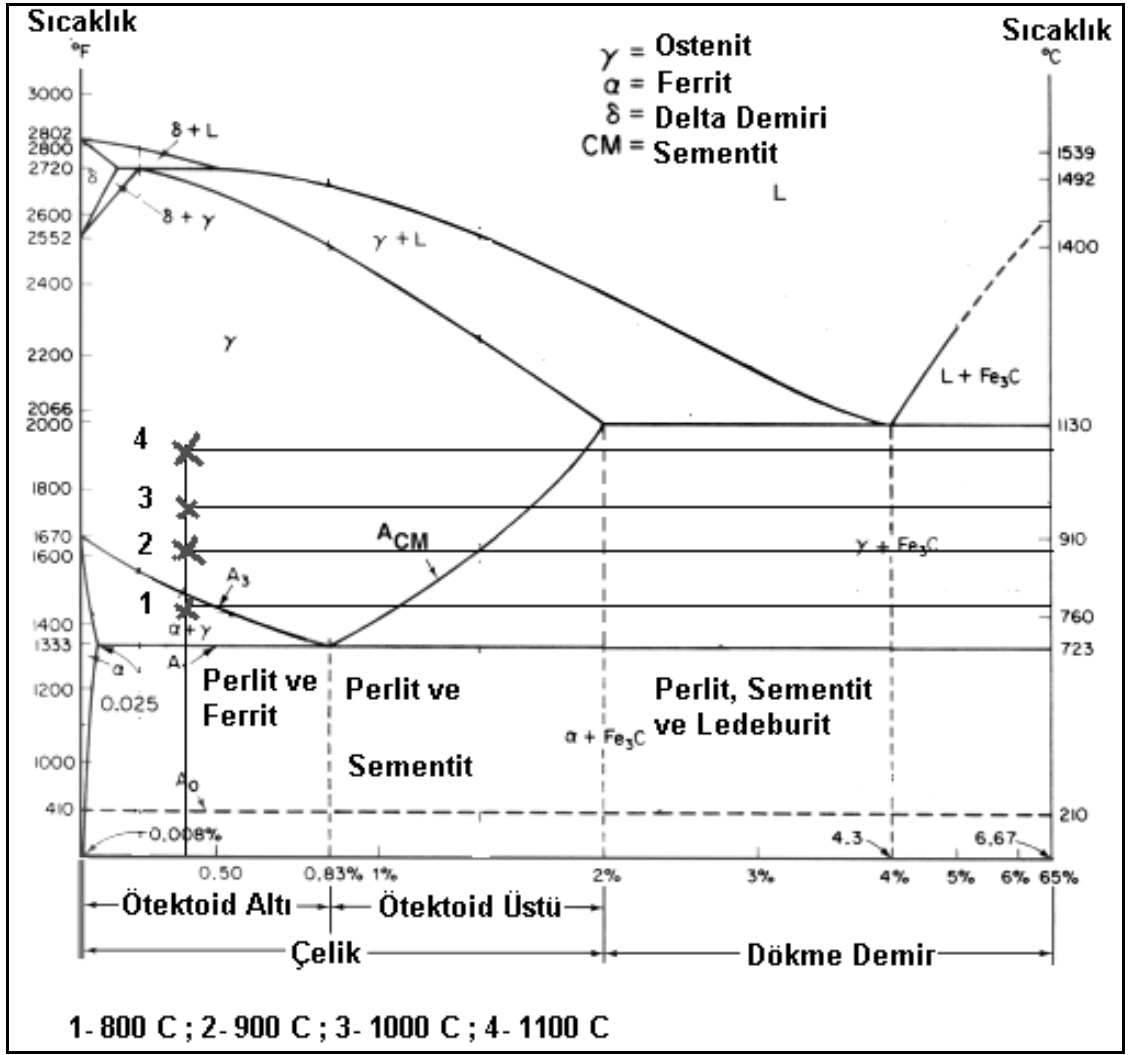
reaksiyonu durdurmak için etil alkolle yüzey yıkanıp ardından kurutma makinesi ile kurutulmuştur.

Dağlama işlemini takiben bir optik mikroskop yardımı ile mikro yapı incelenmiştir. Optik mikroskop görüntüleme sınırı olan 500X büyütme ile görüntüler alınmıştır. Kullanılan optik mikroskobun resmi Şekil 3.18’de verilmektedir.



3.18 : Mikroyapı Görüntülemede Kullanılan Optik Mikroskop, SOIF XJP-6A.

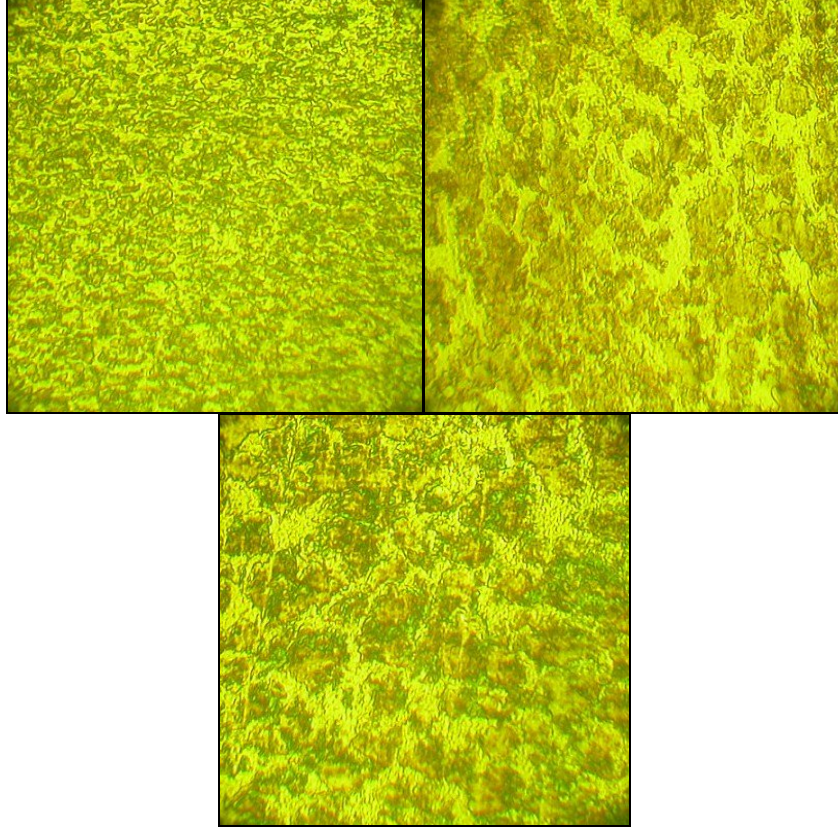
Şekil 3.19 ile verilen Fe-C diyagramında deneysel çalışmanın yapılmış olduğu sıcaklıklar ve karşılık gelen yapı durumları gösterilmektedir.



Şekil 3.19 : Fe-C Diyagramı.

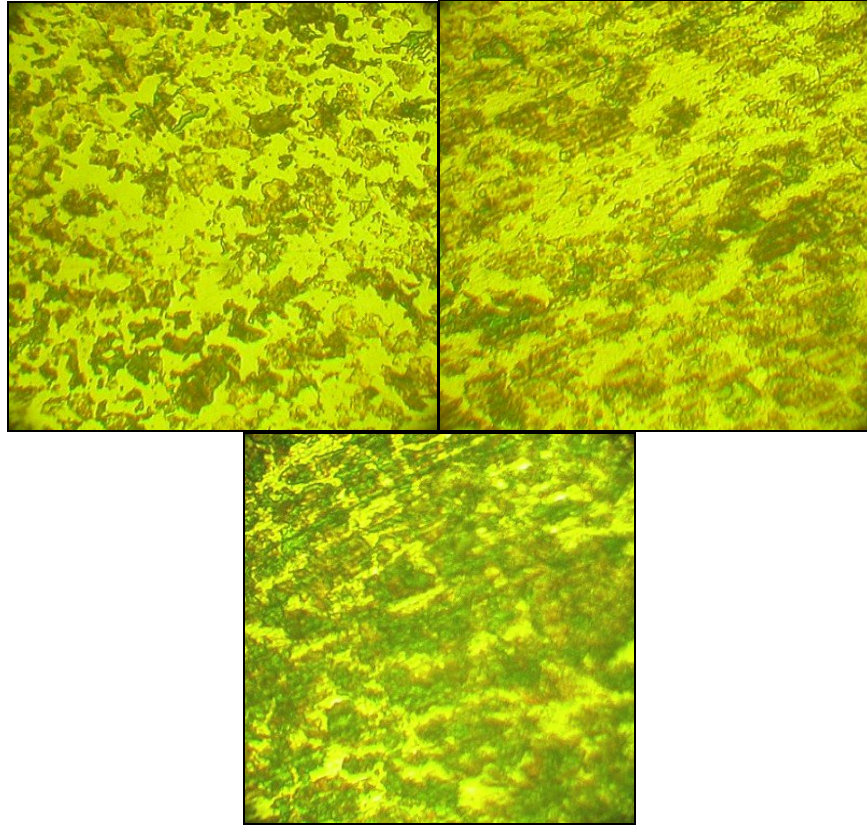
Bu diyagramda da gösterildiği gibi 800 °C’de yapılan deneyler esasında malzeme ostenit ve ferritten oluşan çift fazlı durumdadır. Diğer şekil değişimleri tek fazlı %100 ostenit sahasında gerçekleştirilmiştir.

3.8.1 800 °C’de işlem gören numunelerin mikroyapı görüntüleri



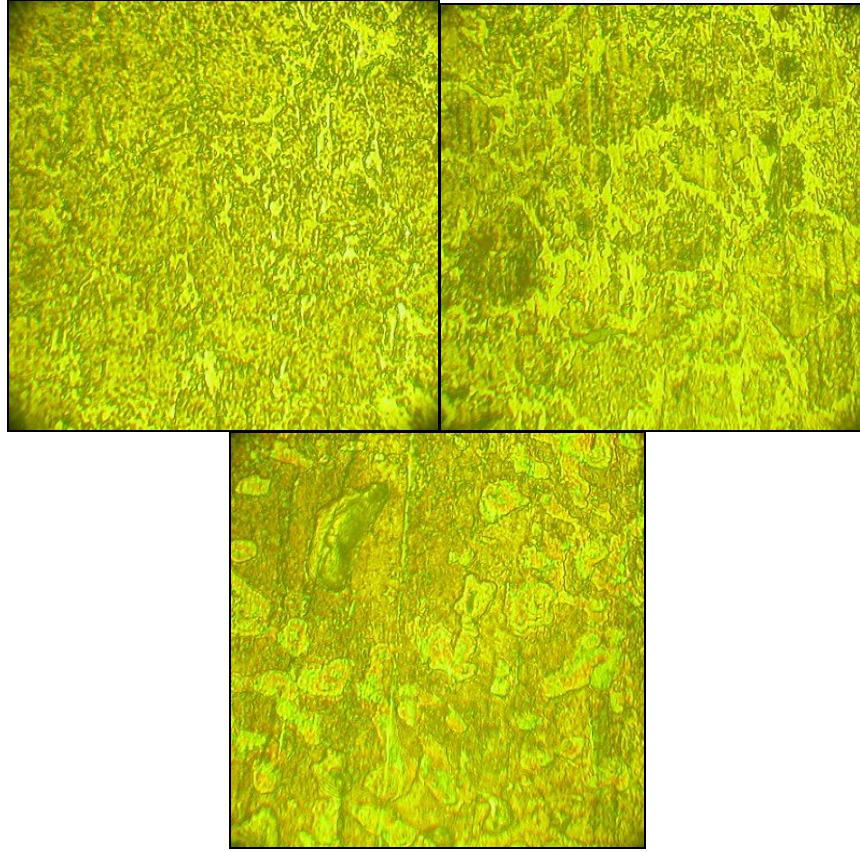
Şekil 3.20 : 800 °C Numunelerinin O Noktaları Görüntüleri. (Şekil Değişimine Göre Soldan Sağa: $\epsilon = -0,92$, $\epsilon = -0,51$, $\epsilon = -0,22$; Numuneler 803 – 805 – 810, (X500))

Şekil 3.20 ile verilen görüntülerde yüksek şekil değişimine maruz kalmış olan numunenin diğerlerine göre daha ince taneli bir yapıya sahip olduğu ve ferrit matrisi içinde küçük boyutlarda perlit dağılımı görülmektedir.



Şekil 3.21 : 800 °C Numunelerinin B Noktaları Görüntüleri. (Şekil Değişimine Göre Soldan Sağa: $\epsilon = -0,92$, $\epsilon = -0,51$, $\epsilon = -0,22$; Numuneler 804 – 806 – 809, (X500))

Şekil 3.21’de verilen fotoğraflarda görüldüğü üzere artan şekil değişimi miktarı ile B noktalarında düşük şekil değişimlerinde kaba perlit yapısı göze çarpmaktadır. Bu noktalar soğuma hızı bakımından en yüksek soğumayı gösteren alanlardır. Hem hava ile hem de tabla teması nedeni ile taşınım ve iletim yolu ile ısı kaybı görülen bu bölgelerin yüksek soğuma hızlarının yapılarında etkili olması beklenir.



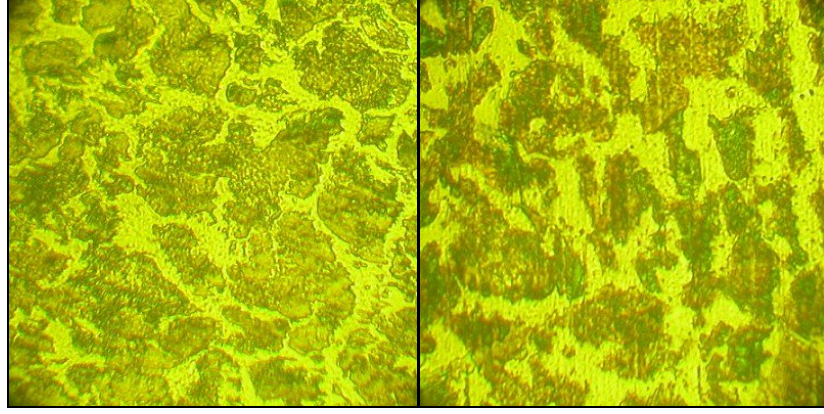
Şekil 3.22 : 800 °C Numunelerinin C Noktaları Görüntüleri. (Şekil Değişimine Göre Soldan Sağa: $\epsilon = -0,92$, $\epsilon = -0,51$, $\epsilon = -0,22$; Numuneler 804 – 806 – 809, (X500))

Şekil 3.22 ile gösterilen fotoğraflarda önceki fotoğraflara benzer bir durum göze çarpmaktadır. Şekil değişimi miktarındaki artış ile yapıdaki perlit dağılımını daha düzenli oluştuğu görülmektedir.

Bu görüntülerin alınmış olduğu C noktaları tabla teması ile soğuma hızı yüksek olan bir karakteristik bölgeyi temsil etmektedir.

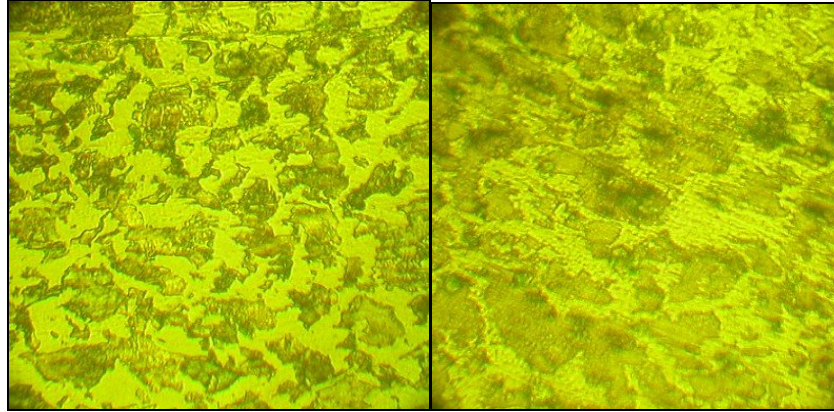
3.8.2 900 °C’de işlem gören numunelerin mikroyapı görüntüleri

900 °C işlem sıcaklığında şekillendirilmiş olan numunelerin bütün sıcaklıklar ve şekil değişimi miktarı için alınan görüntüler Şekil 3.23 - Şekil 3.26 aralığındaki şekillerle verilmektedir.



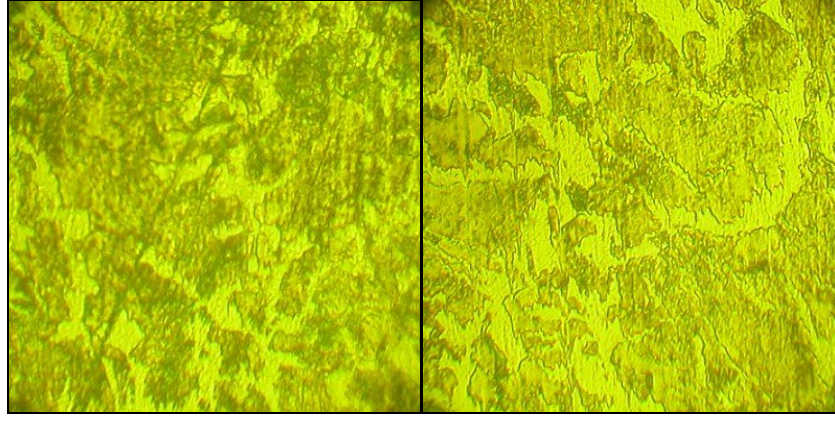
Şekil 3.23 : 900 °C Numunelerinin A Noktaları Görüntüleri. (Şekil Değişimine Göre Soldan Sağa: $\epsilon = -0,92$, $\epsilon = -0,22$; Numuneler 901 – 909, (X500))

Şekil 3.23’de verilen fotoğraflarda görüldüğü gibi iki mikro yapı da kaba bir perlit dağılımı göstermektedir.



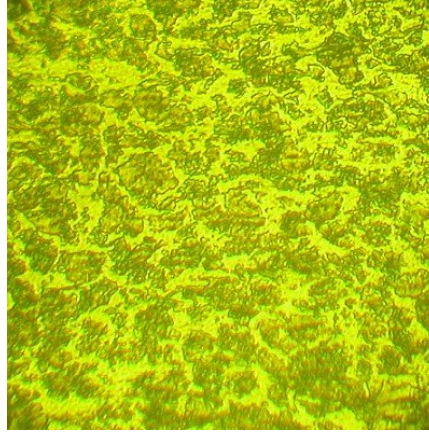
Şekil 3.24 : 900 °C Numunelerinin B Noktaları Görüntüleri. (Şekil Değişimine Göre Soldan Sağa: $\epsilon = -0,92$, $\epsilon = -0,51$; Numuneler 903 – 905, (X500))

Şekil 3.24’de verilen görüntülerde $\epsilon = -0,92$ şekil değişimine sahip ve $\epsilon = -0,51$ şekil değişimine sahip iki numunenin B noktalarının mikro yapıları görülmektedir. Bunlardan büyük şekil değişimine ait numunedeki görüntüde daha ince bir faz dağılımının bulunduğu görülmektedir.



Şekil 3.25 : 900 °C Numunelerinin C Noktaları Görüntüleri. (Şekil Değişimine Göre Soldan Sağa: $\epsilon = -0,92$, $\epsilon = -0,51$; Numuneler 903 – 905, (X500))

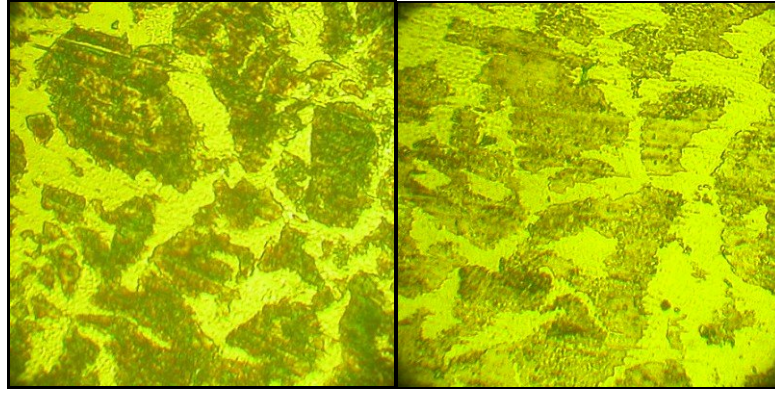
Şekil 3.25'deki numunelerin birbirlerine çok benzer yapı dağılımı gösterdikleri görülmektedir. İki numune arasında şekil değişimi miktarında farklılık olmasına rağmen birbirlerine yakın perlit dağılımları görülmektedir.



Şekil 3.26 : 900 °C'de Maksimum Şekil Değişimi Numunelerinden Birinin O Noktası Görüntüsü. ($\epsilon = -0,92$; Numune 902, (X500))

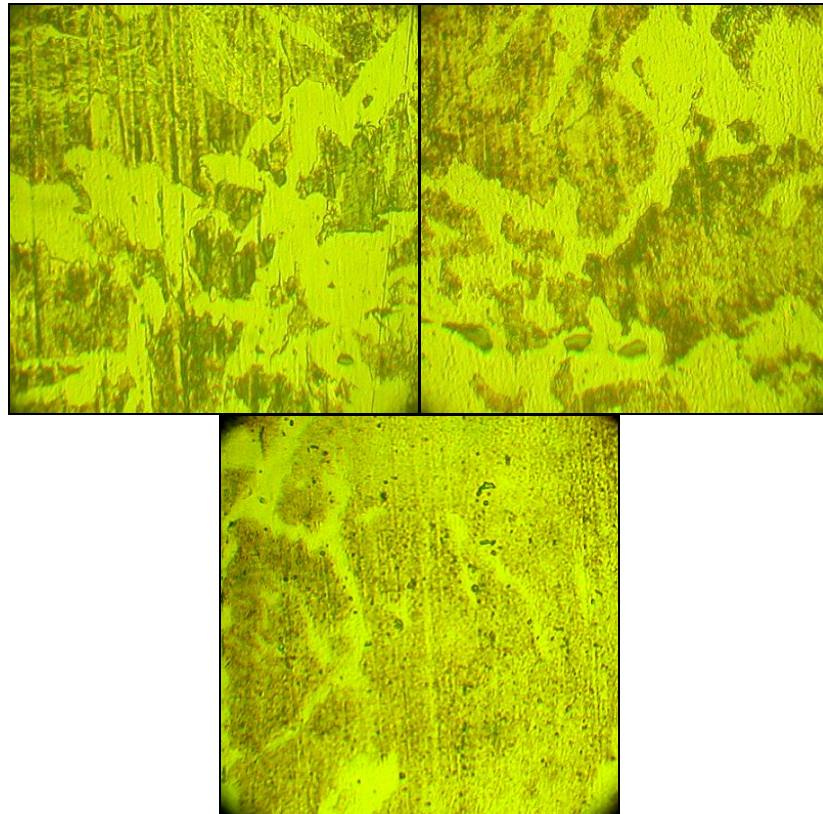
3.8.3 1000 °C'de işlem gören numunelerin mikroyapı görüntüleri

Bu sıcaklık değerlerine ilişkili olarak karakteristik bölgelere ait mikro yapı fotoğrafları Şekil 3.27 – Şekil 3.29 arasında verilmektedir.



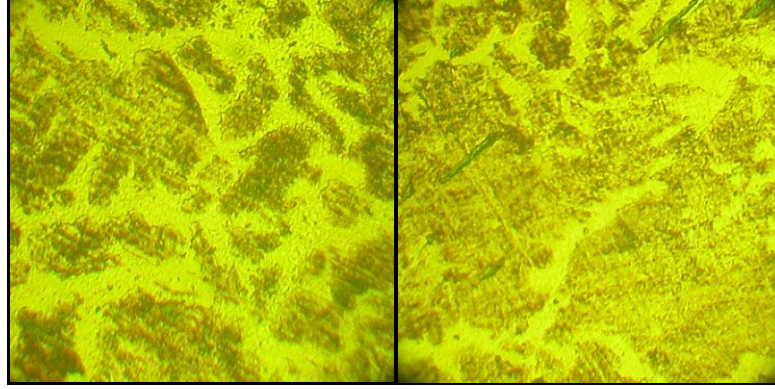
Şekil 3.27 : 1000 °C Numunelerinin A Noktaları Görüntüleri. (Şekil Değişimine Göre Soldan Sağa: $\epsilon = -0,92$, $\epsilon = -0,51$; Numuneler 102 – 105, (X500))

Şekil 3.27 ile en büyük şekil değişiminin görüldüğü numune ile orta şekil değişimi görülen numunelere ait karakteristik A noktalarının görüntüleri verilmektedir. Bu görüntülerden seçilebildiği üzere mikro yapı görüntüleri birbirlerine benzer bir dağılım göstermektedir.



Şekil 3.28 : 1000 °C Numunelerinin C Noktaları Görüntüleri. (Şekil Değişimine Göre Soldan Sağa: $\epsilon = -0,92$, $\epsilon = -0,51$, $\epsilon = -0,22$; Numuneler 103–106–109, (X500))

Şekil 3.28 ile verilen yapı görüntülerinde C noktalarında azalan şekil değişimi miktarı ile daha kaba perlit dağılımı olduğu açığa çıkmaktadır.

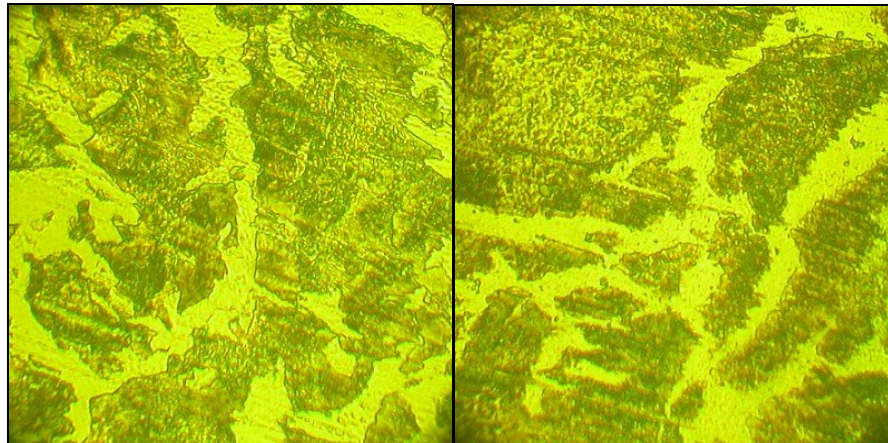


Şekil 3.29 : 1000 °C Numunelerinin B Noktaları Görüntüleri. (Şekil Değişimine Göre Soldan Sağa: $\epsilon = -0,51$, $\epsilon = -0,22$; Numuneler 106 – 107, (X500))

Şekil 3.29’da 1000 °C’de işlem görmüş olan deney numunelerinden orta ve en düşük şekil değişimi miktarlarına sahip iki numunesinin karakteristik B noktalarının görüntüleri verilmektedir. 1000 °C numunelerinde karakteristik B noktalarında şekil değişimi ile yapıda artan kaba perlit dağılımı görüntüsü yine açığa çıkmaktadır.

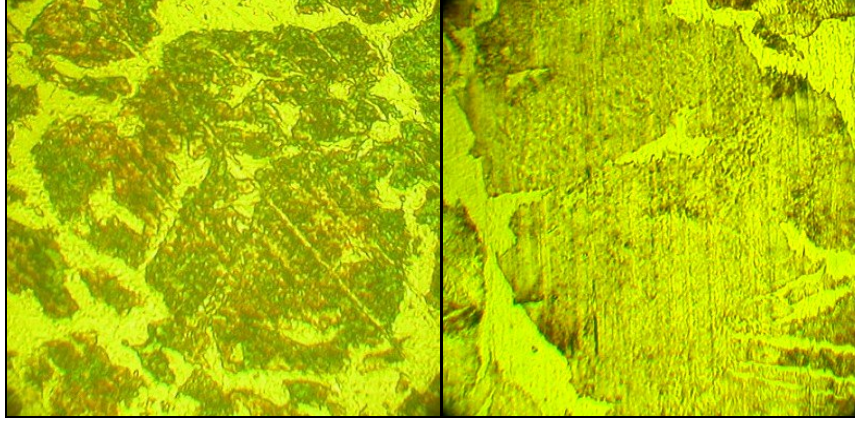
3.8.4 1100 °C’de işlem gören numunelerin mikroyapı görüntüleri

1100 °C numunelerine ait mikro yapı fotoğrafları Şekil 3.30 – Şekil 3.33 aralığında verilmektedir.



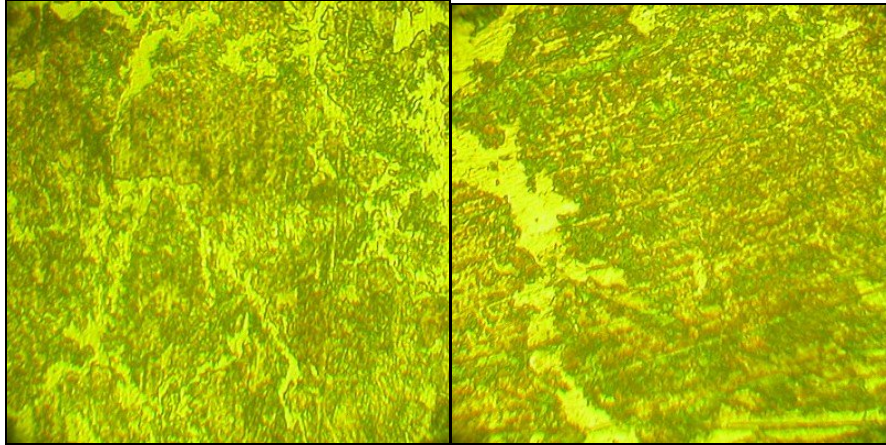
Şekil 3.30 : 1100 °C Numunelerinin A Noktaları Görüntüleri. (Şekil Değişimine Göre Soldan Sağa: $\epsilon = -0,92$, $\epsilon = -0,51$; Numuneler 111 – 115, (X500))

Şekil 3.30 ile verilmekte olan mikro yapı fotoğraflarında A noktalarının yapılarına ait perlit dağılımlarının birbirleri benzerlik gösterdiği görülmektedir ve hatta bu benzerlik durumu sertlik tablolarından da görüldüğü üzere benzer sertlik özellikleri olarak da karşımıza çıkmaktadır. (Tablo 3.17 – Tablo 3.19; Şekil 3.14)



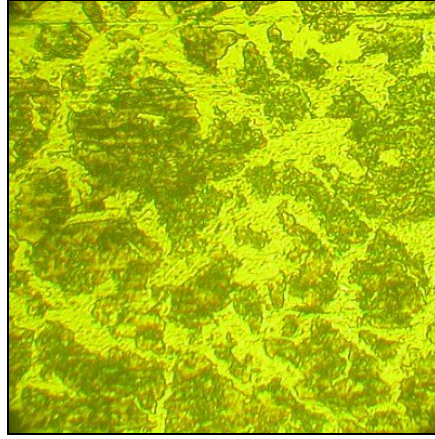
Şekil 3.31 : 1100 °C Numunelerinin C Noktaları Görüntüleri. (Şekil Değişimine Göre Soldan Sağa: $\epsilon = -0,92$, $\epsilon = -0,22$; Numuneler 111 – 119, (X500))

Şekil 3.31’de 111 ve 119 numaralı numunelerin C noktalarının yapısal fotoğrafları verilmektedir. Düşük şekil değişimi yine daha kaba bir perlit dağılımı oluşturmaktadır.



Şekil 3.32 : 1100 °C Numunelerinin B Noktaları Görüntüleri. (Şekil Değişimine Göre Soldan Sağa: $\epsilon = -0,92$, $\epsilon = -0,22$; Numuneler 111 – 118, (X500))

Şekil 3.32 ile verilen büyük ve küçük şekil değişimi miktarlarında yığılmış olan numunelerin B noktaları görüntülerinde de benzer dağılımların bulunduğu görülmektedir. Bu iki yapıya ait sertlik değerleri de benzer dağılım göstermektedir. (Tablo 3.17 ve Tablo 3.19)



Şekil 3.33 : 1100 °C’de Maksimum Şekil Değişimi Numunelerinden Birinin O Noktası Görüntüsü. ($\epsilon = -0,92$; Numune 112, (X500))

Şekil 3.33’de verilen resimdeki mikro yapı için, Şekil 3.14’de 1100 °C’de şekil değiştiren numunelerinin karakteristik bölgelerindeki sertlik değerlerinin karşılaştırılmasında da görüldüğü gibi bu sıcaklıktaki bütün numunelerinin O noktası sertlik değerleri dar bir alanda dağılım göstermektedir.

Mikro yapı görüntülerini karşılaştırmalı olarak göstermekte olan, işlem sıcaklıklarının, şekil değişimi hızlarının, yerel şekil değişimi miktarlarının, karakteristik bölgelerin ve sertlik değerlerinin de ifade edildiği Şekil A.1, Şekil A.2, Şekil A.3 ve Şekil A.4 Ek-A içerisinde verilmektedir.

4. İRDELEME

Şekil verme esnasında gerek ferrit ve gerekse ostenit fazında sıcaklığa ve deformasyon miktarına bağlı olarak statik ve/veya dinamik olarak yeniden kristalleşme sonucu ortaya çıkan içyapının oda sıcaklığına soğuması sonucu ortaya çıkan içyapıyı doğrudan belirlemekte olduğu açıktır. (Bölüm 2.3)

Bu açıdan deformasyon sıcaklığında tane boyutunu tahmin etmeye yönelik matematik modeller kullanılarak oda sıcaklığına soğuma öncesi içyapının ortalama tane boyutu tahmin edilebilir.

Deneysel çalışmaya ait veriler Bölüm 2’de verilen bazı mikro yapı modelleri kullanılarak tartışılmıştır. Literatürde benzer uygulamalarda karşılaşılan 3 ayrı model bu kısımda deney verilerine uygulanarak karşılaştırma yapılmıştır. Burada bahsedilecek üç modelde C-Mn çelikleri ve az karbonlu çelikler için kullanılabileceği belirtilen modellerdir. Bunlar sırası ile:

- Model 1: Senuma Modeli (Totten, Xie ve Funatani, 2004)
- Model 2: Sellars Modeli (Phaniraj, Behera ve Lahiri, 2004),
- Model 3: Hodgson Modeli (Phaniraj, Behera ve Lahiri, 2004),

olarak adlandırılmak suretiyle anılmıştır.

Hodgson ve Sellars modelleri haddeleme üzerine yapılan araştırmalardan çıkarılmış denklemlerdir. Senuma Modelinin, çeşitli sıcak deformasyon yöntemleri için kullanılabileceği belirtilmektedir. (Totten, Xie ve Funatani, 2004)

Şekil değişiminden sonra oda sıcaklığına soğumada Şekil 3.10’daki grafikte görüldüğü gibi numuneler sabit sıcaklıkta beklememektedir. Örneğin ötektoid sıcaklığına kadar olan soğuma süresi yaklaşık olarak 800 °C için 19 saniye, 900 °C için 26 saniye, 1000 °C için 31 saniye ve 1100 °C için 35 saniye sürmektedir.

Bu nedenle bir fikir vermesi amacıyla modellerdeki denklemlerde numunelerin sıcaklık etkilerini de ayırabilmek için 10sn.’lik bir süre yığıma işleminden sonra işlem sıcaklığında beklediği kabul edilmiştir. Bu süreler sonucu modellerin tahmin

ettiği yeniden kristalleşme oranları, yeniden kristalleşen tane boyutları ve ortalama tane boyutları hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Modellerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.1 ile Tablo 4.6 aralığındaki tablolarda her bir model için ayrı biçimde verilmektedir.

4.1. Model 1: Senuma Modeli

Senuma'nın önerdiği bu malzeme modelinde statik ve dinamik yeniden kristalleşme oranları ve tane boyutlarını verebilen denklemler verilmektedir. Bu modele göre dinamik yeniden kristalleşme olup olmadığını ifade etmek için kullanılan ε_{kritik} değeri aşağıdaki denklem ile verilmektedir.

$$\varepsilon_{kritik} = 4,76 \cdot 10^{-4} \cdot \exp\left(\frac{8000}{T}\right) \quad (2.53)$$

Denklemlerin hesaplanmasında kullanılan Zener_holloman eşitliği aşağıdaki denklem (2.54)'de tanımlanmıştır ve bu ifade deki Q aktivasyon enerjileri birim olarak cal/mol*K olarak verilmeleri nedeni ile R üniversal gaz sabiti de bu birimler uygun olarak 1,9872 cal/mol*K olarak kullanılmaktadır.(Öztürk ve Kılıç, 1993)

$$Z = \dot{\varepsilon} \cdot \exp\left(\frac{63800}{R \cdot T}\right) \quad (2.54)$$

Ayrıca $t_{0,SYK}$ ve D_{SYK} denklemlerinde kullanılan Sv katsayısı şu şekilde (2.56) denklemi ile tanımlanmıştır.

$$S_v = \left(\frac{24}{\pi \cdot D_0}\right) \cdot \left(0,491 \cdot e^{\varepsilon} + 0,155 \cdot e^{-\varepsilon} + 0,1433 \cdot e^{-3\varepsilon}\right) \quad (2.56)$$

Burada denklem içerisinde kullanılan ε şekil değişimi miktarları uygulanan bütün modellerde olduğu gibi yerel şekildeğişimleri olarak kullanılmaktadır. Bu yerel şekil değişimi değerleri Bölüm 3' deki Tablo 3.4, Tablo 3.5 ve Tablo 3.6 ile verilmektedir.

Statik olarak malzemenin %50'lik kısmının statik olarak yeniden kristalleşmesi için gereken süre denklem (2.55)'den elde edilmektedir.

$$t_{0,5SYK} = 0,286 \cdot 10^{-7} \cdot S_v^{-0,5} \cdot \varepsilon^{-2} \cdot \dot{\varepsilon}^{-0,2} \cdot \exp\left(\frac{30000}{T}\right) \quad (2.55)$$

Elde edilen verilerin denklem (2.57) içerisine uygulanması ile statik olarak yeniden kristalleşen kısım oranı hesaplanmaktadır. Bu denklemdeki “t” değeri bölümün başında belirtildiği şekilde 10sn. olarak kabul edilmiştir.

$$X_{SYK} = 1 - \exp\left[-0,693 \cdot \left(\frac{t}{t_{0,5SYK}}\right)^2\right] \quad (2.57)$$

Yapının %50’lik kısmının dinamik olarak yeniden kristalleşmesine neden olan şekil değişimi miktarını veren denklem, şekillendirme öncesi ostenit tane boyutu ve yerel şekil değişimi hızlarının yerleştirilmesi ile hesaplanabilmektedir.

$$\varepsilon_{0,5} = 1,144 \cdot 10^{-3} \cdot D_0^{0,28} \cdot \dot{\varepsilon}^{0,05} \cdot \exp\left(\frac{6420}{T}\right) \quad (2.58)$$

(2.58) de elde edilen değerlerin ve şekil değişimi miktarı ve yukarıda hesaplanmış olan kırıktık şekil değişimi miktarlarının yerleştirilmesiyle dinamik olarak yeniden kristalleşen kısım oranı aşağıdaki denklem yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$X_{DYK} = 1 - \exp\left[-0,693 \cdot \left(\frac{(\varepsilon - \varepsilon_C)}{\varepsilon_{0,5}}\right)^2\right] \quad (2.59)$$

Senuma tarafından ifade edilen (2.60) ve (2.61) deki tane boyutu denklemleri statik ve dinamik olarak yeniden kristalleşme sonrası oluşan tane boyutlarını vermektedir.

Burada ilk olarak yukarıda hesaplanmış olan Sv katsayısının ve yerel şekil değişimi miktarlarının yerleştirilmesi ile statik olarak yeniden kristalleşme sonrası tane boyutu hesaplanmaktadır.

$$D_{SYK} = \frac{5}{(S_v \cdot \varepsilon)^{0,6}} \quad (2.60)$$

Zener-Holloman bağıntısının her bir numuneye ait olarak hesaplanan değerlerinin (2.61) numaralı denkleme uygulanması ile dinamik yeniden kristalleşme sonrası tane boyutu hesaplanmaktadır. Burada dinamik yeniden kristalleşme sonrası oluşan tane boyutuna başlangıç tane boyutunun bir etkisi olmadığı görülmektedir.

$$D_{DYK} = 22600 \cdot Z^{-0,27} \quad (2.61)$$

Tane büyümesi için Senuma modeli, şu şekilde bir denklem ifade etmektedir.

$$D_{gg}^2 = D_*^2 + 1,44 \cdot 10^{12} \cdot t \cdot \exp\left(\frac{-63800}{R \cdot T}\right) \quad (2.62)$$

Burada görülmekte olan “t” değeri dinamik yeniden kristalleşme sonrası bekleme süresini ifade etmektedir. İfade içerisindeki Q değerinin de birimi kalori cinsinden olduğu için burada ki R universal gaz sabiti de yukarıda belirtildiği şekilde uygun birimlerle kullanılmaktadır. D_* değeri tane büyümesine uğrayacak olan başlangıç tane boyutudur. Bu değer yeniden kristalleşme sonrası büyüme oluşacaksa veya yeniden kristalleşmemiş tanelerin büyümesi durumunda kullanılabilir.

Senuma modelinde tane büyümesi durumu deney sonuçlarının modele uygulanmasında Bölüm 4’ün başında bahsedilmekte olan sıcaklıkta bekleme durumu göz önüne alınarak değerlendirilmiştir. 10sn.’ lik soğuma kısmındaki yapı değişimi göz önüne alındığında dinamik yeniden kristalleşmenin ardından geçen bu süre zarfında hem dinamik yeniden kristalleşen tanelerin hem de yeniden kristalleşmeyen tanelerin tane büyümesine uğradıkları düşünülerek hesaplamalar yapılmıştır. Senuma modeline ait hesaplamalar Tablo 4.1 ve Tablo 4.2 ile verilmektedir.

Tablo 4.1: Senuma Modelinin ε üst (B ve C Bölgeleri) Değerlerine Uygulanması İle Elde Edilen Modelleme Sonuçları.

NUMUNE KODU	$t_{0,5}$ SYK	X_{SYK}	$\varepsilon_{0,5}$	X_{DYK}	D_{SYK}	D_{DYK}	$D_{gg\ DYK}$
801	6,23E+05	0,00%	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ		-	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ	
802	4,44E+05	0,00%			-		
803	4,43E+05	0,00%			-		
804	5,32E+05	0,00%			-		
805	3,78E+07	0,00%			-		
806	1,11E+08	0,00%			-		
807	1,64E+08	0,00%			-		
808	1,08E+09	0,00%			-		
809	3,18E+08	0,00%			-		
810	6,65E+08	0,00%			-		
901	4,31E+04	0,00%	0,88	64,63%	-	26,90	27,24
902	4,90E+04	0,00%	0,87	62,72%	-	27,16	27,50
903	4,44E+04	0,00%	0,88	64,16%	-	26,96	27,30
904	1,01E+07	0,00%	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ		-	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ	
905	8,54E+06	0,00%			-		
906	1,02E+07	0,00%			-		
907	1,86E+08	0,00%			-		
908	2,18E+07	0,00%			-		
909	1,00E+08	0,00%			-		
101	9,37E+03	0,00%	0,57	73,92%	-	50,14	51,72
102	6,31E+03	0,00%	0,57	80,08%	-	47,93	49,58
103	6,54E+03	0,00%	0,57	79,61%	-	48,24	49,87
104	2,01E+06	0,00%	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ		-	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ	
105	9,56E+05	0,00%			-		
106	2,01E+06	0,00%			-		
107	2,51E+07	0,00%			-		
108	1,06E+06	0,00%			-		
109	6,11E+07	0,00%			-		
110	5,50E+06	0,00%			-		
111	9,71E+02	0,01%	0,40	94,39%	-	76,62	82,94
112	9,67E+02	0,01%	0,40	94,36%	-	76,25	82,59
113	9,58E+02	0,01%	0,40	94,54%	-	76,76	83,06
114	7,97E+04	0,00%	0,37	28,98%	-	114,21	118,54
115	2,10E+05	0,00%	0,37	21,59%	-	108,17	112,73
116	1,73E+05	0,00%	0,36	24,44%	-	125,82	129,76
117	3,26E+05	0,00%	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ		-	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ	
118	9,92E+05	0,00%			-		
119	1,10E+07	0,00%			-		

Tablo 4.2: Senuma Modelinin ε merkez (O ve A Bölgeleri) Değerlerine Uygulanması İle Elde Edilen Modelleme Sonuçları.

NUMUNE KODU	$t_{0,5}$ SYK	X_{SYK}	$\varepsilon_{0,5}$	X_{DYK}	D_{SYK}	D_{DYK}	$D_{gg\ DYK}$
801	1,11E+05	0,00%	1,49	65,32%	-	12,24	12,30
802	1,12E+05	0,00%	1,49	65,08%	-	12,13	12,19
803	1,02E+05	0,00%	1,49	66,03%	-	12,03	12,09
804	1,07E+05	0,00%	1,49	65,17%	-	11,90	11,96
805	4,11E+05	0,00%	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ		-	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ	
806	4,03E+05	0,00%			-		
807	4,15E+05	0,00%			-		
808	2,16E+06	0,00%			-		
809	2,30E+06	0,00%			-		
810	1,91E+06	0,00%			-		
901	8,77E+03	0,00%	0,90	85,12%	-	23,48	23,87
902	9,44E+03	0,00%	0,90	84,29%	-	23,54	23,94
903	9,17E+03	0,00%	0,90	84,64%	-	23,54	23,93
904	2,90E+04	0,00%	0,90	67,30%	-	23,12	23,52
905	3,04E+04	0,00%	0,90	66,74%	-	23,33	23,72
906	3,24E+04	0,00%	0,90	65,76%	-	23,42	23,81
907	1,65E+05	0,00%	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ		-	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ	
908	1,61E+05	0,00%			-		
909	1,82E+05	0,00%			-		
101	1,34E+03	0,00%	0,58	96,20%	-	42,14	44,00
102	1,28E+03	0,00%	0,59	96,39%	-	41,75	43,63
103	1,23E+03	0,00%	0,59	96,61%	-	41,75	43,63
104	4,76E+03	0,00%	0,59	81,56%	-	41,74	43,62
105	4,87E+03	0,00%	0,59	80,95%	-	41,35	43,24
106	4,78E+03	0,00%	0,58	81,61%	-	41,94	43,81
107	2,10E+04	0,00%	0,58	53,37%	-	42,64	44,48
108	1,86E+04	0,00%	0,58	56,79%	-	44,43	46,20
109	2,66E+04	0,00%	0,58	49,74%	-	43,80	45,60
110	2,58E+04	0,00%	0,58	50,20%	-	43,65	45,45
111	2,17E+02	0,15%	0,41	99,77%	-	67,42	74,52
112	2,12E+02	0,15%	0,41	99,78%	-	66,98	74,12
113	2,15E+02	0,15%	0,41	99,77%	-	67,59	74,67
114	8,02E+02	0,01%	0,41	94,64%	-	67,81	74,87
115	6,71E+02	0,02%	0,42	93,81%	-	55,90	64,28
116	8,03E+02	0,01%	0,41	94,66%	-	67,98	75,02
117	3,40E+03	0,00%	0,40	70,27%	-	69,73	76,61
118	4,13E+03	0,00%	0,40	66,42%	-	71,00	77,77
119	4,82E+03	0,00%	0,40	63,56%	-	72,52	79,16

4.2 Model 2: Sellars Modeli

Bu malzeme modeli Hodgson modeli ile aynı şekilde başlıca statik ve meta-dinamik yeniden kristalleşmeyi ele almaktadır. Bu modelde meta-dinamik şekil değişiminin olup olmadığını belirlenmesi amacı ile ε_{kritik} değeri aşağıdaki denklem (2.43)'den hesaplanacaktır.

$$\varepsilon_{kritik} = \frac{5}{6} \cdot \varepsilon_P \quad (2.43)$$

ε_P değeri aşağıdaki denklem (2.44) yardımı ile hesaplanır.

$$\varepsilon_P = 4,9 \cdot 10^{-4} \cdot D_0^{0,3} \cdot Z^{0,15} \quad (2.44)$$

Z burada da Zener-Holloman eşitliğini ifade etmektedir. Bu model içerisinde bu eşitlik denklem (2.45) ile tanımlanmaktadır. Bu denklemde de R, gaz sabiti 8,31441joule/mol*K olarak kullanılmaktadır.

$$Z = \dot{\varepsilon} \cdot \exp\left(\frac{312000}{R \cdot T}\right) \quad (2.45)$$

Bu denklemler kullanılarak ε_{kritik} değerleri elde edilmektedir. Elde edilen bu kritik şekil değişimi değeri bize yapı içerisinde hangi kısım ve deney numunelerinin meta-dinamik yeniden kristalleşme gösterdiğini belirtmektedir. Sellars'a göre malzemenin %50'lik kısmının statik olarak yeniden kristalleşmesi için gereken süreyi veren denklem (2.46)'da vurgulanmaktadır.

$$t_{0,5SYK} = 2,5 \cdot 10^{-19} \cdot D_0^2 \cdot \varepsilon^{-4} \cdot \exp\left(\frac{300000}{R \cdot T}\right) \quad (2.46)$$

Bu verilerin elde edilmesini takiben statik olarak yeniden kristalleşen kısım oranı denklem (2.47) yardımı ile hesaplanmaktadır. Buradaki "t" süresi işlem sonrasındaki bekleme süresidir ve yaptığımız kabulle 10sn. olarak belirtilmiştir.

$$X_{SYK} = 1 - \exp \left[-0,693 \cdot \left(\frac{t}{t_{0,5SYK}} \right)^2 \right] \quad (2.47)$$

Meta-dinamik olarak malzemenin %50'lik kısmının yeniden kristalleşmesi için gereken süre denklem (2.48) ile hesaplanmaktadır.

$$t_{0,5MDYK} = 1,06 \cdot 10^{-5} \cdot Z^{-0,6} \cdot \exp \left(\frac{300000}{R \cdot T} \right) \quad (2.48)$$

Hesaplanan bu değerler meta-dinamik olarak yeniden kristalleşen kısmının oranının hesaplanması için (2.49)'a yerleştirilir. Bu ifade içerisinde yer alan “t” süresi meta-dinamik yeniden kristalleşme mekanizması gereği işlem süresi (Tablo3.3) ile kabul edilen bekleme süresi toplamı olmaktadır.

$$X_{MDYK} = 1 - \exp \left[-0,693 \cdot \left(\frac{t}{t_{0,5SYK}} \right) \right] \quad (2.49)$$

Sellars tarafından ifade edilen tane boyutu denklemleri statik ve meta-dinamik olarak oluşan tane boyutlarını da vermektedir. Bunlara göre statik yeniden kristalleşme ile oluşabilecek tane boyutu;

$$D_{SYK} = 0,5 \cdot D_0^{0,67} \cdot \varepsilon^{-1} \quad (2.50)$$

denklemiyle hesaplanmaktadır. Meta-dinamik yeniden kristalleşen tane boyutuna ait denklem ise (2.51)' de verilmektedir. Meta-dinamik yeniden kristalleşen tane boyutu başlangıç tane boyutundan bağımsız olduğu görülmektedir

$$D_{MDYK} = 1,8 \cdot 10^3 \cdot Z^{-0,15} \quad (2.51)$$

Aynı zamanda tane büyümesi içinde denklem (2.52) verilmektedir.

$$D_{gg}^{10} = D_*^{10} + 5,02 \cdot 10^{53} \cdot t \cdot \exp \left(\frac{-914000}{R \cdot T} \right) \quad (2.52)$$

D_* değeri Senuma modelinde de bahsedildiği gibi tane büyümesine uğrayacak olan başlangıç tane boyutudur. Kabul edilen 10sn.' lik işlem sonrası bekleme süresi metadinamik yeniden kristalleşmede veya statik yeniden kristalleşmede kullanıldığından sadece, yeniden kristalleşmeyen tanelerin bu süre zarfında tane büyümesine uğradıkları düşünülerek hesaplamalar yapılmıştır. Bu denklemler ışığında yapılan deneysel çalışmaya ait verilerin kullanılması ile elde edilen sonuçlar Tablo 4.3 ve Tablo 4.4 ile verilmektedir.

Tablo 4.3: Sellars Modelinin ε üst (B ve C Bölgeleri) Değerlerine Uygulanması İle Elde Edilen Modelleme Sonuçları.

NUMUNE KODU	ε_c	$t_{0,5}$ SYK	X_{SYK}	$t_{0,5}$ MDYK	X_{MDYK}	D_{SYK}	D_{MDYK}
801	0,21	9,01	57,43%	15,89	54,39%	18,93	14,07
802	0,21	5,58	89,21%	14,48	57,14%	16,79	13,74
803	0,21	5,58	89,21%	14,43	57,26%	16,79	13,73
804	0,21	7,37	72,09%	14,52	56,09%	18,00	13,76
805	0,17	>> $t_{soğuma}$ (>10000)	0,00%	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ		-	$\varepsilon_c \wedge \varepsilon_{yerel}$
806	0,16		0,00%			-	
807	0,16		0,00%			-	
808	0,15	>> $t_{soğuma}$ (>10000)	0,00%			-	
809	0,16		0,00%			-	
810	0,15		0,00%			-	
901	0,14	0,35	100,00%	4,80	91,69%	17,17	21,36
902	0,14	0,42	100,00%	4,91	91,18%	18,00	21,48
903	0,14	0,36	100,00%	4,83	91,58%	17,37	21,39
904	0,10	>> $t_{soğuma}$ (>1000)	0,00%	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ		-	$\varepsilon_c \wedge \varepsilon_{yerel}$
905	0,10		0,00%			-	
906	0,10		0,00%			-	
907	0,09	>> $t_{soğuma}$ (>10000)	0,00%			-	
908	0,11		0,00%			-	
909	0,09		0,00%			-	
101	0,09	0,06	100,00%	2,13	99,61%	20,55	31,88
102	0,09	0,04	100,00%	1,93	99,78%	17,79	31,09
103	0,09	0,04	100,00%	1,95	99,76%	18,00	31,20
104	0,07	>> $t_{soğuma}$ (>1000)	0,01%	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ		-	$\varepsilon_c \wedge \varepsilon_{yerel}$
105	0,07		0,13%			-	
106	0,07		0,01%			-	
107	0,06	>> $t_{soğuma}$ (>10000)	0,00%			-	
108	0,08		0,07%			-	
109	0,06		0,00%			-	
110	0,07		0,00%			-	
111	0,07	0,00	100,00%	0,83	100,00%	16,89	42,27
112	0,07	0,00	100,00%	0,83	100,00%	16,89	42,16
113	0,07	0,00	100,00%	0,84	100,00%	16,79	42,31
114	0,06	7,14	74,35%	2,03	99,27%	112,10	52,77
115	0,06	52,98	2,44%	1,80	99,10%	185,03	51,20
116	0,05	28,88	7,98%	2,51	98,12%	158,99	55,68
117	0,05	>> $t_{soğuma}$ (>500)	0,58%	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$		-	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$
118	0,05		0,01%			-	
119	0,04		0,00%			-	

Tablo 4.4: Sellars Modelinin ε merkez (O ve A Bölgeleri) Değerlerine Uygulanması İle Elde Edilen Modelleme Sonuçları.

NUMUNE KODU	ε_c	$t_{0,5}$ SYK	X_{SYK}	$t_{0,5}$ MDYK	X_{MDYK}	D_{SYK}	D_{MDYK}
801	0,23	0,95	100,00%	11,34	66,70%	10,79	12,93
802	0,23	0,96	100,00%	11,12	66,81%	10,82	12,87
803	0,23	0,87	100,00%	10,91	67,50%	10,54	12,81
804	0,23	0,93	100,00%	10,65	67,47%	10,73	12,73
805	0,22	5,46	90,24%	12,00	59,61%	16,70	13,11
806	0,23	5,58	89,21%	10,89	61,02%	16,79	12,80
807	0,23	5,83	86,95%	10,85	60,90%	16,98	12,79
808	0,23	>> $t_{soğuma}$ (>100)	0,80%	11,59	53,05%	-	13,00
809	0,22		0,65%	11,78	52,48%	-	13,05
810	0,23		1,20%	11,24	54,15%	32,22	12,90
901	0,15	0,05	100,00%	3,55	96,55%	10,38	19,81
902	0,15	0,05	100,00%	3,57	96,44%	10,60	19,84
903	0,15	0,05	100,00%	3,57	96,48%	10,51	19,84
904	0,15	0,23	100,00%	3,43	94,75%	15,44	19,64
905	0,15	0,24	100,00%	3,50	94,55%	15,68	19,74
906	0,15	0,26	100,00%	3,53	94,36%	16,04	19,78
907	0,15	3,90	98,95%	3,67	90,67%	31,44	19,96
908	0,15	3,72	99,34%	3,67	90,71%	31,07	19,98
909	0,14	4,52	96,62%	3,89	89,59%	32,63	20,26
101	0,10	0,00	100,00%	1,45	99,97%	10,79	28,95
102	0,10	0,00	100,00%	1,42	99,98%	10,67	28,80
103	0,10	0,00	100,00%	1,42	99,98%	10,54	28,80
104	0,10	0,03	100,00%	1,42	99,92%	16,61	28,79
105	0,10	0,03	100,00%	1,39	99,92%	16,79	28,64
106	0,10	0,03	100,00%	1,43	99,91%	16,61	28,87
107	0,10	0,32	100,00%	1,48	99,72%	30,70	29,14
108	0,10	0,24	100,00%	1,63	99,65%	28,69	29,81
109	0,10	0,47	100,00%	1,58	99,61%	33,91	29,58
110	0,10	0,45	100,00%	1,56	99,62%	33,47	29,52
111	0,07	0,00	100,00%	0,63	100,00%	10,51	39,37
112	0,07	0,00	100,00%	0,62	100,00%	10,45	39,23
113	0,07	0,00	100,00%	0,63	100,00%	10,48	39,43
114	0,07	0,00	100,00%	0,64	100,00%	16,26	39,50
115	0,08	0,00	100,00%	0,41	100,00%	16,04	35,48
116	0,07	0,00	100,00%	0,64	100,00%	16,26	39,55
117	0,07	0,03	100,00%	0,68	100,00%	29,33	40,12
118	0,07	0,05	100,00%	0,70	100,00%	31,83	40,52
119	0,07	0,06	100,00%	0,74	100,00%	33,91	41,00

4.3 Model 3: Hodgson Modeli

Hodgson modeli başlıca statik ve meta-dinamik yeniden kristalleşmeyi ele almaktadır. Kullanılan bu modelde öncelikli olarak yapılan çalışmaya ait numunelerin kritik şekil değişimi miktarlarının yani ε_{kritik} değerlerinin tanımlanması gerekmektedir. Bölüm 2’de bahsedildiği gibi bu değer dinamik veya meta-dinamik şekil değişiminin olup olmadığını belirlemeyi sağlamaktadır ve (2.33) denklemi ile verilmektedir.

$$\varepsilon_{kritik} = \frac{5}{6} \cdot \varepsilon_P \quad (2.33)$$

Bu denklemde yer almakta olan ε_P değeri, uç genleme (peak strain) olarak tanımlanan şekil değişimi zirvesidir ve aşağıda verilen denklem (2.34) yardımı ile hesaplanır.

$$\varepsilon_P = 5,6 \cdot 10^{-4} \cdot D_0^{0,3} \cdot Z^{0,17} \quad (2.34)$$

Bu denklem içerisinde kullanılan D_0 şekil değişimi öncesindeki ostenit tane boyutunu ifade etmektedir. Literatürde ki birçok çalışma için bu değer 100µm olarak tanımlanmakta ve kabul edilmektedir. (Phaniraj, Behera ve Lahiri; 2004) Bu nedenle hesaplamalarda ostenit tane boyutu 100µm alınmıştır. Zener-Holloman (Z) eşitliği için denklem (2.35) kullanılmıştır.

$$Z = \dot{\varepsilon} \cdot \exp\left(\frac{300000}{R \cdot T}\right) \quad (2.35)$$

Bu denklemdeki $\dot{\varepsilon}$ şekil değişimi hızını ifade etmektedir.

Denklemde görünen R universal gaz sabitini (R=8,31441joule/mol*K), T ise Kelvin cinsinden işlem sıcaklığını belirtmektedir. Z denklemi deney verileri kullanılarak ε_P denklemine uygulanıp, buradan elde edilen verilerde ε_{kritik} denklemine uygulandığında ε_{kritik} değerleri elde edilmektedir.

Bunun ardından malzemenin %50'lik kısmının statik olarak yeniden kristalleşmesi için gereken süre aşağıda verilen (2.36) denklemi ile hesaplanabilmektedir. Bu denklem içerisinde de verilmekte olan şekil değişimi miktarı ifadesi yerel şekil değişimi olarak kullanılmıştır.

$$t_{0,5SYK} = 2,3 \cdot 10^{-15} \cdot D_0^2 \cdot \varepsilon^{-2,5} \cdot \exp\left(\frac{230000}{R \cdot T}\right) \quad (2.36)$$

Buradan elde edilen veriler statik yeniden kristalleşme oranını vermekte olan (2.37) denkleminde kullanılmaktadır. Bu denklemdeki t değeri şekil değişiminden sonra sıcakta bekleme miktarını ifade etmektedir ve (2.37) denklemi şöyledir:

$$X_{SYK} = 1 - \exp\left[-0,693 \cdot \left(\frac{t}{t_{0,5SYK}}\right)\right] \quad (2.37)$$

Bu verilerin hesaplanmasından sonra meta-dinamik olarak malzemenin %50'lik kısmının yeniden kristalleşmesi için gereken süre denklem (2.38) ile hesaplanmaktadır.

$$t_{0,5MDYK} = 1,1 \cdot Z^{-0,8} \cdot \exp\left(\frac{230000}{R \cdot T}\right) \quad (2.38)$$

Hesaplanan bu değerler malzemenin meta-dinamik olarak yeniden kristalleşen kısmının oranının hesaplanması için alttaki denklem (2.39)' da yerleştirilir.

$$X_{MDYK} = 1 - \exp\left[-0,693 \cdot \left(\frac{t}{t_{0,5SYK}}\right)^{1,5}\right] \quad (2.39)$$

Bu model ile ifade edilen tane boyutu denklemleri statik ve meta-dinamik olarak oluşan tane boyutlarını vermektedir. Statik yeniden kristalleşme ile oluşabilecek tane boyutu;

$$D_{SYK} = 343 \cdot D_0^{0,4} \cdot \varepsilon^{-0,5} \cdot \exp\left(\frac{-450000}{R \cdot T}\right) \quad (2.40)$$

denklemiyle hesaplanmaktadır. Meta-dinamik yeniden kristalleşen tane boyutuna ait denklem ise aşağıdaki denklem (2.41)' de sunulmaktadır.

$$D_{MDYK} = 2,6 \cdot 10^4 \cdot Z^{-0,23} \quad (2.41)$$

Aynı zamanda tane büyümesi içinde denklem (2.42) verilmektedir.

$$D_{gg}^7 = D_*^7 + 1,45 \cdot 10^{27} \cdot t \cdot \exp\left(\frac{-400000}{R \cdot T}\right) \quad (2.42)$$

Bu ifadede ki “t” yeniden kristalleşme sonrası bekleme süresini ifade etmektedir. D_* değeri diğer modellerde de bahsedildiği gibi tane büyümesine uğrayacak olan başlangıç tane boyutudur. Kabul edilen 10sn.’ lik soğuma kısmındaki yapı değişimi bu modelde de göz önüne alındığında meta-dinamik yeniden kristalleşmenin veya statik yeniden kristalleşmenin ardından yeniden kristalleşme bekleme süresinde tamamlandığından sadece yeniden kristalleşmeyen tanelerin tane büyümesine uğradıkları düşünülerek hesaplamalar yapılmıştır.

Bu denklemler ışığında yapılan deneysel çalışmaya ait verilerin kullanılması ile elde edilen sonuçlar Tablo 4.5 ve Tablo 4.6 ile verilmektedir.

Tablo 4.5: Hodgson Modelinin ε üst (B ve C Bölgeleri) Değerlerine Uygulanması İle Elde Edilen Modelleme Sonuçları.

NUMUNE KODU	ε_c	$t_{0,5}$ SYK	X_{SYK}	$t_{0,5}$ MDYK	X_{MDYK}	D_{SYK}	D_{MDYK}
801	0,36	14,24	38,53%	2,93	100,00%	3,53E-19	20,82
802	0,37	10,56	48,13%	2,59	100,00%	3,33E-19	20,09
803	0,37	10,56	48,13%	2,58	100,00%	3,33E-19	20,07
804	0,37	12,56	42,40%	2,60	100,00%	3,45E-19	20,12
805	0,28	>> $t_{soğuma}$	0,57%	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ		8,60E-19	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$
806	0,27		0,16%			1,11E-18	
807	0,26		0,10%			1,21E-18	
808	0,25	>> $t_{soğuma}$	0,01%			1,90E-18	
809	0,27		0,04%			1,44E-18	
810	0,26		0,02%			1,70E-18	
901	0,23	1,24	99,63%	2,76	100,00%	2,48E-17	38,48
902	0,23	1,39	99,30%	2,84	100,00%	2,54E-17	38,80
903	0,23	1,28	99,56%	2,78	100,00%	2,50E-17	38,56
904	0,17	>> $t_{soğuma}$	1,46%	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ		8,15E-17	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$
905	0,17		1,77%			7,83E-17	
906	0,17		1,46%			8,15E-17	
907	0,15	>> $t_{soğuma}$	0,05%			1,62E-16	
908	0,17		0,54%			9,95E-17	
909	0,15		0,10%			1,40E-16	
101	0,15	0,30	100,00%	3,39	99,96%	1,02E-15	69,54
102	0,15	0,21	100,00%	2,97	99,99%	9,47E-16	66,92
103	0,15	0,22	100,00%	3,02	99,99%	9,53E-16	67,28
104	0,11	>> $t_{soğuma}$	5,79%	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ		3,34E-15	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$
105	0,11		12,77%			2,83E-15	
106	0,11		5,79%			3,34E-15	
107	0,10	>> $t_{soğuma}$	0,30%			6,08E-15	
108	0,12		10,77%			2,94E-15	
109	0,09		0,11%			7,44E-15	
110	0,11		1,67%			4,31E-15	
111	0,11	>> $t_{soğuma}$	100,00%	2,93	99,99%	2,04E-14	105,16
112	0,11		100,00%	2,89	99,99%	2,04E-14	104,72
113	0,11		100,00%	2,95	99,99%	2,04E-14	105,32
114	0,08	>> $t_{soğuma}$	79,68%	9,57	72,15%	5,26E-14	147,74
115	0,09		36,58%	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ		6,76E-14	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$
116	0,08		48,59%			6,27E-14	
117	0,08	>> $t_{soğuma}$	25,20%			7,40E-14	
118	0,08		7,87%			9,52E-14	
119	0,06		0,53%			1,65E-13	

Tablo 4.6: Hodgson Modelinin ε merkez (O ve A Bölgeleri) Değerlerine Uygulanması İle Elde Edilen Modelleme Sonuçları.

NUMUNE KODU	ε_c	$t_{0,5}$ SYK	X_{SYK}	$t_{0,5}$ MDYK	X_{MDYK}	D_{SYK}	D_{MDYK}
801	0,40	3,49	86,23%	1,87	100,00%	2,67E-19	18,30
802	0,40	3,52	86,03%	1,82	100,00%	2,67E-19	18,16
803	0,40	3,30	87,78%	1,78	100,00%	2,64E-19	18,03
804	0,40	3,44	86,64%	1,72	100,00%	2,66E-19	17,86
805	0,39	10,41	48,61%	2,02	100,00%	3,32E-19	18,70
806	0,40	10,56	48,13%	1,77	100,00%	3,33E-19	18,01
807	0,40	10,85	47,19%	1,76	100,00%	3,35E-19	17,99
808	0,39	>> $t_{soğuma}$	10,71%	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ		4,73E-19	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$
809	0,39		10,05%			4,80E-19	
810	0,40		12,08%			4,61E-19	
901	0,25	0,35	100,00%	1,84	100,00%	1,93E-17	34,27
902	0,25	0,37	100,00%	1,86	100,00%	1,95E-17	34,35
903	0,25	0,36	100,00%	1,86	100,00%	1,94E-17	34,35
904	0,25	0,95	99,93%	1,76	100,00%	2,35E-17	33,83
905	0,25	0,99	99,91%	1,81	100,00%	2,37E-17	34,08
906	0,25	1,05	99,87%	1,83	100,00%	2,40E-17	34,19
907	0,25	5,62	70,84%	1,92	100,00%	3,36E-17	34,69
908	0,25	5,46	71,92%	1,93	100,00%	3,34E-17	34,72
909	0,24	6,17	67,49%	2,08	100,00%	3,42E-17	35,48
101	0,17	0,06	100,00%	2,02	100,00%	7,38E-16	59,97
102	0,17	0,06	100,00%	1,97	100,00%	7,34E-16	59,49
103	0,17	0,06	100,00%	1,97	100,00%	7,29E-16	59,49
104	0,17	0,18	100,00%	1,97	100,00%	9,15E-16	59,48
105	0,17	0,18	100,00%	1,91	100,00%	9,21E-16	59,00
106	0,17	0,18	100,00%	2,00	100,00%	9,15E-16	59,73
107	0,16	0,83	99,98%	2,10	100,00%	1,24E-15	60,58
108	0,16	0,70	99,99%	2,37	99,99%	1,20E-15	62,74
109	0,16	1,07	99,85%	2,27	99,99%	1,31E-15	61,98
110	0,16	1,03	99,88%	2,25	99,99%	1,30E-15	61,79
111	0,12	0,01	100,00%	2,01	100,00%	1,61E-14	94,30
112	0,12	0,01	100,00%	1,97	100,00%	1,61E-14	93,78
113	0,12	0,01	100,00%	2,02	100,00%	1,61E-14	94,50
114	0,12	0,03	100,00%	2,04	100,00%	2,00E-14	94,76
115	0,13	0,03	100,00%	1,15	100,00%	1,99E-14	80,38
116	0,12	0,03	100,00%	2,06	100,00%	2,00E-14	94,96
117	0,12	0,15	100,00%	2,22	99,99%	2,69E-14	97,04
118	0,11	0,19	100,00%	2,34	99,98%	2,80E-14	98,54
119	0,11	0,22	100,00%	2,49	100,00%	2,89E-14	100,34

4.4 Modellerin Karşılaştırılması

Deneyssel verilerin uygulandığı bahsedilen bu üç modelin statik olarak yeniden kristalleşmiş olan tane boyutu hesaplamaları karşılaştırmalı olarak Tablo 4.7 ile verilmektedir.

Tablo 4.8 ile ise bu üç modelle hesaplanan statik yeniden kristalleşmiş kısım oranları birbirleri ile karşılaştırmalı ve karakteristik bölgelere göre belirtilmiş şekilde verilmektedir.

Tablo 4.7’de verilmekte olan değerler incelendiğinde Sellars’a ait modelin vermekte olduğu statik olarak yeniden kristalleşmiş tane boyutu değerleri anlamlı ve makul sınırlar dahilinde yer almasına karşın; Senuma modelinin Tablo 4.8’de bütün numuneler için statik olarak yeniden kristalleşme hesaplanmaması nedeni ile doğal olarak da statik yeniden kristalleşmiş tane boyutundan bahsedilememektedir. Hodgson modeline ait Tablo 4.5 ve Tablo 4.6’daki veriler incelendiğinde elde edilen tane boyutu değerlerinin anlamsız sonuçlar verdiği görülmektedir.

Bu durum sonucunda Hodgson modeli için SYK tanelerinin hesaplanmasında güvenilemeyeceği sebebiyle Tablo 4.7’de verilmemekte ve Tablo 4.8’deki verilmekte olan SYK oranı da ihmal edilmektedir. Hodgson modelinin meta-dinamik yeniden kristalleşme oranını %100 olarak vermesinden dolayı statik yeniden kristalleşmeye kalan bir malzeme hacmi olmaması nedeniyle SYK’ yi aramamak gerektiği anlaşılabilir bir durum olarak görülebilir.

Tablo 4.7’de verilmekte olan Sellars değerleri incelendiğinde genel olarak artan işlem sıcaklığı ve azalan şekil değişimi miktarıyla tane boyutlarının büyüdüğü görülmektedir. Dikkat çeken bir diğer husus da yerel şekil değişimlerine göre bakıldığında, nispeten daha küçük şekil değişimi oluşmuş olan B – C bölgesine ait hesaplamaların, daha büyük şekil değişimi oluşmuş olan O – A bölgesine göre daha iri tane yapısı gösterdiği uygulanan üç model tarafından da ifade edilmektedir.

Tablo 4.8’de verilmekte olan SYK kısmi oranlarının uygulanan üç modelle değişimlerinden görülen durum tane boyutu için yapılan ifadeleri de değiştirmektedir. Bu verilerden görüldüğü üzere Senuma modeli SYK kısmi oranının bulunmadığını ifade etmektedir. Bunun sebebi bu modelle hesaplanmış olan ve Tablo

4.1 ve 4.2 ile verilmekte olan Senuma modelinin değerlerinde kısmi yeniden kristalleşme oranını hesaplamakta kullanılan, $t_{0,5SYK}$ süresinin çok büyük değerler almasıdır. Dolayısı ile statik yeniden kristalleşmenin olmadı bir yapıda statik yeniden kristalleşmiş tane boyutundan da bahsedilemeyeceği sebebiyle Senuma modelinin ifade etmekte olduğu tane boyutu değerleri anlamsız olacağından Tablo 4.7’de bahsedilmemektedir.

Tablo 4.7: Hesaplanan Hodgson, Sellars ve Senuma Modellerinin Statik Yeniden Kristalleşmiş Tane Boyutlarının B – C ve O - A Bölgelerine Göre Karşılaştırılması.

NUMUNE KODU	D _{SYK} (μm) B - C BÖLGESİ			D _{SYK} (μm) O - A BÖLGESİ		
	HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ	HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ
801	-	18,93	-	-	10,79	-
802	-	16,79	-	-	10,82	-
803	-	16,79	-	-	10,54	-
804	-	18,00	-	-	10,73	-
805	-	-	-	-	16,70	-
806	-	-	-	-	16,79	-
807	-	-	-	-	16,98	-
808	-	-	-	-	-	-
809	-	-	-	-	-	-
810	-	-	-	-	32,22	-
901	-	17,17	-	-	10,38	-
902	-	18,00	-	-	10,60	-
903	-	17,37	-	-	10,51	-
904	-	-	-	-	15,44	-
905	-	-	-	-	15,68	-
906	-	-	-	-	16,04	-
907	-	-	-	-	31,44	-
908	-	-	-	-	31,07	-
909	-	-	-	-	32,63	-
101	-	20,55	-	-	10,79	-
102	-	17,79	-	-	10,67	-
103	-	18,00	-	-	10,54	-
104	-	-	-	-	16,61	-
105	-	-	-	-	16,79	-
106	-	-	-	-	16,61	-
107	-	-	-	-	30,70	-
108	-	-	-	-	28,69	-
109	-	-	-	-	33,91	-
110	-	-	-	-	33,47	-
111	-	16,89	-	-	10,51	-
112	-	16,89	-	-	10,45	-
113	-	16,79	-	-	10,48	-
114	-	112,10	-	-	16,26	-
115	-	185,03	-	-	16,04	-
116	-	158,99	-	-	16,26	-
117	-	-	-	-	29,33	-
118	-	-	-	-	31,83	-
119	-	-	-	-	33,91	-

Tablo 4.8: Hesaplanan Hodgson, Sellars ve Senuma Modellerinin Statik Yeniden Kristalleşmiş Kısım Oranlarının B – C ve O - A Bölgelerine Göre Karşılaştırılması.

NUMUNE KODU	X _{SYK} B - C BÖLGESİ			X _{SYK} O - A BÖLGESİ		
	HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ	HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ
801	38,53%	57,43%	0,00%	86,23%	100,00%	0,00%
802	48,13%	89,21%	0,00%	86,03%	100,00%	0,00%
803	48,13%	89,21%	0,00%	87,78%	100,00%	0,00%
804	42,40%	72,09%	0,00%	86,64%	100,00%	0,00%
805	0,57%	0,00%	0,00%	48,61%	90,24%	0,00%
806	0,16%	0,00%	0,00%	48,13%	89,21%	0,00%
807	0,10%	0,00%	0,00%	47,19%	86,95%	0,00%
808	0,01%	0,00%	0,00%	10,71%	0,80%	0,00%
809	0,04%	0,00%	0,00%	10,05%	0,65%	0,00%
810	0,02%	0,00%	0,00%	12,08%	1,20%	0,00%
901	99,63%	100,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
902	99,30%	100,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
903	99,56%	100,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
904	1,46%	0,00%	0,00%	99,93%	100,00%	0,00%
905	1,77%	0,00%	0,00%	99,91%	100,00%	0,00%
906	1,46%	0,00%	0,00%	99,87%	100,00%	0,00%
907	0,05%	0,00%	0,00%	70,84%	98,95%	0,00%
908	0,54%	0,00%	0,00%	71,92%	99,34%	0,00%
909	0,10%	0,00%	0,00%	67,49%	96,62%	0,00%
101	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
102	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
103	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
104	5,79%	0,01%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
105	12,77%	0,13%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
106	5,79%	0,01%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
107	0,30%	0,00%	0,00%	99,98%	100,00%	0,00%
108	10,77%	0,07%	0,00%	99,99%	100,00%	0,00%
109	0,11%	0,00%	0,00%	99,85%	100,00%	0,00%
110	1,67%	0,00%	0,00%	99,88%	100,00%	0,00%
111	100,00%	100,00%	0,01%	100,00%	100,00%	0,15%
112	100,00%	100,00%	0,01%	100,00%	100,00%	0,15%
113	100,00%	100,00%	0,01%	100,00%	100,00%	0,15%
114	79,68%	74,35%	0,00%	100,00%	100,00%	0,01%
115	36,58%	2,44%	0,00%	100,00%	100,00%	0,02%
116	48,59%	7,98%	0,00%	100,00%	100,00%	0,01%
117	25,20%	0,58%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
118	7,87%	0,01%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
119	0,53%	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%

Kullanılan modellere ait meta-dinamik olarak yeniden kristalleşmiş olan tane boyutu hesaplamaları karşılaştırmalı olarak Tablo 4.9 ile verilmektedir. Tablo 4.10 ile ise bu üç modelle hesaplanan meta-dinamik yeniden kristalleşmiş kısım oranları birbirleri ile karşılaştırmalı ve karakteristik bölgelere göre belirtilmiş şekilde verilmektedir.

Tablo 4.9 ile verilmekte olan tane boyutu değerlerini Senuma modelinin hesaplamadığı ve boş bırakıldığı görülmektedir. Bunun nedeni Senuma modelinin MDYK değil DYK hesaplamasıdır. Bu model içerisinde MDYK hesaplayan bir ifade kullanılmamaktadır.

Tablo 4.9' un Hodgson ve Sellars modelleri bakımından incelenmesinde bazı şekil değişimi miktarları ve karakteristik bölgeleri itibarı ile meta-dinamik tane boyutunun hesaplanamadığı görülmektedir. Bu durum Hodgson modeli için denklem (2.33) ve Sellars modeli için ise denklem (2.43)'de ifade edilen kritik şekil değişimi miktarlarının hesaplama yapılan bölgenin yerel şekil değişimi miktarından büyük olması yani aşılamamış olması nedeni ile meta-dinamik yeniden kristalleşmenin görülmemesinden kaynaklanmaktadır. Hodgson modeline ait kritik şekil değişimi değerleri Tablo 4.5 ve Tablo 4.6'dan, Sellars modeline ait kritik şekil değişimi değerleri ise Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'den görülebilmektedir. Karşılaştırma yapılan yerel şekil değişimi miktarları Bölüm 3 içerisindeki Tablo 3.4 – 3.5 ve 3.6 ile ifade edilmektedir.

Hesaplanabilen değer açısından Tablo 4.9 incelendiğinde Sellars modelinin Hodgson'a oranla bütün değerlerde daha küçük MDYK tane boyutu verdiği görülmektedir.

Yukarıda Tablo 4.9 için ifade edilen durumlar Tablo 4.10 ile verilmekte olan meta-dinamik yeniden kristalleşmiş kısım oranları açısından da geçerli olmaktadır. Senuma modelinin MDYK hesaplamaması nedeni ile meta-dinamik yeniden kristalleşmiş kısım oranı hesaplanamamakta, bazı şekil değişimi miktarları için kritik şekil değişimi miktarının aşılamaması nedeni ile Hodgson ve Sellars modelleri içinde hesaplanamamaktadır. Ayrıca burada Sellars modelinin düşük sıcaklıklarda, Hodgson modeline göre daha düşük bir MDYK oranı hesaplamakta olduğu görülmektedir.

Tablo 4.9: Hesaplanan Hodgson, Sellars ve Senuma Modellerinin Meta-dinamik Yeniden Kristalleşmiş Tane Boyutlarının B – C ve O - A Bölgelerine Göre Karşılaştırılması.

NUMUNE KODU	D _{MDYK} (μm) B - C BÖLGESİ			D _{MDYK} (μm) O - A BÖLGESİ			
	HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ	HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ	
801	20,82	14,07	SENUMA MODELİ METADİNAMİK YENİDEN KRİSTALLEŞME DENKLEMLERİ İÇERMEDİĞİNDEN HESAPLANMAMAKTADIR.	18,30	12,93	SENUMA MODELİ METADİNAMİK YENİDEN KRİSTALLEŞME DENKLEMLERİ İÇERMEDİĞİNDEN HESAPLANMAMAKTADIR.	
802	20,09	13,74		18,16	12,87		
803	20,07	13,73		18,03	12,81		
804	20,12	13,76		17,86	12,73		
805	ε _c > ε _{yerel} OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ			18,70	13,11		
806				18,01	12,80		
807				ε _c > ε _{yerel}	17,99		12,79
808					13,00		
809					13,05		
810				12,90			
901	38,48	21,36		34,27	19,81		
902	38,80	21,48		34,35	19,84		
903	38,56	21,39		34,35	19,84		
904	ε _c > ε _{yerel} OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ			33,83	19,64		
905				34,08	19,74		
906				34,19	19,78		
907				34,69	19,96		
908				34,72	19,98		
909				35,48	20,26		
101	69,54	31,88		59,97	28,95		
102	66,92	31,09		59,49	28,80		
103	67,28	31,20		59,49	28,80		
104	ε _c > ε _{yerel} OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ			59,48	28,79		
105				59,00	28,64		
106				59,73	28,87		
107				60,58	29,14		
108				62,74	29,81		
109				61,98	29,58		
110	61,79	29,52					
111	105,16	42,27		94,30	39,37		
112	104,72	42,16		93,78	39,23		
113	105,32	42,31		94,50	39,43		
114	147,74	52,77		94,76	39,50		
115		51,20		80,38	35,48		
116		55,68		94,96	39,55		
117	ε _c > ε _{yerel} OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ			97,04	40,12		
118				98,54	40,52		
119				100,34	41,00		

Tablo 4.10: Hesaplanan Hodgson, Sellars ve Senuma Modellerinin Meta-dinamik Yeniden Kristalleşmiş Kısım Oranlarının B – C ve O - A Bölgelerine Göre Karşılaştırılması.

NUMUNE KODU	X _{MDYK} B - C BÖLGESİ			X _{MDYK} O - A BÖLGESİ		
	HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ	HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ
801	100,00%	54,39%	SENUMA MODELİ METADİNAMİK YENİDEN KRİSTALLEŞME DENKLEMLERİ İÇERMEDİĞİNDEN HESAPLANMAMAKTADIR.	100,00%	66,70%	SENUMA MODELİ METADİNAMİK YENİDEN KRİSTALLEŞME DENKLEMLERİ İÇERMEDİĞİNDEN HESAPLANMAMAKTADIR.
802	100,00%	57,14%		100,00%	66,81%	
803	100,00%	57,26%		100,00%	67,50%	
804	100,00%	56,09%		100,00%	67,47%	
805	ε _c > ε _{yerel} OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ			100,00%	59,61%	
806				100,00%	61,02%	
807				100,00%	60,90%	
808				ε _c > ε _{yerel}	53,05%	
809					52,48%	
810					54,15%	
901	100,00%	91,69%		100,00%	96,55%	
902	100,00%	91,18%		100,00%	96,44%	
903	100,00%	91,58%		100,00%	96,48%	
904	ε _c > ε _{yerel} OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ			100,00%	94,75%	
905				100,00%	94,55%	
906				100,00%	94,36%	
907				100,00%	90,67%	
908				100,00%	90,71%	
909				100,00%	89,59%	
101	99,96%	99,61%		100,00%	99,97%	
102	99,99%	99,78%		100,00%	99,98%	
103	99,99%	99,76%		100,00%	99,98%	
104	ε _c > ε _{yerel} OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ			100,00%	99,92%	
105				100,00%	99,92%	
106				100,00%	99,91%	
107				100,00%	99,72%	
108				99,99%	99,65%	
109				99,99%	99,61%	
110				99,99%	99,62%	
111	99,99%	100,00%		100,00%	100,00%	
112	99,99%	100,00%		100,00%	100,00%	
113	99,99%	100,00%		100,00%	100,00%	
114	72,15%	99,27%		100,00%	100,00%	
115	ε _c > ε _{yerel} OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ	99,10%		100,00%	100,00%	
116		98,12%		100,00%	100,00%	
117				99,99%	100,00%	
118				99,98%	100,00%	
119				100,00%	100,00%	

Modellere ait dinamik olarak yeniden kristalleşmiş olan tane boyutu hesaplamaları Tablo 4.11 ile verilmektedir. Tablo 4.12 ile ise bu üç modelle hesaplanan dinamik yeniden kristalleşmiş kısım oranları karakteristik bölgelere göre belirtilmiş şekilde verilmektedir.

Tablo 4.11’de görüldüğü üzere dinamik olarak yeniden kristalleşmiş tanelerin boyutu Hodgson ve Sellars modelleri tarafından hesaplanmamaktadır. Bu durum, bu iki modelin DYK değil MDYK hesaplamasında kaynaklanmaktadır.

Tablo 4.11’in sadece Senuma modeli bakımından incelenmesinde bazı şekil değişimi miktarları ve karakteristik bölgeleri itibari ile dinamik tane boyutunun hesaplanmadığı görülmektedir. Bu durum denklem (2.53)’de ifade edilen kritik şekil değişimi miktarlarının hesaplama yapılan bölgenin yerel şekil değişimi miktarından büyük olması yani aşılammış olması nedeni ile Senuma modeline göre dinamik yeniden kristalleşmenin görülmemesinden kaynaklanmaktadır.

Senuma modeline ait kritik şekil değişimi değerleri Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’den görülebilmektedir. Karşılaştırma yapılan yerel şekil değişimi miktarları Bölüm 3 içerisindeki Tablo 3.4 – 3.5 ve 3.6 ile ifade edilmektedir.

Tablo 4.11’den görüldüğü üzere hesaplanmakta olan DYK tane boyutları artan şekil değişimi ile küçülmekte, artan sıcaklık değerleri ile ise büyümektedir. Aynı zamanda daha büyük şekil değişimi oluşmuş olan O – A bölgesindeki tane boyutu değerleri B – C bölgesine göre daha küçük olarak hesaplanmaktadır.

Tablo 4.12 ile verilmekte olan dinamik yeniden kristalleşmiş kısım oranları, Tablo 4.11 içinde belirtildiği şekilde Hodgson ve Sellars modelleri için hesaplanmamakta ve kritik şekil değişimi değerlerinin aşılamadığı durumlar için de Senuma tarafından da hesaplanmamaktadır. Bu tablodan görüldüğü üzere hesaplanan değerler açısından bakıldığında, artan şekil değişimi miktarı ve artan sıcaklık doğrultusunda dinamik olarak yeniden kristalleşen kısım oranları da büyümektedir.

Tablo 4.11: Hesaplanan Hodgson, Sellars ve Senuma Modellerinin Dinamik Yeniden Kristalleşmiş Tane Boyutlarının B – C ve O - A Bölgelerine Göre Karşılaştırılması.

NUMUNE KODU	D _{DYK} (μm) B - C BÖLGESİ			D _{DYK} (μm) O - A BÖLGESİ		
	HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ	HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ
801	HODGSON MODELİ DİNAMİK YENİDEN KRİSTALLEŞME DENKLEMLERİ İÇERMEDİĞİNDEN HESAPLANMAMAKTADIR.	SELLARS MODELİ DİNAMİK YENİDEN KRİSTALLEŞME DENKLEMLERİ İÇERMEDİĞİNDEN HESAPLANMAMAKTADIR.	$\epsilon_c > \epsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ	HODGSON MODELİ DİNAMİK YENİDEN KRİSTALLEŞME DENKLEMLERİ İÇERMEDİĞİNDEN HESAPLANMAMAKTADIR.	SELLARS MODELİ DİNAMİK YENİDEN KRİSTALLEŞME DENKLEMLERİ İÇERMEDİĞİNDEN HESAPLANMAMAKTADIR.	12,24
802						12,13
803						12,03
804						11,90
805						$\epsilon_c > \epsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ
806						
807						
808						
809						
810						
901			26,90			23,48
902			27,16			23,54
903			26,96			23,54
904			$\epsilon_c > \epsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ			23,12
905						23,33
906						23,42
907						$\epsilon_c > \epsilon_{yerel}$
908						
909						
101			50,14			42,14
102			47,93			41,75
103			48,24			41,75
104			$\epsilon_c > \epsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ			41,74
105						41,35
106						41,94
107						42,64
108						44,43
109						43,80
110						43,65
111			76,62			67,42
112			76,25			66,98
113			76,76			67,59
114			114,21			67,81
115			108,17			55,90
116			125,82			67,98
117			$\epsilon_c > \epsilon_{yerel}$			69,73
118						71,00
119						72,52

Tablo 4.12: Hesaplanan Hodgson, Sellars ve Senuma Modellerinin Dinamik Yeniden Kristalleşmiş Kısım Oranlarının B – C ve O - A Bölgelerine Göre Karşılaştırılması.

NUMUNE KODU	X _{DYK} B - C BÖLGESİ			X _{DYK} O - A BÖLGESİ		
	HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ	HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ
801	HODGSON MODELİ DİNAMİK YENİDEN KRİSTALLEŞME DENKLEMLERİ İÇERMEDİĞİNDEN HESAPLANMAMAKTADIR.	SELLARS MODELİ DİNAMİK YENİDEN KRİSTALLEŞME DENKLEMLERİ İÇERMEDİĞİNDEN HESAPLANMAMAKTADIR.	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ	HODGSON MODELİ DİNAMİK YENİDEN KRİSTALLEŞME DENKLEMLERİ İÇERMEDİĞİNDEN HESAPLANMAMAKTADIR.	SELLARS MODELİ DİNAMİK YENİDEN KRİSTALLEŞME DENKLEMLERİ İÇERMEDİĞİNDEN HESAPLANMAMAKTADIR.	65,32%
802						65,08%
803						66,03%
804						65,17%
805			$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ			$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$ OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ
806						
807						
808						
809						
810						
901						85,12%
902						84,29%
903						84,64%
904						67,30%
905						66,74%
906						65,76%
907			$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$			
908						
909						
101	96,20%					
102	96,39%					
103	96,61%					
104	81,56%					
105	80,95%					
106	81,61%					
107	53,37%					
108	56,79%					
109	49,74%					
110	50,20%					
111	99,77%					
112	99,78%					
113	99,77%					
114	94,64%					
115	93,81%					
116	94,66%					
117	70,27%					
118	66,42%					
119	$\varepsilon_c > \varepsilon_{yerel}$	63,56%				

Tablo 4.13’de daha önce verilmiş olan Tablo 4.7, Tablo 4.9 ve Tablo 4.11’deki hesaplanmış tane boyutu verileri birbirleri ile karşılaştırmalı olarak tekrar verilmektedir.

Tablo 4.13 kullanılan bu üç modelin hesapladığı tane boyutlarını ve bu tanelerin yeniden kristalleşme türüne göre ifade edilmesini göstermektedir. Buradan görülebildiği üzere Senuma modelinin MDYK durumunu hesaplamamasıyla tane boyutu değerlerinin de hesaplamadığı bir kez daha görülmektedir. Benzer durumda Hodgson ve Sellars’ a ait modellerinde DYK hesaplamaması nedeni ile tane boyutu değerleri hesaplanmamaktadır.

Ayrıca bu üç modelde, kendi içlerinde tanımlanmış olan kritik şekil değişimi miktarının, yerel şekil değişimi miktarlarından daha büyük olması yani aşılammamış olması durumlarında da tane boyutu hesaplarının yapılamadığı görülmektedir.

Tablo 4.13’ün bize sağladığı görünüm ile yeniden kristalleşme mekanizmaları itibariyle işlem sırasında oluşan (DYK) tane boyutu D_{DYK} , işlem sonrası bekleme durumunda oluşan (SYK) tane boyutu D_{SYK} ve işlem anını da kapsayarak bekleme süresi sonuna kadar oluşan (MDYK) tane boyutu D_{MDYK} durumları bir arada görülmektedir.

Bu tablo içerisinde Sellars ve Senuma modellerinin makul sonuçlar sunmasına karşın, Hodgson modelinin SYK tane boyutu için hesaplamalarının fiziksel anlamsızlığı nedeni ile Tablo 4.13’de verilmemektedir.

Tablo 4.13: Tablo 4.7, Tablo 4.9 ve Tablo 4.11 Verilerine Göre Uygulanan Üç Modelin Tane Boyutu Hesaplamalarının Karşılaştırılması.

SICAKLIK (°C)	ϵ	TANE CİNSİ	ORTALAMA TANE BOYUTLARI					
			B - C BÖLGESİ (µm)			O - A BÖLGESİ (µm)		
			HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ	HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ
800 °C	-0,22	D _{SYK}	-	-	-	-	32,22	-
		D _{DYK}	-	-	-	-	-	-
		D _{MDYK}	-	-	-	-	12,99	-
	-0,51	D _{SYK}	-	-	-	-	16,82	-
		D _{DYK}	-	-	-	-	-	-
		D _{MDYK}	-	-	-	18,23	12,90	-
	-0,92	D _{SYK}	-	17,63	-	-	10,72	-
		D _{DYK}	-	-	-	-	-	12,08
		D _{MDYK}	20,28	13,83	-	18,09	12,83	-
900 °C	-0,22	D _{SYK}	-	-	-	-	31,71	-
		D _{DYK}	-	-	-	-	-	-
		D _{MDYK}	-	-	-	34,96	20,07	-
	-0,51	D _{SYK}	-	-	-	-	15,72	-
		D _{DYK}	-	-	-	-	-	23,29
		D _{MDYK}	-	-	-	34,03	19,72	-
	-0,92	D _{SYK}	-	17,52	-	-	10,50	-
		D _{DYK}	-	-	27,01	-	-	23,52
		D _{MDYK}	38,61	21,41	-	34,32	19,83	-
1000 °C	-0,22	D _{SYK}	-	-	-	-	31,70	-
		D _{DYK}	-	-	-	-	-	43,63
		D _{MDYK}	-	-	-	61,77	29,51	-
	-0,51	D _{SYK}	-	-	-	-	16,67	-
		D _{DYK}	-	-	-	-	-	41,68
		D _{MDYK}	-	-	-	59,40	28,77	-
	-0,92	D _{SYK}	-	18,78	-	-	10,67	-
		D _{DYK}	-	-	48,77	-	-	41,88
		D _{MDYK}	67,92	31,39	-	59,65	28,85	-
1100 °C	-0,22	D _{SYK}	-	-	-	-	31,69	-
		D _{DYK}	-	-	-	-	-	71,08
		D _{MDYK}	-	-	-	98,64	40,54	-
	-0,51	D _{SYK}	-	152,04	-	-	16,18	-
		D _{DYK}	-	-	116,07	-	-	63,89
		D _{MDYK}	147,74	53,22	-	90,03	38,18	-
	-0,92	D _{SYK}	-	16,86	-	-	10,48	-
		D _{DYK}	-	-	76,54	-	-	67,33
		D _{MDYK}	105,06	42,25	-	94,19	39,34	-

Tablo 4.14’de Hodgson ve Sellars modelleri ile hesaplanmakta olan MDYK tanelerinin büyümesi, kabul edilen bekleme süresince sadece yeniden kristalleşme görülüp tane büyümesi için bir bekleme süresi oluşmayacağından hesaplanmamıştır. Senuma modeli ile hesaplanan DYK tanelerinin, işlem sıcaklıklarından itibaren 10sn.’lik süre kadar olan soğumaları sonucunda oluşabilecek olan tane büyümesine uğramış tane boyutları verilmektedir.

Tablo 4.14: Uygulanan Modellere Göre Tane Büyümesine Uğramış Olan Yeniden Kristalleşmiş Tane Boyutları.

NUMUNE KODU	D _{gg} MDYK VE D _{gg} DYK (µm) B - C BÖLGESİ			D _{gg} MDYK VE D _{gg} DYK (µm) O - A BÖLGESİ			
	HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ	HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ	
801	-	-		-	-	12,30	
802	-	-		-	-	12,19	
803	-	-		-	-	12,09	
804	-	-		-	-	11,96	
805	ε _c > ε _{yerel} OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ			-	-	ε _c > ε _{yerel} OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ	
806				-	-		
807				-	-		
808				ε _c > ε _{yerel}	-		
809					-		
810					-		
901	-	-	24,54	-	-	23,87	
902	-	-	26,01	-	-	23,94	
903	-	-	24,90	-	-	23,93	
904	ε _c > ε _{yerel} OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ			-	-	23,52	
905				-	-	23,72	
906				-	-	23,81	
907				-	-	ε _c > ε _{yerel}	
908				-	-		
909				-	-		
101	-	-	51,72	-	-	44,00	
102	-	-	49,58	-	-	43,63	
103	-	-	49,87	-	-	43,63	
104	ε _c > ε _{yerel} OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ			-	-	43,62	
105				-	-	43,24	
106				-	-	43,81	
107				-	-	44,48	
108				-	-	46,20	
109				-	-	45,60	
110				-	-	45,45	
111	-	-	82,94	-	-	74,52	
112	-	-	82,59	-	-	74,12	
113	-	-	83,06	-	-	74,67	
114	-	-	118,54	-	-	74,87	
115		-	112,73	-	-	64,28	
116		-	129,76	-	-	75,02	
117		ε _c > ε _{yerel} OLDUĞUNDAN HESAPLANMAZ			-	-	76,61
118					-	-	77,77
119					-	-	79,16

Tablo 4.14’de dinamik yeniden kristalleşmiş tanelere ait tane büyümesine uğramış olan tanelerin boyutları verilmektedir. Üç modelinde tane büyümesi denklemleri işlem sıcaklıklarından itibaren 10sn.’lik süre içindeki soğuma durumu için hesaplanmıştır. Bu hesaplamalardaki soğuma süreleri Bölüm 3’de Şekil 3.10 ile verilmekte olan deney numunelerine ait kalıp dışında havada soğuma eğrisinden alınmıştır. Ancak daha öncede bahsedildiği gibi meta-dinamik ve statik yeniden kristalleşme süreçleri bu bölümün başında bahsedilen şekilde yapılan kabule göre tane büyümesi için bir bekleme süresine sahip olmamaktadır. Bu nedenle de Sellars ve Hodgson modelleri için yeniden kristalleşen tanelerin tane büyümesi hesaplanamamaktadır.

Tablo 4.14 incelendiğinde Senuma modelinin DYK tanelerinin büyümesi B – C ve aynı zamanda O – A karakteristik bölgelerine göre artan sıcaklık ile artan tane büyümesi göstermektedir. Ayrıca karakteristik bölgeler karşılaştırıldığında daha yüksek şekil değişimi oluşmakta olan O – A bölgesinde daha küçük taneli bir yapının benzer sıcaklıklar için karşımıza çıktığı görülmektedir.

Hodgson ve Sellars modellerinin karşılaştırılmasında O – A bölgesinde düşük sıcaklık işlemlerinde Sellars modelinde daha küçük tane büyümesi görülmekteyken, yüksek sıcaklık işlemlerinde daha büyük tane büyümesi hesaplamakta olduğu görülmektedir.

Tablo 4.15 ile verilmekte olan yeniden kristalleşmemiş tanelerin büyümesi ile ilgili modellere ait veriler incelenmektedir. Buradaki hesaplamalar içinde Hodgson modeli için denklem (2.42), Sellars modeli için denklem (2.52) ve Senuma modeli için ise denklem (2.62)’ den yararlanılmıştır. Yeniden kristalleşmemiş tanelerin büyümesinde Sellars modelinin Hodgson ve Senuma modellerine göre 1100 °C numunelerinde daha büyük bir büyüme hesapladığı görülmektedir. Diğer sıcaklıklarda ise Senuma modeli daha büyük tane büyümesi vermektedir.

Tablo 4.15: Uygulanan Modellere Göre Tane Büyümesine Uğramış Olan Yeniden Kristalleşmemiş Tane Boyutları.

NUMUNE KODU	D _{gg} KRİSTALLEŞMEMİŞ (μm) B - C BÖLGESİ			D _{gg} KRİSTALLEŞMEMİŞ (μm) O - A BÖLGESİ		
	HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ	HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ
801	100,00	100,00	100,01	100,00	100,00	100,01
802	100,00	100,00	100,01	100,00	100,00	100,01
803	100,00	100,00	100,01	100,00	100,00	100,01
804	100,00	100,00	100,01	100,00	100,00	100,01
805	100,00	100,00	100,01	100,00	100,00	100,01
806	100,00	100,00	100,01	100,00	100,00	100,01
807	100,00	100,00	100,01	100,00	100,00	100,01
808	100,00	100,00	100,01	100,00	100,00	100,01
809	100,00	100,00	100,01	100,00	100,00	100,01
810	100,00	100,00	100,01	100,00	100,00	100,01
901	100,00	100,00	100,09	100,00	100,00	100,09
902	100,00	100,00	100,09	100,00	100,00	100,09
903	100,00	100,00	100,09	100,00	100,00	100,09
904	100,00	100,00	100,09	100,00	100,00	100,09
905	100,00	100,00	100,09	100,00	100,00	100,09
906	100,00	100,00	100,09	100,00	100,00	100,09
907	100,00	100,00	100,09	100,00	100,00	100,09
908	100,00	100,00	100,09	100,00	100,00	100,09
909	100,00	100,00	100,09	100,00	100,00	100,09
101	100,08	100,02	100,80	100,08	100,02	100,80
102	100,08	100,02	100,80	100,08	100,02	100,80
103	100,08	100,02	100,80	100,08	100,02	100,80
104	100,08	100,02	100,80	100,08	100,02	100,80
105	100,08	100,02	100,80	100,08	100,02	100,80
106	100,08	100,02	100,80	100,08	100,02	100,80
107	100,08	100,02	100,80	100,08	100,02	100,80
108	100,08	100,02	100,80	100,08	100,02	100,80
109	100,08	100,02	100,80	100,08	100,02	100,80
110	100,08	100,02	100,80	100,08	100,02	100,80
111	101,21	106,34	104,91	101,21	106,34	104,91
112	101,21	106,34	104,91	101,21	106,34	104,91
113	101,21	106,34	104,91	101,21	106,34	104,91
114	101,21	106,34	104,91	101,21	106,34	104,91
115	101,21	106,34	104,91	101,21	106,34	104,91
116	101,21	106,34	104,91	101,21	106,34	104,91
117	101,21	106,34	104,91	101,21	106,34	104,91
118	101,21	106,34	104,91	101,21	106,34	104,91
119	101,21	106,34	104,91	101,21	106,34	104,91

Bölüm 3’de verilen sertlik değerleri incelenerek en yüksek sertlik 1 ve en düşük sertlik 10 olmak üzere kendi aralarında derecelendirilerek aşağıda sunulan Tablo 4.16 oluşturulmuştur. Ayrıca Tablo 4.16’ sertlik değerleri de parantez içinde verilmektedir.

Tablo 4.16: Deney Numunelerinin Ortalama Sertlik Değerleri İncelemesi Sonucu İçyapı Derecelendirilmesi.

ϵ	$\epsilon_{\text{yerel ORTALAMA}}$	SICAKLIK (°C)			
		800 °C	900 °C	1000 °C	1100 °C
-0,22	Üst -0,03	1 (491 HV2)	8 (424 HV2)	7 (427 HV2)	8 (423 HV2)
	Merkez -0,34	7 (431 HV2)	7 (427 HV2)	8 (421 HV2)	7 (428 HV2)
-0,51	Üst -0,07	1 (502 HV2)	5 (448 HV2)	9 (413 HV2)	9 (411 HV2)
	Merkez -0,67	6 (437 HV2)	6 (435 HV2)	8 (423 HV2)	9 (413 HV2)
-0,92	Üst -0,62	2 (487 HV2)	5 (453 HV2)	10 (399 HV2)	10 (394 HV2)
	Merkez -1,03	5 (449 HV2)	7 (433 HV2)	10 (390 HV2)	10 (397 HV2)

Yukarıda verilmekte olan Tablo 4.16’da yapılan sertlik derecelendirmesine göre en yüksek sertlik 800 °C numunelerinin B – C şekil değişimi bölgelerinde ve en düşük sertlik ise 1000 °C ve 1100 °C numunelerinde görülmektedir.

Ortalama tane boyutunu bulmak için, karışımlar kuralı olarak da bilinen Bölüm 2’de belirtilmekte olan denklem (2.12)’nin denklem (4.1)’e dönüşümü yapılarak Hodgson ve Sellars modelleri için, denklem (4.2)’ye dönüşümü yapılarak da Senuma modeli için kullanılmıştır.

$$D_{ORT} = X_{MDYK} \cdot D_{MDYK} + (1 - X_{MDYK}) \cdot X_{SYK} \cdot D_{SYK} + (1 - (1 - X_{MDYK}) \cdot X_{SYK}) \cdot D_{0gg} \quad (4.1)$$

$$D_{ORT} = X_{DYK} \cdot D_{DYK} + (1 - X_{DYK}) \cdot D_{0gg} \quad (4.2)$$

Bu denklem içerisinde kullanılan yeniden kristalleşmeye uğramış kısım oranları Hodgson ve Sellars modelleri için Tablo 4.10, Senuma modeli için ise Tablo 4.12'den alınmaktadır. Bu hesaplama ile ilişkin ortalama tane boyutu verileri Tablo 4.17'de görülmektedir.

Bu tablonun incelenmesi durumunda en büyük ortalama tane boyutlarının bütün modeller için yüksek sıcaklıklarda olduğu görülmektedir. Ancak Sellars modelinin hesaplamalarında diğerlerinden daha farklı bir dağılım göze çarpmaktadır. Düşük sıcaklıkta bu modelde yeniden kristalleşmemiş tanelerin ortalamadaki etkisi daha büyük olduğundan ortalama tane boyutunu büyük hesaplanmakta ve yüksek işlem sıcaklıklarında ise yeniden kristalleşen tanelerin etkisinin artması ve tane boyutlarının büyük olması nedeni ile diğer modellerden daha büyük tane boyutu göstermektedir.

Bütün modellerin hesaplamalarında B – C bölgesine ait değerler O – A bölgesine ait değerlerden daha büyük olmaktadır. Hesaplanan en küçük ortalama tane boyutunu düşük sıcaklıklar için Hodgson modeli her iki karakteristik bölge içinde vermekte, en büyük ortalama tane boyutu Sellars modeli tarafından her iki karakteristik bölge için yüksek sıcaklıklarda hesaplanmaktadır. Bütün modellerde artan sıcaklık ve azalan şekil değişimi ile birlikte tane boyutlarının daha büyük değerlere ulaştığı görülmektedir.

Tablo 4.17: Uygulanan Üç Model İçin İşlem Sıcaklığı Sonrasındaki 10sn.'lik Süre İçinde Elde Edilen Ortalama Tane Boyutu Değerleri.

NUMUNE KODU	D _{gg} ORTALAMA (μm) B - C BÖLGESİ			D _{gg} ORTALAMA (μm) O - A BÖLGESİ		
	HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ	HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ
801	20,83	86,80	100,01	18,30	78,92	42,72
802	20,09	76,06	100,01	18,16	78,99	42,86
803	20,07	75,97	100,01	18,03	79,57	41,95
804	20,12	74,05	100,01	17,86	79,54	42,63
805	100,00	100,00	100,01	18,70	77,45	100,01
806	100,00	100,00	100,01	18,01	78,88	100,01
807	100,00	100,00	100,01	17,99	79,56	100,01
808	100,00	100,00	100,01	100,00	106,52	100,01
809	100,00	100,00	100,01	100,00	106,54	100,01
810	100,00	100,00	100,01	100,00	106,61	100,01
901	38,48	112,60	51,27	34,27	116,03	35,21
902	38,80	112,43	53,63	34,35	115,95	35,90
903	38,56	93,05	51,85	34,35	115,98	35,63
904	100,00	100,00	100,09	33,83	114,17	48,56
905	100,00	100,00	100,09	34,08	114,07	49,12
906	100,00	100,00	100,09	34,19	113,92	49,93
907	100,00	100,00	100,09	34,69	111,77	100,09
908	100,00	100,00	100,09	34,72	111,76	100,09
909	100,00	100,00	100,09	35,49	111,38	100,09
101	69,55	131,51	64,52	59,97	128,93	46,16
102	66,92	130,85	59,78	59,49	128,78	45,69
103	67,29	99,82	60,26	59,49	128,78	45,57
104	100,08	100,01	100,80	59,48	128,72	54,17
105	100,08	99,88	100,80	59,00	128,57	54,21
106	100,08	100,01	100,80	59,73	128,79	54,29
107	100,08	100,02	100,80	60,58	128,88	70,74
108	100,08	99,94	100,80	62,74	129,47	69,79
109	100,08	100,02	100,80	61,98	129,22	73,34
110	100,08	100,02	100,80	61,80	129,17	73,02
111	105,16	148,61	84,17	94,30	145,71	74,59
112	104,72	148,50	83,85	93,78	145,57	74,19
113	105,32	148,35	84,25	94,50	145,77	74,74
114	134,79	158,66	108,86	94,76	145,84	76,48
115	101,21	156,59	106,60	80,38	141,82	66,79
116	101,21	106,42	110,99	94,96	145,89	76,62
117	101,21	105,72	104,91	97,04	146,46	85,03
118	101,21	106,33	104,91	98,54	146,86	86,88
119	101,21	106,34	104,91	100,34	147,34	88,54

Tablo 4.17’de ayrı ayrı verilmekte olan ortalama tane boyutları Tablo 4.18 ile genel olarak verilmektedir. Tablo 4.17 ile verilmekte olan tane boyutları daha öncede tartışıldığı gibi oda sıcaklığındaki tane boyutunu tahmin etmede kullanılabilir. Bu amaçla Tablo 4.17’den daha fazla algılama kolaylığı sağlayabilecek olan Tablo 4.18 oluşturulmuştur.

Tablo 4.18: Uygulanan Modellerin Sonuçlarına Göre Oda Sıcaklığındaki Tane Boyutu Tahmini İçin Tane Boyutu Derecelendirilmesi ve Sertlik Değerleri İncelemesi Sonucu İçyapı Derecelendirilmesi İle Karşılaştırılması. ([x] Sertlik Dereceleri.)

ϵ	ϵ_{yerel} ORTALAMA		SICAKLIK (°C)	TANE BOYUTU DERECELERİ		
				HODGSON MODELİ	SELLARS MODELİ	SENUMA MODELİ
-0,22	$\epsilon_{\text{üst}}$	-0,03	800 °C	9 [1]	7 [1]	9 [1]
	ϵ_{merkez}	-0,03		9 [7]	7 [7]	9 [7]
-0,51	$\epsilon_{\text{üst}}$	-0,07		9 [1]	7 [1]	9 [1]
	ϵ_{merkez}	-0,07		2 [6]	5 [6]	9 [6]
-0,92	$\epsilon_{\text{üst}}$	-0,62		2 [2]	5 [2]	9 [2]
	ϵ_{merkez}	-0,62		2 [5]	5 [5]	4 [5]
-0,22	$\epsilon_{\text{üst}}$	-0,02	900 °C	9 [8]	7 [8]	9 [8]
	ϵ_{merkez}	-0,02		3 [7]	8 [7]	9 [7]
-0,51	$\epsilon_{\text{üst}}$	-0,06		9 [5]	7 [5]	9 [5]
	ϵ_{merkez}	-0,06		3 [6]	8 [6]	4 [6]
-0,92	$\epsilon_{\text{üst}}$	-0,62		3 [5]	7 [5]	5 [5]
	ϵ_{merkez}	-0,62		3 [7]	8 [7]	3 [7]
-0,22	$\epsilon_{\text{üst}}$	-0,03	1000 °C	9 [7]	7 [7]	9 [7]
	ϵ_{merkez}	-0,03		6 [8]	9 [8]	7 [8]
-0,51	$\epsilon_{\text{üst}}$	-0,06		9 [9]	7 [9]	9 [9]
	ϵ_{merkez}	-0,06		5 [8]	9 [8]	5 [8]
-0,92	$\epsilon_{\text{üst}}$	-0,58		6 [10]	8 [10]	6 [10]
	ϵ_{merkez}	-0,58		5 [10]	9 [10]	4 [10]
-0,22	$\epsilon_{\text{üst}}$	-0,03	1100 °C	9 [8]	7 [8]	10 [8]
	ϵ_{merkez}	-0,03		9 [7]	10 [7]	8 [7]
-0,51	$\epsilon_{\text{üst}}$	-0,08		10 [9]	10 [9]	10 [9]
	ϵ_{merkez}	-0,08		8 [9]	10 [9]	7 [9]
-0,92	$\epsilon_{\text{üst}}$	-0,65		9 [10]	10 [10]	8 [10]
	ϵ_{merkez}	-0,65		8 [10]	10 [10]	7 [10]

Sayfa 6’da verilen denklem (2.4)’deki Hall-Petch eşitliğine göre malzemenin dayanımı (sertliği) tane boyutunun karekökü ile ters orantılıdır. Bu nedenle Tablo 4.18’de Tablo 4.16’daki uygulamaya benzer biçimde bu sefer tane boyutları için en iri taneli yapı 10, en ince taneli yapı ise 1 alınarak oda sıcaklığı tane boyutu tahmini derecelendirilmesi verileri oluşturulmuştur. Tablo 4.16’da verilen sertlik değerleri derecelendirilmesi kıyaslanma amacıyla, Tablo 4.18 içerisinde köşeli parantez içerisinde belirtilmiştir.

Sertlik derecelendirmesine ve tane boyutu derecelendirmesine ait değerler incelendiğinde en büyük yakınlık Sellars modelinde elde edilmektedir. Buna karşın Hodgson ve Senuma modellerinin sonuçları ise birbirine yakın ama Sellars modelinden daha uzak sonuçlar vermektedir.

Sayıları arasındaki farkların mutlak değerlerinin toplamı alındığında bu değerler Hodgson için 68, Sellars için 39 ve Senuma için ise 69 olarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplanmalar ışığında deneysel inceleme beklentilerine en yakın sonuçları Sellars modelinin tahmin ettiği sonucuna ulaşılmıştır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada sıcak yığma işleminin etkilerinin incelenmesi amacıyla sıcak şekillendirme koşullarındaki mikro yapı oluşumu araştırılmıştır. Araştırmalarda sıcaklık ve şekil değişimi etkisi ile malzeme yapısında oluşan mekanizmalar, oluşumları ve türleri irdelenerek literatürde sunulan örnekler dahilinde açıklanmaya çalışılmıştır. Elde edilen bilgiler ışığında yeniden kristalleşme ve tane büyümesi ve malzeme yapısına ait geliştirilmiş ve kabul gören matematiksel yaklaşımlar irdelenerek çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen eşitlikler ve modeller verilmiştir. Modeller deneysel sıcak yığma koşullarına ve verilerine uygulanarak bir karşılaştırma yapılmıştır.

Sıcak yığma işleminin uygulandığı deneysel çalışmada 1040 çeliği 800 °C, 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda; $\epsilon = -0,22$, $\epsilon = -0,51$ ve $\epsilon = -0,92$ şekil değişimi değerlerinde sıcak yığma işlemine maruz tutulmuştur. Yığılan numunelerin yığma işlemine paralel kesiti üzerinden sertlik değerleri ve mikro yapı farklılıkları incelenmiştir. Sertlik değerlerinin incelenmesinde numune kesim yüzeyi üzerinde 4 farklı karakteristik bölge tanımlanarak sertlik ölçümlerine numunenin fiçılama etkisinin ayrılması amaçlanmıştır.

Deneysel veriler ile sertlik ölçümleri sonucu elde edilen veriler yardımı ile literatürde sunulan içyapı modellerinden bazıları (Hodgson, Sellars ve Senuma) kullanılarak ortalama tane boyutu gelişimi modellenmiştir. Modellerden elde edilen sonuçlar kalitatif karşılaştırma amacı ile kullanılarak deney sonuçları ile olan uyumu değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçların uygulandığı bu modeller arasından Sellars modelinin deney sonuçlarına daha uygun tahminler geliştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Uygulanan diğer iki model içerisinde Senuma modeli sonuçları ile Hodgson modeli sonuçları benzer yakınlığa sahip olmaktadır.

KAYNAKLAR

- Akata, H.E., 1987.** Çeliğin dövülmesinde malzeme akışına etkiyen faktörlerin incelenmesi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aaronson, H.I. and others, 1992.** *Metallography and Microstructures*, ASM International, USA.
- Adams, B.L. and others, 1992.** *Materials Characterization*, ASM International, USA.
- Altan, T. and others, 1992.** *Forming and Forging*, ASM International, USA.
- Avrami M., 1939.** Kinetics of Phase Change (I) - General Theory, *Journal of Chemical Physics*, pp.1103 -1113.
- Avrami, M., 1940.** Kinetics of Phase Change (II) -Transformation-Time Relations for Random Distribution of Nuclei, *Journal of Chemical Physics*, **8**, 212-224.
- Backofen, W., 1972.** *Deformation Processing*, Addison-Wesley Publishing, Massachusetts.
- Beladi, H. and Hodgson, P.D., 2007.** Effect of carbon content on the recrystallization kinetics of NB steels , *Journal of Materials Processing Technology*, **125-126**, 678-688.
- Bianchi, J.H. and Karjalainen, L.P., 2005.** Modelling of Dynamic and Metadynamic Recrystallization during Bar Rolling of A Medium Carbon Spring Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, **160**, 267-277.
- Dieter, G.E., 1988.** *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, Singapore.
- Gekonde, H.O., 1998.** Influence of dynamic behaviour of materials on machinability, *PhD Thesis*, McMaster University, Ontario, Canada.
- Glowacki, M., 2005.** The Mathematical Modelling of Thermo-mechanical processing of Steel during Multi-pass Shape Rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, **168**, 336-343.

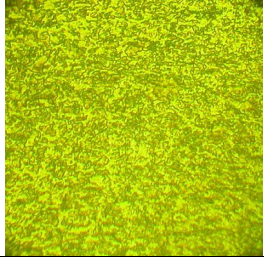
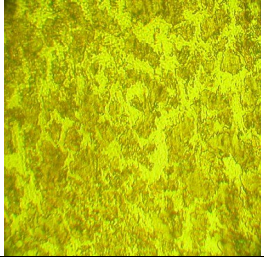
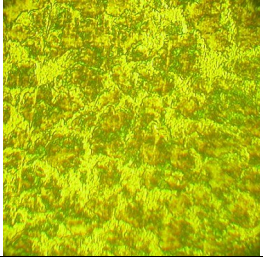
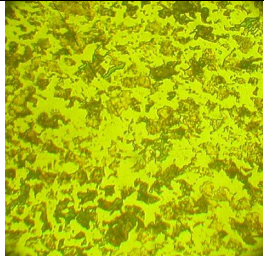
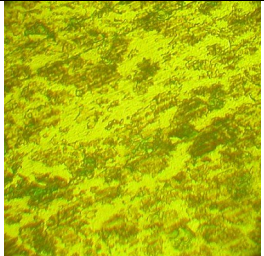
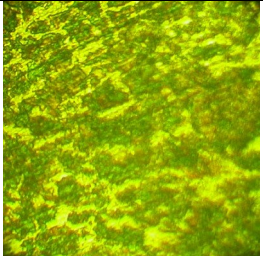
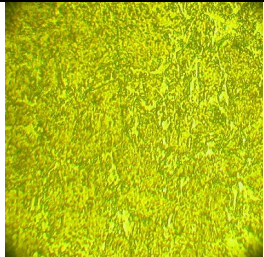
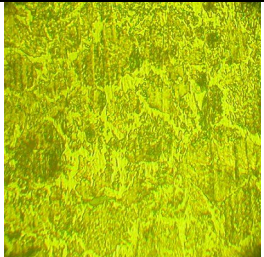
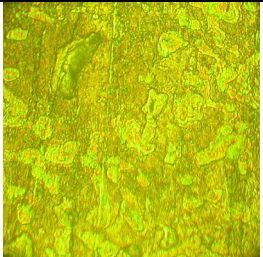
- Grass, H., Krempaszky, C., Reip, T. and Werner, E., 2003.** 3-D Simulation of Hot Forming and Microstructure Evolution, *Computational Materials Science*, **28**, 469-477
- Hansen, S.S., Vander Sander, J.B. and Cohen, M., 1980.** Niobium Carbonitride Precipitation and Austenite Recrystallization in Hot-Rolled Microalloyed Steels, *Metallurgical Transactions*, **11 A**, 387-402.
- Hill, R., 1967.** *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford at the Clarendon Pres, UK.
- Hodgson, P.D. and Gibbs, R.K., 1992.** A Mathematical Model to Predict the Mechanical Properties of Hot Rolled C-Mn and Microalloyed Steels, *ISU International*, **41**, 32-34.
- Hodgson, P.D., Lee, W., 2006.** Numerical investigation of austenite grain size distribution in hot bar rolling , *Journal of Materials Processing Technology*, **191**, 114-118.
- Humphreys, F.J., 1992.** Modelling Mechanisms and Microstructures of Recrystallization, *Materials Science and Technology*, **8**, 135-143.
- Humphreys, F.J. and Hatherly, M., 1995.** *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, Oxford Press, OX, UK.
- Johnson, G.R. and Cook, W.H., 1983.** Johnson-Cook model; in: Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistic, The Hague, The Netherlands, p. 541.
- Johnson W.A. and Mehl R.F., 1939.** Reaction Kinetics in Processes of Nucleation and Growth, *Transactions AIME*, **135**, 416-458.
- Karadeniz, E., 1997.** Çeliklerde dövülebilirliğinin burma, basma ve çekme deneyleri ile incelenmesi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kaspar, P. and Mahmoud, N., 1991.** Austenite Grain Growth during Hot Forging of Medium Carbon Engineering Steels with or without V-Ti Microalloying, *Materials Science and Technology*, **7**, 249-254.
- Kobayashi, S., 1970.** Deformation Characteristics and Ductile Fracture of 1040 steel in Simple Upsetting of Solid Cylinders and Rings, *Journal of Engineering for Industry*, May, 183-189.
- Kurtz, S.K., 1980.** Microstructure and Normal Grain Growth in Metals and Ceramics, *Journal of Applied Physics*, **51**, 5725-5754.

- Kwon, O., 1992.** A Technology for the Prediction and Control of Microstructural Changes and Mechanical Properties in Steel, *ISU International*, **32**, 350-358.
- Lange, K., 1985.** *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill, USA.
- Lee, Y., 2004.** Rod and Bar Rolling, New York Publishing.
- Lee, Y. and Hodgson, P.D., 2001.** Integrated model for thermo mechanical controlled process in bar rolling , *Journal of Materials Processing Technology*, **125-126**, 678-688.
- Lee, H.W., Hodgson, P.D., 2006.** Numerical investigation of austenite grain size distribution in square diamond pass hot bar rolling , *Journal of Materials Processing Technology*, **191**, 114-118 .
- Liu, T., 2001.** Modelling microstructural evolution of microalloyed forging steels during thermomechanical processing, *PhD Thesis*, Queen's University, Ontario, Canada.
- Löhe, D. and Haubelt, J., 2005.** *Microengineering of metals and ceramics*, Wiley-VCH, Weinheim.
- Medina, S.F., Mancilla, C.E. and Hernandez, C.A., 1994.** Static Recrystallization of Hot Deformed Austenite and Induced Precipitation Kinetics in Vanadium Microalloyed Steels, *ISU International*, **34**, 689-696.
- Misaka and Yoshimoto, 1967.** *J. Japan Soc. Technol. Plast.*, **8**, 414.
- Park, S.H., Jonas, J.J., 1992.** *Mathematical Modelling of Hot Rolling of Steel*, The Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Montreal, Canada.
- Petch, N.J., 1953.** The Hall – Petch Relationship, *Journal of Iron and Steel Institute*, May, 25-28.
- Phaniraj, M.P., Behera, B.B., Lahiri, A.K., 2005.** Thermo-mechanical Modelling of Two Phase Rolling and Microstructure Evolution in The Hot Strip Mill Part I. Prediction of Rolling Loads and Finish Rolling temperature, *Journal of Materials Processing Technology*, **170**, 323-335.
- Pokorny, A.J., 1967.** *De Ferri Metalographia Volume 1-2-3*, Berger-Levrault, Paris, Nancy.
- Raabe, D., 1998.** Computational materials science : the simulation of materials microstructures and properties, Wiley-VCH, Weinheim.

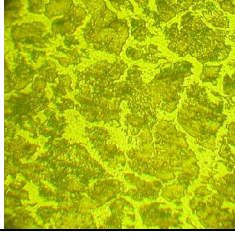
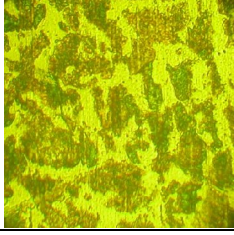
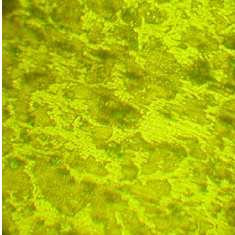
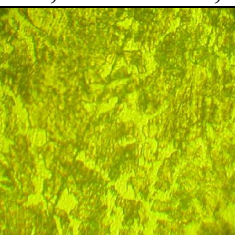
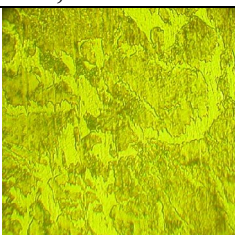
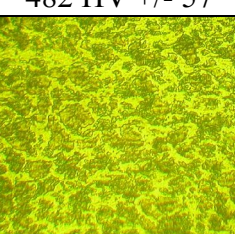
- Saito, Y., 1997.** Modelling of Microstructural Evolution in Thermomechanical Processing of Structural Steels, *Materials Science and Engineering*, **A223**, 134-145.
- Sellars, C.M. and Whiteman, J.A., 1979.** Recrystallization and Grain Growth in Hot Rolling, *Journal of Metal Science*, **13**, 187-194.
- Senuma, T. and Yada, H., 1986.** Microstructural Evolution of Plain Carbon Steels, Annealing Processes-Recovery, Recrystallization and Grain Growth , *7th Riso Int. Symp. On Metallurgy and Materials Science*, Riso, Roskilde, Denmark, p. 547-552.
- Siamak, S., 2006.** A study on kinetics of static and metadynamic recrystallization during hot rolling , *Materials Science and Engineering: A*, **448**, 146-153 .
- Sinczak, J., Majta, J., Glowacki, M. and Pietrzyk, M., 1998.** Prediction of Mechanical Properties of Heavy Forgings, *Journal of Materials Processing Technology*, **80-81**, 166-173.
- Sheppard, T. and Duan, X., 2002.** Modelling of Static Recrystallization by Combining FEM with Empirical Models, *Journal of Materials Processing Technology*, **130-131**, 250-253.
- Sherif, D.E.W., 1989.** *Processes and Design Manufacturing*, Prentice-Hall Inc.
- Shida, T., 1969.** The Journal of Physical Chemistry J. Phys. Chem. 0022-3654 American Chemical Society
- Totten, G.E. and Xie, L. and Funatani, K., 2004.** *Handbook of Mechanical Alloy Design*, M. Dekker, New York.
- Wang, Z., Ishikawa, T., Yukawa, N., Kono, A. and Tozowa, Y., 1999.** Computer Simulation and Control of Microsturcture and Mechanical Properties in Hot Forging, *Annals of the CIRP*, **48**, 187-190.
- Yoshie, A., Fujioka, M., Watanabe, Y., Nishioka, K. and Morikawa, H., 1992.** Modelling of Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Steel Plates Produced by Thermo-Mechanical Control Process, *ISU International*, **32**, 395-404.

Yoshie, A., Morikawa, H., Onoe, Y. and Itoh, K., 1987. Formulation of Static Recrystallization of Austenite in Hot Rolling Process of Steel Plate, *Transactions ISU*, **27**, 425-431.

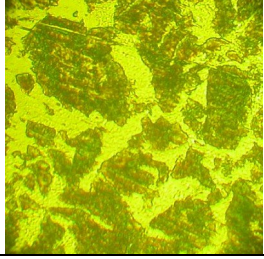
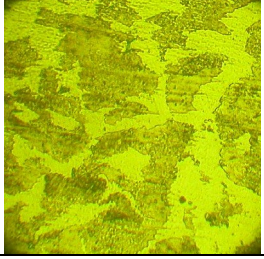
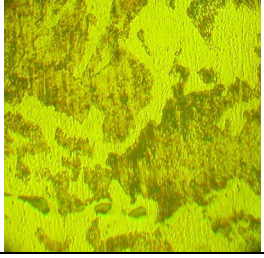
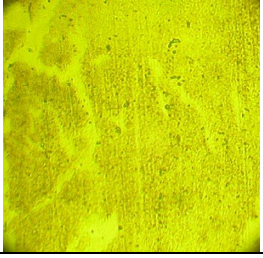
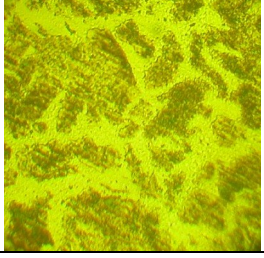
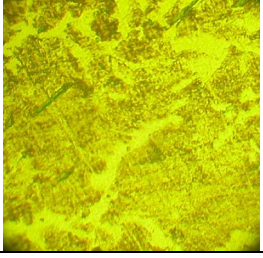
A. Mikroyapı Görüntüleri Karşılaştırması

$\varepsilon = -0,22$	$\varepsilon = -0,51$	$\varepsilon = -0,92$
		
800 °C HIZ: -0,14 ε_{yerel} : -1,02 O NOKTASI 453 HV +/- 11	800 °C HIZ: -0,12 ε_{yerel} : -0,65 O NOKTASI 452 HV +/- 14	800 °C HIZ: -0,13 ε_{yerel} : -0,33 O NOKTASI 418,5 HV +/- 5,5
		
800 °C HIZ: -0,08 ε_{yerel} : -0,62 B NOKTASI 450 HV +/- 21	800 °C HIZ: -0,01 ε_{yerel} : -0,07 B NOKTASI 483,25 HV +/- 63	800 °C HIZ: -0,01 ε_{yerel} : -0,03 B NOKTASI 486,5 HV +/- 24,5
		
800 °C HIZ: -0,08 ε_{yerel} : -0,62 C NOKTASI 511 HV +/- 34	800 °C HIZ: -0,01 ε_{yerel} : -0,07 C NOKTASI 488 HV +/- 18	800 °C HIZ: -0,01 ε_{yerel} : -0,03 C NOKTASI 482 HV +/- 27

Şekil A.1 800 °C Numunelerinin Mikro Yapı Görüntüleri, Sertlik, Şekil Değişimi ve Şekil Değişimi Hızlarının Karşılaştırılması.

$\epsilon = -0,22$	$\epsilon = -0,51$	$\epsilon = -0,92$
		
900 °C HIZ: -0,15 ϵ_{yerel} : -0,63 A NOKTASI 432 HV +/- 22	900 °C HIZ: -0,15 ϵ_{yerel} : -0,70 A NOKTASI 423 HV +/- 6	900 °C HIZ: -0,13 ϵ_{yerel} : -0,35 A NOKTASI 432 HV +/- 16
		
900 °C HIZ: -0,09 ϵ_{yerel} : -0,63 B NOKTASI 414,5 HV +/- 18,5	900 °C HIZ: -0,01 ϵ_{yerel} : -0,06 B NOKTASI 449,25 HV +/- 10	900 °C HIZ: -0,01 ϵ_{yerel} : -0,03 B NOKTASI 415 HV +/- 16
		
900 °C HIZ: -0,09 ϵ_{yerel} : -0,63 C NOKTASI 482 HV +/- 57	900 °C HIZ: -0,01 ϵ_{yerel} : -0,06 C NOKTASI 473 HV +/- 43	900 °C HIZ: -0,02 ϵ_{yerel} : -0,03 C NOKTASI 440 HV +/- 43
		
900 °C HIZ: -0,14 ϵ_{yerel} : -1,04 O NOKTASI 438 HV +/- 13	900 °C HIZ: -0,15 ϵ_{yerel} : -0,70 O NOKTASI 448,5 HV +/- 7,5	900 °C HIZ: -0,14 ϵ_{yerel} : -0,35 O NOKTASI 441 HV +/- 1

Şekil A.2 900 °C Numunelerinin Mikro Yapı Görüntüleri, Sertlik, Şekil Değişimi ve Şekil Değişimi Hızlarının Karşılaştırılması.

$\epsilon = -0,22$	$\epsilon = -0,51$	$\epsilon = -0,92$
		
1000 °C HIZ: -0,15 ϵ_{yerel} : -1,03 A NOKTASI 390 HV +/- 10	1000 °C HIZ: -0,15 ϵ_{yerel} : -0,66 A NOKTASI 412 HV +/- 7	1000 °C HIZ: -0,13 ϵ_{yerel} : -0,35 A NOKTASI 405 HV +/- 12
		
1000 °C HIZ: -0,09 ϵ_{yerel} : -0,59 C NOKTASI 395 HV +/- 29	1000 °C HIZ: -0,01 ϵ_{yerel} : -0,66 C NOKTASI 422 HV +/- 9	1000 °C HIZ: -0,004 ϵ_{yerel} : -0,03 C NOKTASI 434 HV +/- 20
		
1000 °C HIZ: -0,08 ϵ_{yerel} : -1,03 B NOKTASI 386,5 HV +/- 3	1000 °C HIZ: -0,01 ϵ_{yerel} : -0,66 B NOKTASI 407,25 HV +/- 14	1000 °C HIZ: -0,01 ϵ_{yerel} : -0,03 B NOKTASI 433,5 HV +/- 18,5

Şekil A.3 1000 °C Numunelerinin Mikro Yapı Görüntüleri, Sertlik, Şekil Değişimi ve Şekil Değişimi Hızlarının Karşılaştırılması.

$\epsilon = -0,22$	$\epsilon = -0,51$	$\epsilon = -0,92$
1100 °C HIZ: -0,16 ϵ_{yerel} : -1,04 A NOKTASI 407 HV +/- 16	1100 °C HIZ: -0,32 ϵ_{yerel} : -0,68 A NOKTASI 406 HV +/- 45	1100 °C HIZ: -0,14 ϵ_{yerel} : -0,35 A NOKTASI 410 HV +/- 21
1100 °C HIZ: -0,10 ϵ_{yerel} : -0,65 C NOKTASI 425 HV +/- 36	1100 °C HIZ: -0,02 ϵ_{yerel} : -0,08 C NOKTASI 428 HV +/- 27	1100 °C HIZ: -0,004 ϵ_{yerel} : -0,03 C NOKTASI 426 HV +/- 2
1100 °C HIZ: -0,10 ϵ_{yerel} : -0,65 B NOKTASI 389 HV +/- 20	1100 °C HIZ: -0,02 ϵ_{yerel} : -0,08 B NOKTASI 403 HV +/- 14	1100 °C HIZ: -0,01 ϵ_{yerel} : -0,03 B NOKTASI 418 HV +/- 37
1100 °C HIZ: -0,16 ϵ_{yerel} : -1,04 O NOKTASI 390,5 HV +/- 5,5	1100 °C HIZ: -0,14 ϵ_{yerel} : -0,68 O NOKTASI 395,5 HV +/- 19,5	1100 °C HIZ: -0,13 ϵ_{yerel} : -0,35 O NOKTASI 426,5 HV +/- 10,5

Şekil A.4 1100 °C Numunelerinin Mikro Yapı Görüntüleri, Sertlik, Şekil Değişimi ve Şekil Değişimi Hızlarının Karşılaştırılması.

ÖZGEÇMİŞ

Ozan Serhat YÜCE, 31.01.1981’de Sivas / Divriği’de doğdu. Lise öğrenimini İstanbul’da Kartal Anadolu Lisesi’nde 1999 yılında tamamladı. Lisans eğitimine Kocaeli Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliğinde başlayan Yüce, 2001 – 2002 güz dönemiyle aynı üniversitenin Makine Mühendisliği bölümüne yatay geçiş yaptı. 2004 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden lisans derecesini aldı. Ozan Serhat YÜCE halen İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme-İmalat programında yüksek lisans öğrencisidir.