

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SOĞUK ÇEKİLMİŞ C55 VE C83 ÇELİKLERİN MEKANİK  
ÖZELLİKLERİ VE YENİDEN KRİSTALLENME DAVRANIŞININ  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Amer RAOUGUI**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**HAZİRAN 2023**



**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SOĞUK ÇEKİLMİŞ C55 VE C83 ÇELİKLERİN MEKANİK  
ÖZELLİKLERİ VE YENİDEN KRİSTALLENME DAVRANIŞININ  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Amer RAOUGUI**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof.Dr. Kenan YILDIZ**

**HAZİRAN 2023**



Amer Raougui tarafından hazırlanan “Soğuk Çekilmiş C55 ve C83 Çeliklerin Mekanik Özellikleri ve Yeniden Kristallenme Davranışının İncelenmesi” adlı tez çalışması 16.06.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

### Tez Jürisi

**Jüri Başkanı :**      **Prof.Dr. Kenan YILDIZ** (Danışman) .....  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :**      **Prof.Dr. Ahmet ÖZEL** .....  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :**      **Prof.Dr. Uğur ÖZSARAÇ** .....  
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “SOĞUK ÇEKİLMİŞ C55 VE C83 ÇELİKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE YENİDEN KRİSTALLENME HAVRANIŞININ İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim. (16/06/2023).

(imza)

Amer RAOUGUI





*Babam Mohamed Raougui ve annem Khadija Lachheb'e*



## **TEŞEKKÜR**

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübeleriyle, tezin araştırılması-planlanması ve yazılma konusunda beni yönlendiren her türlü desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Prof.Dr. Kenan YILDIZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında hoşgörü ve anlayışla yardımlarını esirgemeyen Prof.Dr. Fatih ÜSTEL'e, Prof.Dr. Mediha İPEK'e, Doç.Dr. Tuba YENER'e, Arş.Gör. Mustafa DURMAZ'a, Arş.Gör. Erhan DURU'ya, Bartın Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarında görevli Dr. Volkan Murat YILMAZ'a, kardeşlerim Atae ve Jaber RAOUGUI ile numunelerin temininde gösterdikleri katkılarından dolayı ÇELİK HALAT ve TEL SANAYİ A.Ő. firmasına çok teşekkür ederim.

Amer RAOUGUI



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....	v
TEŞEKKÜR .....	ix
İÇİNDEKİLER .....	xi
KISALTMALAR .....	xiii
SİMGELER .....	xv
TABLO LİSTESİ .....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ .....	xix
ÖZET .....	xxi
SUMMARY .....	xxv
<b>1. GİRİŞ ...</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>3</b>
2.1. Çelik .....	3
2.1.1. Çeliklerin sınıflandırılması .....	4
2.1.2. Çelik standartları .....	8
2.2. Plastik Şekil Verme İşlemleri.....	14
2.2.1. Haddelene ile şekillendirme.....	14
2.2.2. Ekstrüzyon ile şekillendirme.....	16
2.2.3. Dövme ile şekillendirme .....	18
2.2.4. Tel çekme ile şekillendirme .....	22
2.3. Yeniden Kristallenme ve Kinetik İncelemeler .....	24
<b>3. MALZEME VE YÖNTEM .....</b>	<b>29</b>
3.1. Malzeme .....	29
3.2. Yöntem .....	29
3.2.1. Metalografi çalışmaları .....	29
3.2.3. Termal analiz ile yeniden kristallenme kinetiği .....	31
3.3. Kullanılan Cihazlar .....	32
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>35</b>
4.1. Metalografik Çalışmalar.....	35
4.2. Soğuk Çekmenin Mekanik Özelliklere Etkisi .....	39
4.3. Yeniden Kristallenme Kinetiği.....	44
<b>5. SONUÇLAR .....</b>	<b>53</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>55</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>59</b>



## **KISALTMALAR**

<b>AFNOR</b>	: Fransız Standartları
<b>AISI</b>	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
<b>ASTM</b>	: Amerikan Malzeme Test Birliği Standartları
<b>BS</b>	: İngiliz Standartları
<b>CNS</b>	: Çin Standartları
<b>DIN</b>	: Alman Standartları
<b>EN</b>	: Avrupa Standartları
<b>DSC</b>	: Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi
<b>DTA</b>	: Diferansiyel Termal Analiz
<b>GOST</b>	: Rus Standartları
<b>HMK</b>	: Hacim Merkezli Kübik
<b>ISO</b>	: Uluslararası Standartlar Organizasyonu
<b>JIS</b>	: Japon Standartları
<b>SAE</b>	: Otomotiv Mühendisleri Standartları
<b>TG</b>	: Termogravimetri
<b>TSE</b>	: Türk Standartları Enstitüsü
<b>UNS</b>	: Birleştirilmiş Sayılama Sistemi
<b>YMK</b>	: Yüzey Merkezli Kübik





## SİMGELER

<b>A<sub>0</sub></b>	: Başlangıç kesit alanı [mm <sup>2</sup> ]
<b>A<sub>s</sub></b>	: Deformasyon sonrası kesit alanı [mm <sup>2</sup> ]
<b>β</b>	: Isıtma hızı [°C/dakika]
<b>d<sub>0</sub></b>	: Başlangıç çapı [mm]
<b>d<sub>s</sub></b>	: Deformasyon sonrası çap [mm]
<b>E<sub>a</sub></b>	: Aktivasyon enerjisi [kJ/mol]
<b>ε</b>	: Deformasyon miktarı
<b>R</b>	: Gaz sabiti [J/mol.K]
<b>T</b>	: Mutlak sıcaklık [K]
<b>T<sub>p</sub></b>	: Pik sıcaklığı [K]



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1.</b> Çelik türlerinin bazı mekanik özellikleri .	7
<b>Tablo 2.2.</b> Dünya çelik standartları	9
<b>Tablo 2.3.</b> SAE/AISI çelik numaralandırma sistemi	10
<b>Tablo 2.4.</b> SAE ve AISI çelik simgeleri	11
<b>Tablo 2.5.</b> DIN normuna göre karbon çelik standartları	12
<b>Tablo 2.6.</b> EN standartlarında kullanılan simgelerin anlamları	13
<b>Tablo 4.1.</b> C55 ve C83 çelik tellerde soğuk deformasyon sonrası çekme mukavemeti ve süneklik özelliklerdeki değişimler	43
<b>Tablo 4.2.</b> %121.2 oranında soğuk çekilmiş C55 çelik tel için kinetik veriler	44
<b>Tablo 4.3.</b> %121.2 oranında soğuk çekilmiş C55 çelik tel için yeniden kristallenme aktivasyon enerji değerleri	47
<b>Tablo 4.4.</b> %108.3 oranında soğuk çekilmiş C83 çelik tel için kinetik veriler	48
<b>Tablo 4.5.</b> %108.3 oranında soğuk çekilmiş C83 çelik tel için yeniden kristallenme aktivasyon enerji değerleri	50



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1. HMK ( $\alpha$ ) ve YMK ( $\gamma$ ) kristal yapıların atomik düzeni .....	3
Şekil 2.2. Yeralan (A) ve arayer (B) katı çözeltileri .....	4
Şekil 2.3. (a) Sade karbonlu, (b) alaşımlı, (c) paslanmaz ve (d) takım çeliği .....	6
Şekil 2.4. Haddeleme ile şekillendirme işlemi. ....	15
Şekil 2.5. Haddeleme ile elde edilen ürün türleri .....	15
Şekil 2.6. Direkt ekstrüzyon işlemi .....	16
Şekil 2.7. (a) Direkt ekstrüzyon, (b) kapalı kutu ve (c) açık profil ürün .....	17
Şekil 2.8. Endirekt ekstrüzyonla (a) katı dolu kesit ve (b) içi boş kesit üretimi .....	17
Şekil 2.9. (a) Açık kalıpta, (b) kapalı kalıpta ve (c) çapaksız dövme işlemleri .....	18
Şekil 2.10. Açık kalıpta (a) iç bükey, (b) dış bükey ve (c) uzatma işlemleri .....	19
Şekil 2.11. Kapalı kalıpta (1) iş parçasına basmadan önce, (2) kısmi basma işlemi ve (3) çapak oluşumuyla kalıpların kapanması .....	19
Şekil 2.12. Kalıpta (1) iş parçasına basmadan önce, (2) kısmi basma işlemi ve (3) çapak oluşumu olmadan zımbalama işlemi .....	20
Şekil 2.13. Damgalama işlemi (1) basma öncesi, (2) damgalama işlemi ve (3) bitmiş nihai ürün .....	20
Şekil 2.14. Yığıma işlemi (1) iş parçası kalıba sürülür, (2) ve (3) tekrarlı zımbalama işlemi, (4) kafa şeklinin verilmesi .....	21
Şekil 2.15. Yığıma işlemi (1) iş parçası kalıba sürülür, (2) ve (3) tekrarlı zımbalama işlemi, (4) kafa şeklinin verilmesi .....	21
Şekil 2.16. Çubuk veya tel çekme işlemi .....	22
Şekil 2.17. Çekme öncesi çelik tel kangalları .....	23
Şekil 2.18. Boru çekme işlemleri .....	23
Şekil 2.19. Tel çekme makinesi .....	24
Şekil 2.20. Saf bakırda depolanmış enerji – uzama ilişkisi .....	25
Şekil 2.21. Yeniden kristallenme kademelerindeki değişimler .....	26
Şekil 2.22. Bakırda başlangıç tane boyutu ve sürenin yeniden kristallenme oranına etkisi .....	26
Şekil 2.23. Deformasyon miktarının alüminyumda yeniden kristallenme oranı ve süresine etkisi .....	27
Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan C55 çelik tel numuneler.....	30
Şekil 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan C83 çelik tel numuneler.....	30
Şekil 3.3. Nikon ECLIPSE L150 optik mikroskopu.....	32
Şekil 3.4. INSTRON marka çekme cihazı. ....	33
Şekil 3.5. HITACHI STA 7300 marka termal analiz cihazı. ....	33
Şekil 4.1. C55 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X50).....	35
Şekil 4.2. C55 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X100).....	36
Şekil 4.3. Soğuk çekilmiş C55 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X500).....	36
Şekil 4.4. Soğuk çekilmiş C55 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X1000).....	37
Şekil 4.5. C83 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X500).....	37
Şekil 4.6. C83 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X1000).....	38

Şekil 4.7. Soğuk çekilmiş C83 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X1000). .....	38
Şekil 4.8. Soğuk çekilmiş C83 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X1000). .....	39
Şekil 4.9. C55 çelik telin gerilme - genleme diyagramı.....	40
Şekil 4.10. %121.2 oranında soğuk çekilmiş C55 çelik telin gerilme - genleme diyagramı.....	40
Şekil 4.11. Başlangıç ve soğuk çekilmiş C55 çelik tellerin gerilme - genleme diyagramı.....	41
Şekil 4.12. C83 çelik telin gerilme - genleme diyagramı.....	41
Şekil 4.13. %108.3 oranında soğuk çekilmiş C83 çelik telin gerilme - genleme diyagramı.....	42
Şekil 4.14. Başlangıç ve soğuk çekilmiş C83 çelik telin gerilme - genleme diyagramı. ....	42
Şekil 4.15. %121.2 oranında soğuk deformasyon sonrası C55 çelik telin DSC analizleri. ....	44
Şekil 4.16. %121.2 oranında soğuk çekilmiş C55 çelik tel için Kissenger grafiği....	45
Şekil 4.17. %121.2 oranında soğuk çekilmiş C55 çelik tel için Boswell grafiği.....	45
Şekil 4.18. %121.2 oranında soğuk çekilmiş C55 çelik tel için Ozawa grafiği.....	46
Şekil 4.19. %121.2 oranında soğuk çekilmiş C55 çelik tel için Starink grafiği. ....	46
Şekil 4.20. %108.3 oranında soğuk deformasyon sonrası C83 çelik telin DSC analizleri. ....	47
Şekil 4.21. %108.3 oranında soğuk çekilmiş C83 çelik tel için Kissenger grafiği....	48
Şekil 4.22. %108.3 oranında soğuk çekilmiş C83 çelik tel için Boswell grafiği.....	49
Şekil 4.23. %108.3 oranında soğuk çekilmiş C83 çelik tel için Ozawa grafiği.....	49
Şekil 4.24. %108.3 oranında soğuk çekilmiş C83 çelik tel için Starink grafiği. ....	50

## SOĞUK ÇEKİLMİŞ C55 VE C83 ÇELİKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE YENİDEN KRİSTALLENME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

### ÖZET

Bu tez çalışmasında, C55 ve C83 çelik tellerin soğuk çekme işleminin tellerin mekanik özelliklerine ve yeniden kristallenme kinetiğine etkileri incelenmiştir. Çelik numuneler İzmit-Kocaeli’nde bulunan ÇELİK HALAT ve TEL SANAYİ A.Ş.’den temin edilmiştir. Bu şirket çelik halatlar, yay telleri, galvanizli yay telleri ve öngerilmeli beton halatları üretmektedir.

Plastik şekil verme yöntemlerinden biri soğuk çekmedir ve bir çekme kuvveti altında, tek ya da bir seri çekme kalıpları içerisinde malzemenin kesidini azaltmak için kullanılmaktadır. Soğuk çekme işlemi elektrik tellerinin, kabloların, yayların, kağıt mandallarının, gerilim yüklü yapı bileşenlerinin ve yaylı müzik aletlerinin eldesinde kullanılmaktadır.

C55 çeliği orta karbonlu bir çeliktir ve %0.52 – 0.60 karbon içermektedir. Ayrıca %0.06 – 0.90 Mn, maks. %0.045 P, maks. %0.045 S, maks. %0.4 Si ve maks. %0.63 Cr+Mo+Ni içermektedir. C55 çeliği nispeten yüksek karbon içeriği nedeniyle yüksek sertlik ve yüksek mukavemete sahiptir. C55 çeliği dingil, debriyaj parçaları, şaft, sıkıştırılmış ve delikli parçalar, piston çubukları ve dişli çubuğu gibi otomotiv ve mühendislik malzemeleri için uygundur. C83 çeliği yüksek karbonlu çelik olup %0.30 – 0.90 aralığında mangan içermektedir. Bu çelik yay malzemeleri ve yüksek mukavemetli teller için kullanılmaktadır.

C55 çelik telin deneysel çalışmalarında 5 mm’lik çap 3 mm’ye getirilmiştir. Soğuk deformasyon miktarı %121.2 olarak hesaplanmıştır. C83 çelik telin deneysel çalışmalarında 5 mm’lik çap 3.2 mm’ye getirilmiştir ve soğuk deformasyon miktarı %108.3 olarak tespit edilmiştir. C55 ve C83 çelik telin soğuk çekme işlemleri Çelik Halat firmasında gerçekleştirilmiştir.

C55 ve C83 çelik tellerin soğuk çekme işlemleri sonrasında yapılan metalografik incelemelerde, tane yapısının çekme eksenine yönünde uzadığı gözlenmiştir. Çatlak oluşumu bulunmamıştır.

C55 ve C83 çelik tellerin çekme test sonuçları incelendiği zaman, C55 çelik telin çekme mukavemeti 859.2 MPa iken, bu değer %121.2 oranında soğuk deformasyon sonrasında 1358.2 MPa değerine artmıştır. C55 çelik telin sünekliği %121.2 oranında deformasyon için %65.8’den %24.7’e düşmüştür. C83 çelik telin çekme mukavemeti 1216.7 MPa iken, bu değer %108.3 oranında soğuk deformasyon sonrasında 1717.5 MPa değerine artmıştır. C83 çelik telin sünekliği %108.3 oranında deformasyon için %32.4’den %16.8’e düşmüştür. Çeliğin mukavemeti ve sünekliği karbon içeriğine bağlı olduğu bilindiğine göre, C83 çelik telin mukavemetinin C55 çelik telin mukavemetinden daha büyük olduğu ve sünekliğinin daha düşük olduğu gözlenmiştir. C55 ve C83 çelik tellerin soğuk deformasyonla mukavemetindeki artış ve sünekliğindeki azalma, soğuk deformasyon esnasında dislokasyon yoğunluğundaki artış nedeniyledir.

Malzemenin şekli, mikroyapısı ve mekanik özellikleri soğuk çekme esnasında değişmektedir. Dislokasyon artışına bağlı olarak mukavemet ve sertlik artar, süneklik azalır. Malzemenin şekil verilebilirliği azalır. Malzemeye yeniden işlenebilirlik özelliğini vermek için yeniden kristallenme ısıl işlemi yapılmalıdır. Bu ısıl işlem, bir tavlama işlemidir ve soğuk işlenmiş metal ve alaşımlara, yeni ve gerilim içermeyen taneler elde etmek için uygulanmaktadır. Çünkü metalik malzemelerin hücre yapıları soğuk deformasyondan sonra termodinamik olarak kararlı değildir. Yeniden kristallenme ısıl işlemi tanelerdeki gerilimleri azaltarak ya da gidererek geri kazanımı sağlar ve uzamış tanelerden kaynaklanan eşeksensiz ferrit tanelerini artırır, mukavemet ve sertliği düşürür, sünekliği artırır. Yeniden kristallenme ısıl işleminde geri kazanım, yeniden kristallenme ve tane büyümesi kademeleri vardır ve metalin ergime sıcaklığının %30 -60 sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Yeniden kristallenme sıcaklığı başlangıç tane boyutundan, kompozisyonundan, zamandan ve soğuk deformasyon derecesinden etkilenmektedir.

Soğuk deforme olmuş metallerde yeniden kristallenme için itici güç, soğuk deformasyon esnasında oluşan depolanmış enerjidir. Geri kazanım kademesi düşük sıcaklıklarda gerçekleşir ve mikroyapıda herhangi bir değişim olmaz. Bu kademedeki dislokasyonlar hareket eder ve yeniden düzene girerler, kalıntı gerilimler azalır. Yeniden kristallenme kademesi yapıdaki dislokasyonların poligonlaşması ve ortadan kaybolması işlemidir. Bu kademedeki dislokasyon yoğunluğu azalır, bu nedenle mukavemet azalır ve süneklik artar. Yeniden kristallenme ısıl işleminin son kademesinde, sıcaklık ve süreye bağlı olarak tane büyümesi gerçekleşmektedir.

İzotermal kinetik analiz, metallerin yeniden kristallenmesi gibi katı hal dönüşümlerinin kinetiğini araştırmak için kullanılmaktadır ve endüstriyel skalada proses modellemesi için gerekli kinetik bilgiler elde edilmektedir. Bu analiz, zamanla reaksiyon hızını değerlendirmek için kinetik fonksiyonlara ihtiyaç duymakta ve eksponensiyel faktör ve aktivasyon enerjisi gibi kinetik değişkenler elde edilebilir. İzotermal olmayan kinetik analiz, izokonversiyonel yöntemlere dayalı alternatif bir modeldir. İzotermal olmayan kinetik, diferansiyel termal analiz (DTA), termogravimetric analiz (TG) ve diferansiyel tarama kalorimetrisine (DSC) dayalı olan termo-analitik bir yöntemdir.

Bu tezde, soğuk çekilmiş C55 ve C83 çelik teller için izotermal olmayan yeniden kristallenme kinetik incelemeleri, 5-10-15-20°C/dak olmak üzere 4 farklı ısıtma hızında diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) ile yapılmıştır. Kissinger, Boswell, Ozawa ve Starink yöntemleri, yeniden kristallenme aktivasyon enerjisini tespit etmek için kullanılmıştır.

DSC verilerinden elde edilen yeniden kristallenme sıcaklıkları, farklı ısıtma hızlarına bağlı olarak %121.2 oranında soğuk deforme olmuş C55 çelik tel için 451.2 °C ile 481.3 °C arasında, %108.3 oranında soğuk deforme olmuş C83 çelik tel için 475.4 °C ile 504.6 °C arasındadır.

Yeniden kristallenme pik sıcaklıkları kullanılarak, Kissinger metodu,  $(\ln(\beta/T^2) - 1/T)$ , Boswell metodu  $(\ln(\beta/T) - 1/T)$ , Ozawa metodu  $(\ln(\beta) - 1/T)$  ve Starink metodu  $(\ln(\beta/T^{1.92}) - 1/T)$  eğrileri çizilmiştir. Bu denklemlerde, R gaz sabiti (kJ/mol.K), T pik sıcaklığı (K) ve  $\beta$  ısıtma hızıdır (K/min). Bu eğrilerin eğimleri  $-E/R$  değerine eşittir, burada E aktivasyon enerjisidir (kJ/mol).

Kissinger, Boswell, Ozawa ve Starink metodlarına göre %121.2 oranında soğuk deforme olmuş C55 çelik tel için yeniden kristallenme aktivasyon enerjileri sırasıyla 196.5 kJ/mol, 202.6 kJ/mol, 198.7 kJ/mol ve 196.8 kJ/mol'dür. Kissinger, Boswell,



Ozawa ve Starink metotlarına göre %108.3 oranında soğuk deforme olmuş C83 çelik tel için aktivasyon enerjileri sırasıyla 220.5 kJ/mol, 226.8 kJ/mol, 221.8 kJ/mol ve 220.8 kJ/mol'dür. Sonuç olarak yeniden kristallenme aktivasyon enerjileri, %121.2 oranında soğuk deforme olmuş C55 çelik tel için  $198.6 \pm 2$  kJ/mol ve %108.3 oranında soğuk deforme olmuş C83 çelik tel için  $222.5 \pm 2$  kJ/mol olarak bulunmuştur.

Bu çalışmadan görülmüştür ki C55 ve C83 çelik tellerin soğuk deformasyonu, soğuk çekme esnasında oluşan depolanmış enerji nedeniyle mukavemet artmış ve süneklik azalmıştır. C55 ve C83 çelik teller karşılaştırıldığında, karbon içeriğindeki artış nedeniyle yeniden kristallenme sıcaklığı ve yeniden kristallenme aktivasyon enerjisi bir miktar artmıştır.



# **INVESTIGATION OF RECRYSTALLIZATION BEHAVIOUR AND MECHANICAL PROPERTIES OF COLD DRAWN C55 AND C83 STEELS**

## **SUMMARY**

In this thesis, the effects of cold-drawing of C55 and C83 steel wires on their mechanical properties and recrystallization kinetics were investigated. The steel samples were obtained from ÇELİK HALAT ve TEL SANAYİ A.Ş. located in Izmit - Kocaeli. This company produces wire ropes, spring wire, galvanized spring wires and prestressed concrete strands.

The one of the plastic forming methods is cold drawing and it is used to reduce the cross section of material under a drawing force through a single or a series of drawing dies. Cold drawing process is used to obtain electrical wires, cables, springs, paper clips, stress-loaded structural components and stringed musical instruments.

C55 steel is a medium carbon steel and it has 0.52 – 0.60% carbon. It has also 0.06 – 0.90% Mn, max. 0.045% P, max. 0.045% S, max. 0.4% Si and max. 0.63% Cr+Mo+Ni. C55 steel has high hardness and high strength due to the relatively high carbon. C55 steel is suitable for automotive and engineering materials such as axles, clutch members, shafts, pressed and punched parts, piston rods and gear racks. C83 steel is a high carbon steel and it contains manganese ranging from 0.30 to 0.90%. These steel is used for springs materials and high-strength wires.

In the experimental studies of C55 steel wire, the diameter of 5 mm was brought to 3 mm. The amount of cold deformation was determined as 121.2%. In the experimental studies of C83 steel wire, the diameter of 5 mm was brought to 3.2 mm and the amount of cold deformation is determined as 108.3%. The cold drawing processes for C55 and C83 steel wires were carried out in Çelik Halat company.

In metallographic examinations made after cold drawing processes of C55 and C83 steel wires, it was observed that the grain structures elongated in the direction of the tensile axis. No crack formation was found.

When the tensile tests results of C55 and C83 steel wires are examined, while the tensile strength of C55 steel wire was 859.2 MPa, this value increased to 1358.2 MPa after 121.2% cold deformation. The ductility of C55 steel wire decreased from 65.8% to 24.7% for 121.2 cold deformation. While the tensile strength of C83 steel wire was 1216.7 MPa after 108.3% cold deformation, this value increased to 1717.5 MPa after 108.3% cold deformation. The ductility of C83 steel wire decreased from 32.4% to 16.8% after 108.3% cold deformation. Since the strength and ductility of steel depend on the carbon content, it has been determined that the strength of the C83 steel wire was found to be greater than the strength of the C55 steel wire, and its ductility is lower. The increase in strength and decrease in ductility of C55 and C83 steel wires with cold deformation are due to the increase in dislocation density during cold deformation.

The shape, microstructure and mechanical properties of the material change during cold drawing. Depending on the dislocation increase, strength and hardness increase, ductility decreases. The workability of the material is decreased. Recrystallization heat treatment should be done to give the material its reworkability property. This heat treatment is an annealing process and it is applied to cold worked metals and alloys to obtain new and stress free grains. Because cell structures of metallic materials are unstable thermodynamically after cold deformation. Recrystallization heat treatment allows recovery process by reduction or removal of stresses on the grains and increases equiaxed ferrite grains formed from the elongated grains, decreases the strength and hardness and increases ductility. There are recovery, recrystallization and grain growth steps in the recrystallization heat treatment and it is carried out at 30 – 60% of the melting temperature of the metal. Recrystallization temperature is affected by initial grain size, composition, impurity content, time and the degree cold deformation.

The driving force for recrystallization in cold deformed metals is the stored energy formed during cold deformation. The recovery step takes place at low temperatures and there is no any changing in the microstructure. In this step, dislocations move and rearrange, residual stresses decrease in the structure. Recrystallization step is polygonizing and annihilating process of dislocations in the structure. In this step, dislocation density decreases, therefore strength decreases and ductility increases. In the last step of recrystallization heat treatment, as depending on temperature and time, grain growth takes place.

Isothermal kinetic analysis is used to explain the kinetics of solid state reactions such as recrystallization of metals and it is obtained kinetic informations needed for modeling the process at an industrial scale. This analysis requires a kinetic function for the evolution the reaction rate with time and the kinetic parameters such as the pre-exponential factor and activation energy can be obtained. The non-isothermal kinetic analysis is the alternative model-free methods based on the isoconversional method. The non-isothermal kinetics is a thermoanalytical method based on differential thermal analysis (DTA), thermogravimetric analysis (TG) and differential scanning calorimetry (DSC).

In this thesis, the non-isothermal recrystallization kinetics studies of cold drawn C55 and C83 steel wires were performed by using differential scanning calorimetry (DSC) with four heating rates (5–10–15–20°C/min). Kissinger, Boswell, Ozawa and Starink methods were used to find the activation energy of recrystallization.

The recrystallization temperatures obtained from DSC data were between 451.2 °C and 481.3 °C for 121.2% cold deformed C55 steel wire and between 475.4 °C and 504.6 °C for 108.3% cold deformed C83 steel wire, depending on different heating rates.

By using recrystallization peak temperatures, the plots of Kissinger method,  $(\ln(\beta/T^2) - 1/T)$ , Boswell method  $(\ln(\beta/T) - 1/T)$ , Ozawa method  $(\ln(\beta) - 1/T)$  and Starink method  $(\ln(\beta/T^{1.92}) - 1/T)$  were drawn. In these equations, R is gas constant (kJ/mol.K), T is peak temperature (K) and  $\beta$  is heating rate (K/min). The slopes in the graphics are equal to  $-E/R$ , where E is activation energy (kJ/mol).

The recrystallization activation energies for 121.2% cold deformed C55 steel wire are 196.5 kJ/mole, 202.6 kJ/mole, 198.7 kJ/mole and 196.8 kJ/mole according to Kissinger, Boswell, Ozawa and Starink methods, respectively. The recrystallization activation energies for 108.3% cold deformed C83 steel wire are 220.5 kJ/mole, 226.8 kJ/mole, 221.8 kJ/mole and 220.8 kJ/mole according to Kissinger, Boswell, Ozawa

and Starink methods, respectively. As a result, the recrystallization activation energies are  $198.6 \pm 2$  kJ/mole for 121.2% cold deformed C55 steel wire and  $222.5 \pm 2$  kJ/mole for 108.3% cold deformed C83 steel wire.

It can be explained from these studies that cold deformation of C55 and C83 steel wires increased the strength and decreased their ductilities due to stored energy formed during cold drawing. When C55 and C83 steel wires compared, the recrystallization temperature and the recrystallization activation energy slightly increase because of the increase in carbon content of steel.



## 1. GİRİŞ

Çelik, geniş alanda kullanım alanına sahip, yeniden kullanılabilme özelliği bulunan ve sürdürülebilir gelişmenin ana elemanlarından biri olan endüstriyel öneme sahip bir malzemedir. Her mühendislik alanında kullanma sahiptir. Çelik büyük bir farkla en geniş kullanım alanına sahip, dayanıklılığı en fazla ve uyarlanabilme özelliği iyi olan bir mühendislik malzemesidir. Çeliğin kullanım alanlarının genişliği, çok sayıdaki çelik standartları ve belli çelik türleri vasıtasıyla kanıtlanabilmektedir. Avrupa Çelik Tescil Dairesi'nin başvurusu ile yayınlanan çelik kayıtlarında 1500 çeşit çelik ile birlikte toplam 2000 kadar çelik cinsi bulunmaktadır.

Diğer malzemelere kıyasla çelik oldukça düşük enerji girdisi ile üretilebilirler. Çeşitli demir ve çelik türleri düşük maliyet ve kabul edilebilir bir kalite ile üretilebilirler. Çelik sadece çalışma sırasında değil aynı zamanda üretiminde ve işlenmesinde yüzde yüz geri dönüştürülebilir olduğu için çevre dostudurlar. Gerekli performans özellikleri alaşımlama, şekillendirme ve ısıl işlem koordinasyonu ile seçici bir şekilde elde edilebilirler. Çelik kolaylıkla şekillendirilebilir, birleştirilebilir ve uygulama yerine göre işlenebilirler.

Çelik fabrikalarında üretilen ve dökümü yapılan çelik, mevcut haliyle son kullanım yeri için gerekli boyutsal, teknolojik ve mekanik özelliklere sahip olmayabilir. Şeklini, ölçüsünü, kullanım performans özelliklerini elde edebilmek için çelik, yassı kütük (slab), kaba kütük (blum), kütük (bilet) ve ingotlar halinde dökülüp daha ileri şekillendirme ve işlemlere doğru yol almaktadır (Koçak, 2012).

Bu çalışmada kullanılan karbon çelikleri tipik olarak dünya çapında üretilen ve sevilen çeliklerin % 85'inden fazlasını oluşturmaktadır ve açık ara en çok kullanılan demir – karbon alaşımıdır. Çelikleri karbon içeriğine göre sınıflandırmak olağandır ancak belirli sınırlar iyi tanımlanmamıştır (Lyon, 2010).

Çelik, kristal yapıya sahip bir malzemedir. Bir dış kuvvet etkisi ile yapıda şekil değişimi yani deformasyon meydana gelmektedir. Şekli değişmiş olan malzemeden uygulanan kuvvet kaldırıldığında tekrar eski haline dönüşüm olması, bu değişimin elastik şekil değişimi olduğunu göstermektedir. Plastik şekil değişimi esnasında kristal

kafesinde kayma düzlemlerinde kaymalar olmaktadır. Plastik şekil değişimi arttığında kristal kafesi içinde çarpılmalar (distorsiyonlar) belirli bir seviyeye geldiği zaman kayma işlemleri kısıtlanmaktadır. Deformasyon sertleşmesi olarak isimlendirilen bu durumun giderilmesi ve yeniden işlenebilir hale gelebilmesi için eski kristal yapısına dönmesi gerekmektedir. Plastik şekil verme işlemi esnasında dislokasyon yoğunluğunun artması ile yapıda süneklik özelliği azalmakta ve şekil verilebilme kabiliyeti azalmaktadır. Deformasyona uğramış çelik belirli bir sıcaklığa ısıtılarak bu sıcaklıkta bekletilirse yeniden kristallenme adı verilen ısıtılma işlemi gerçekleştirilmiş olur. Bu ısıtılma işlemi sayesinde çeliğin kristal yapısı plastik şekil verme işlemi öncesine dönmektedir (Grecu, 2021; Koçak, 2012; Raougui, 2021; Raougui, 2023).

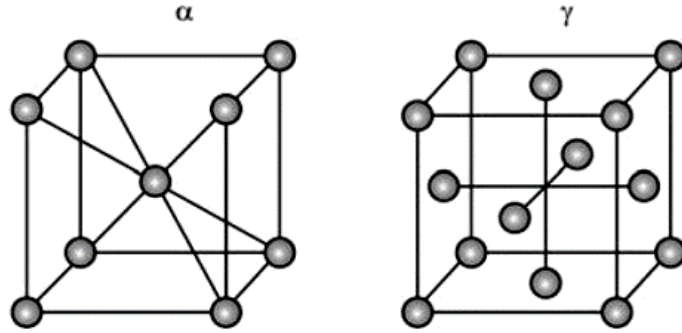
Bu tez çalışmasında, Kocaeli'nde bulunan Çelik Halat ve Tel Sanayi Anonim Şirketi'nden başlangıç malzemesi olarak C55 ve C83 çelik tel numuneleri ile birlikte bu çelik tellerin soğuk çekme ile deformasyona uğratılmış teller üzerindeki mekanik özelliklerdeki değişimler incelenmiştir. Bunun yanı sıra tezin temel çalışmasında, C55 ve C83 çelik tellerde soğuk tel çekme sonrasında yeniden kristallenme kinetiğinin termal analiz yöntemi kullanılarak, Kissinger, Ozawa, Boswell ve Starink modelleri gibi izotermal olmayan kinetik yöntemler kullanılarak incelenmiştir.



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Çelik

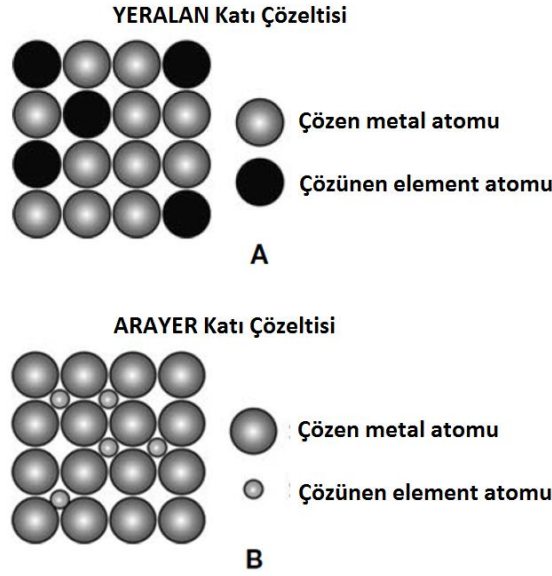
Metallurjik anlamda çelik, demir (Fe) ve karbon (C) atomlarının oluşturduğu bir katı çözüldür. Karbon atomları demir atomlarından çok daha küçük boyutta olmalarından dolayı demir kristal kafesi içinde arayer pozisyonunda yer alırlar. Çelikte özelliklerini de karakterize eden iki temel kristal latis yapısı bulunmaktadır. Bunlardan ilki, ferrit olarak da isimlendirilen Hacim Merkezli Kübik (HMK) yapıdaki  $\alpha$  – çelik ve ikincisi östenit olarak adlandırılan Yüzey Merkezli Kübik (YMK) yapıdaki  $\gamma$  – çeliktir. Bu iki tür kristal yapıda atomik pozisyonların şematik gösterimi Şekil 2.1.'de verilmiştir.



**Şekil 2.1.** HMK ( $\alpha$ ) ve YMK ( $\gamma$ ) kristal yapılarının atomik düzeni (Mandal, 2015).

Karbon (C) veya mangan (Mn) atomu gibi elementler çelikte var olduğu ya da ilave edildiği zaman, atomik boyutlarına bağlı olarak mevcut kristal kafesi içinde tercihli olarak bir pozisyonda yer alarak katı çözüldü oluştururlar. Katı çözüldü oluşturmanın da termodinamik kuralları vardır. En önemlisi çözen (Fe) ve çözünen (C, Mn, vb.) atomların atomik boyut ve kristal yapısına bağlı olmaktadır. Çözen ve çözünen atomları arasındaki atomik boyut % 15 den daha az olduğu zaman, Şekil 2.2.'de verildiği gibi arayer katı çözüldü oluşmaktadır. Çözünen atom daha küçük olsa bile çözen atomların boş bölgelerini doldurmakta ise, yine Şekil 2.2.'de gösterildiği gibi yeralan katı çözüldü oluşmaktadır. İki veya daha fazla alaşımlama elementi ile katı çözüldü oluşumu, ilgili elementlerin sıcaklığa bağlı olarak değişen çözünürlüğü ile sınırlıdır. Örnek olarak Fe – C alaşım sisteminde bir arayer atomu olan karbon, ferrit ( $\alpha$ ) demir yapısında yaklaşık 700°C sıcaklıkta % 0.02 değerine kadar çözünmektedir. Arayer katı

çözültisinde çözünen elementin çözünürlüğü termodinamik koşullarla limit değeri aşarsa, farklı bir faz ya da bir ara bileşik oluşur. Örneğin çelikte, ferrit yapısındaki karbon miktarı % 0.02 değerini aşarsa, bu fazlalık karbon, mikroyapıda % 6.67 karbon ve gerisi demir içeren bir ara bileşik / intermetalik olan karbür ( $Fe_3C$ ) olarak gözükmektedir.



**Şekil 2.2.** Yeralan (A) ve arayer (B) katı çözeltileri (Mandal, 2015).

Alaşımlama elementleri ile yapıda katı çözelti oluşumu, latiste lokal gerilim alanları oluşturur ve çeliğin mukavemet kazanmasını sağlar. Aynı zamanda oluşan ara bileşikler çeliğin çökeltme sertleşmesi ile çeliğin mukavemetini artırmaktadır. Çelikte gözlenen mukavemet, mikroyapının bir sonucudur ve ısı ve/veya deformasyon uygulamaları gibi ilave işlemlerle değiştirilebilir. Çelikte karbon (C), azot (N), titanyum (Ti) gibi daha küçük çaplı alaşımlama elementleri arayer katı çözeltisi oluştururken silis (Si), mangan (Mn), krom (Cr) ve nikel (Ni) gibi benzer ya da yakın atomik çapa sahip alaşımlama elementleri yeralan katı çözeltisi oluşturmaktadır. Çelikte oluşan bu tür katı çözeltiler çeliğin mekanik mukavemetinde artışa ve plastiklikte bir azalmaya neden olmaktadır (Mandal, 2015).

### 2.1.1. Çeliklerin sınıflandırılması

Çelik bir demir – karbon alaşımı olup çeliğin bazı özelliklerini geliştirmek amacıyla alaşımlama elementleri ilave edilmektedir. Çeliğe herhangi bir alaşımlama elementi ilave edilmediği zaman *Sade Karbon Çeliği* olarak adlandırılmaktadır. Belirli bir amaçla alaşım elementi ilave edildiği zaman *Alaşımlı Çelik* ismi verilmektedir.

Genel olarak çelikteki % karbon aralığı % 0.02 ile % 1 arasındadır. Bazı durumlarda, mikroyapıda sert ve aşınmaya dirençli bir faz olan karbür miktarını artırmak için aşınmaya dirençli çeliklerde karbon miktarı % 2'ye kadar çıkmaktadır. % C miktarı bu limitleri aşarsa, aşırı miktardaki karbon, grafit olarak adlandırılan serbest karbon olarak çökecek ve malzeme çelikten dökme demire dönüşecektir. Çeliklerde aşırı karbon mikroyapıda karbür oluşturur ancak dökme demirlerde aşırı miktardaki karbon mikroyapıda genelde grafit olarak bulunmaktadır.

Çelikler geniş olarak sade karbonlu ve alaşım çelikleri olarak gruplandırılırlar. Bu grupların arasında da birkaç alt grup bulunmaktadır. Son kullanımdaki amaçlara bağlı olarak çelikler ya düşük karbonlu, orta karbonlu ve yüksek karbonlu ya da düşük alaşımlı veya yüksek alaşımlı çelikler olarak sınıflandırmak mümkündür. Özel olarak bir alaşımlama elementi katılmamış sade karbonlu çelikler hali hazırda çelik üretimi sürecinden gelen çok az miktarda silis, kükürt, mangan vb. içerebilirler. Belirli bir amaçla krom, nikel, molibden gibi katılmış çelikler ise alaşımlı çelik olarak isimlendirilir. Alaşımlama elementleri miktarı % 5'den az olduğu zaman düşük alaşımlı çelik, % 5'den fazla olduğunda da yüksek alaşımlı çelik olarak adlandırılmaktadır. Alaşımlı çelik yapımı, sade karbonlu çelik yapımından daha zordur. Bunun sebebi ferro alaşım ilavelerinden kaynaklanan alaşımlama elementinin ayarlamasının zorluğudur (Mandal, 2015).

Bir başka yaklaşıma göre çelikler dört sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar;

- *Karbon Çeliği*: En çok kullanıma sahip çelik türü olup % 1'den daha az karbon içermektedir. Diğer metaller ise çok az bulunmaktadır. Bu çeliklerde % 1'den fazla karbon çeliği gevrek hale getirmektedir.
- *Alaşım Çeliği*: Çeliğin fiziksel ve kimyasal özelliklerini geliştirmek amacıyla üretim esnasında alaşım elementinin katıldığı çeliktir.
- *Paslanmaz Çelik*: Bu çelik türü teknik olarak alaşımlı çelik olup paslanmaz özelliğini sağlamak için % 10 – 20 krom (Cr) içermektedir. Krom yüzeyde koruyucu bir tabaka oluşturarak korozyon olayını önlemektedir.
- *Takım Çeliği*: Delme ve kesme makineleri, bıçaklar vb. yerlerde kullanılan çelik türüdür. Bu çelikler yüksek sıcaklık dirençli ve dayanıklılığa sahiptirler. Şekilsel kararlılığından sebep ağır kullanımlar için uygundur (Vanilla Steel, 2023).



(a)



(b)



(c)



(d)

**Şekil 2.3.** (a) Sade karbonlu, (b) alaşımlı, (c) paslanmaz ve (d) takım çeliği (Dekmake, 2023; Kalaylı Demir Çelik, 2023; Uyarlar, 2023).

Bu çelik türlerinin örnekleri Şekil 2.3.'de ve bazı özelliklerinin karşılaştırması Tablo 2.1.'de verilmiştir. Çelikler kompozisyonlarına, uygulamalarına ya da özelliklerine göre gruplara hatta alt gruplara ayrılmaktadır. Örneğin sade karbonlu çelikler karbon yüzdesine bağlı olarak sınıflandırılırlar ancak karbon limitleri bu gruplar için pratikte bir miktar değişebilmektedir.

- *Düşük Karbonlu Çelikler:* Genel olarak karbon içeriği % 0.15 ile sınırlandırılmasına karşın bu değer % 0.25'e kadar çıkabilir. Çok iyi şekil verilebilme özelliğine sahiptirler ve geniş şekilde yapısal uygulamalarda kullanılırlar.
- *Orta Karbonlu Çelikler:* Karbon içeriği % 0.20 ile % 0.60 arasındadır. % 0.3 – 1.6 arasında magnezyum içerirler. Karbon miktarları düşük karbonlu olanlardan daha fazla olduğu için daha mukavemetlidirler ancak şekil verilebilme özelliği azalmıştır. Dişli, ray, krank, makine parçaları gibi alanlarda kullanılırlar.
- *Yüksek Karbonlu Çelikler:* Karbon içeriği % 0.60 ile % 1 arasındadır. % 0.3 – 0.9 magnezyum da içermektedir. Bu tür çeliklerdeki en yüksek mukavemete ve en düşük şekil verilebilirliğe sahiptirler. Parmaklık, levha, bıçak, musluk, yay çeliği, tel çekme kalıpları ve kesici alanlarında kullanılmaktadır (Bell, 2023; Mandal, 2015; Vanilla Steel, 2023)

**Tablo 2.1.** Çelik türlerinin bazı mekanik özellikleri (Bell, 2023).

Özellik	Karbon Çelikleri	Alaşım Çelikleri	Paslanmaz Çelikler	Takım Çelikleri
Elastik Modül (GPa)	190 – 210	190 – 210	190 – 210	190 – 210
Akma Mukavemeti (MPa)	186 – 758	366 – 1793	207 – 552	380 – 440
Çekme Mukavemeti (MPa)	276 – 1882	758 – 1882	515 – 827	640 – 2000
% Uzama	10 – 32	4 – 31	12 – 40	5 – 25
Sertlik (Brinell 3000 kg)	86 – 388	149 – 627	137 – 595	210 – 620

Alaşımlı çelikler son kullanıma bağlı olarak % 0.1'den % 2'ye varan oranda karbon içerirler ve ilave olarak krom, mangan, nikel, molibden, niyüm ve bakır gibi özellikle seçilmiş alaşımlama elementi içermektedir. Bu alaşım elementleri ile iyi tokluk, korozyon direnci, sürünme direnci, yüksek sıcaklık mukavemeti ve aşınma direnci gibi özellikler iyileştirilmektedir. Alaşım miktarlarına bağlı olarak düşük alaşımlı ve yüksek alaşımlı çelikler olmak üzere gruplandırılmaktadır (Mandal, 2015).

### **2.1.2. Çelik standartları**

Çelik standartları, makinelerin, parçaların ve yapıların imalatında kullanılan çeşitli çelik türleri ve demir alaşımlarının kimyasal, mekanik ve metalurjik özelliklerine yönelik sınıflandırma, değerlendirme ve spesifikasyon sistemleridir.

Çelik standartları çelik üretimi, işlenmesi ve kullanımında metalurji laboratuvarlarına, üreticilere ve kullanıcılara yardımcı olmaktadır.

Çelikler, aşağıda verildiği gibi çok çeşitli kriterlere göre sınıflandırılmabilir. Bunlar;

- Kompozisyon: karbon, düşük alaşımlı veya paslanmaz çelik
- Üretim Yöntemi: bazik oksijen prosesi, elektrik ark fırını vb.
- Bitirme Yöntemi: soğuk veya sıcak haddeleme, çeşitli yüzey tamamlama veya kaplama teknikleri
- Son Ürün: levha, yapısal şekil, çubuk, tel, şerit, boru
- Mikroyapı: ferritik, perlitik veya martensitik
- Isıl İşlem Yöntemi: temperleme, tavlama, su verme

Bununla beraber evrensel olarak kabul edilmiş bir çelik standardı veya sınıflandırma yoktur. Bunun yerine standart geliştirme kuruluşları veya belirli sektörler ve tedarikçiler tarafından ulusal ve küresel olarak oluşturulmuş ve standartlaştırılmış çeşitli onaylanmış ve yaygın olarak kullanılan sınıflandırma ve tanımlama sistemleri bulunmaktadır (Yena Engineering, 2023).

Dünya genelinde kullanılan çelik standartları Tablo 2.2.'de verilmiştir. Otomotiv Mühendisleri Birliği (SAE), çeliklerin standartlaştırılması konusunda ilk çalışmayı yapan birlik olmuştur. Amerikan Demir Çelik Enstitüsü (AISI), benzer bir standartlaştırma sistemini ortaya koymuştur.

**Tablo 2.2.** Dünya çelik standartları (İçin, 2023).

Standart Kısaltması	Açılımı
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
SAE	Otomotiv Mühendisleri Standartları
ASTM	Amerikan Malzeme Test Birliği Standartları
AFNOR	Fransız Standartları Enstitüsü
JIS	Japon Standartları
BS	İngiliz Standartları
ISO	Uluslararası Standartlar Organizasyonu
EURONORM	Avrupa Standartları
DIN	Alman Standartları Enstitüsü
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
GOST	Rusya Standartları Enstitüsü

Otomotiv Mühendisler Birliği (SAE) metal ve alaşımları için Birim Numaralandırma Sistemi'ni (UNS) 1975 yılında yayınlamıştır. Birim Numaralandırma Sistemi, metal ve alaşımlarını belirtmek için harf kullanmaktadır. Otomotiv Mühendisleri Birliği (SAE) ve Amerikan Demir Çelik Enstitüsü (AISI) standartlarında 4 harf/rakam kullanılmaktadır. XXXX olarak verilen standartta ilk iki rakam (XXXX) alaşım grubunu ve son iki rakam (XXXX) ise karbon miktarını vermektedir. En başta yer alan 1 rakamı sade karbon çeliği olduğunu gösterir. Örnek olarak SAE 1010 çeliği sade karbonlu bir çelik olup % 0.10 karbon içermektedir. Aynı şekilde başta bulunan 2 rakamı nikel çeliklerini, 3 rakamı nikel – krom çeliklerini, 4 rakamı molibden çeliklerini, 5 rakamı krom çeliklerini, 6 rakamı krom – vanadyum çeliklerini, 7 rakamı tungsten – krom çeliklerini, 8 rakamı nikel – krom – molibden çeliklerini ve 9 rakamı da silis – mangan çelikleri ile çeşitli diğer sınıfları simgelemektedir. SAE/AISI çelik

numaralandırma sistemi Tablo 2.3.'de verilmiştir (The Process Piping, 2023; whatispiping, 2023). Tablo 2.4.'de de SAE ve AISI çelik norm ve simgeleri verilmiştir.

**Tablo 2.3.** SAE/AISI çelik numaralandırma sistemi (The Process Piping, 2023).

Çelik Türü	Sembol	İçerik
Karbon Çelikleri	10XX	Sade karbon, Mn (% 1 maks.)
	11XX	Sülfürlü kolay işlenebilir çelik
	12XX	Sülfürlü/Fosforlu kolay işlenebilir çelik
	15XX	Sade karbon, Mn (% 1-1.65)
Mangan Çelikleri	13XX	Mn (% 1.75)
Nikel Çelikleri	23XX	Ni (% 3.5)
	25XX	Ni (% 5)
Nikel – Krom Çelikleri	31XX	Ni (% 1.25), Cr (% 0.65 – 0.8)
	32XX	Ni (% 1.75), Cr (% 1.07)
	33XX	Ni (% 3.5), Cr (% 1.5-1.57)
	34XX	Ni (% 3), Cr (% 0.77)
Molibden Çelikleri	40XX	Mo (% 0.2-0.25)
	44XX	Mo (% 0.4-0.52)
Krom – Molibden Çelikleri	41XX	Cr (% 0.5-0.95), Mo (% 0.12-0.3)
Nikel – Krom – Molibden Çelikleri	43XX	Ni (% 1.82), Cr (% 0.5-0.8), Mo (% 0.25)
	47XX	Ni (% 1.05), Cr (% 0.45), Mo (% 0.2-0.35)
Nikel – Molibden Çelikleri	46XX	Ni (% 0.85-1.82), Mo (% 0.2-0.25)
	48XX	Ni (% 3.5), Mo (% 0.25)
Krom Çelikleri	50XX	Cr (% 0.27-0.65)
	51XX	Cr (% 0.8-1.05)
	50XXX	Cr (% 0.5), C (min % 1)
	51XXX	Cr (% 1.02), C (min % 1)
	52XXX	Cr (% 1.45), C (min % 1)
Krom – Vanadyum Çelikleri	61XX	Cr (% 0.6-0.95), V (% 0.015-0.1)
Wolfram – Krom Çelikleri	72XX	W (% 1.75), Cr (% 0.75)
Nikel – Krom – Molibden Çelikleri	81XX	Ni (% 0.3), Cr (% 0.4), Mo (% 0.12)
	86XX	Ni (% 0.55), Cr (% 0.5), Mo (% 0.2)
	87XX	Ni (% 0.55), Cr (% 0.5), Mo (% 0.25)
	88XX	Ni (% 0.55), Cr (% 0.5), Mo (% 0.35)
Silis – Mangan Çelikleri	92XX	Si (% 1.4-2), Mn (% 0.65-0.85), Cr (% 0-0.065)
Nikel – Krom – Molibden Çelikleri	93XX	Ni (% 3.25), Cr (% 1.2), Mo (% 0.12)
	94XX	Ni (% 0.45), Cr (% 0.4), Mo (% 0.12)
	97XX	Ni (% 0.55), Cr (% 0.2), Mo (% 0.2)
	98XX	Ni (% 1), Cr (% 0.8), Mo (% 0.25)



**Tablo 2.4.** SAE ve AISI çelik simgeleri (İçin, 2023).

Simge	Anlamı	Örnek
WX	Suda sertleşebilen takım çelikleri	W1
PX	Kalıp çelikleri	P2
OX	Yağda sertleşebilen soğuk iş takım çelikleri	O3
AX	Havada sertleşebilen soğuk iş takım çelikleri	A2
DX	Yüksek karbonlu ve kromlu soğuk iş takım çelikleri	D3
TX	Tungstenli yüksek hız çelikleri	T1
MX	Molibdenli yüksek hız çelikleri	M7
H1X	Molibden içeren sıcak iş takım çelikleri	H12
H2X	Krom içeren sıcak iş takım çelikleri	H21
H4X	Tungsten içeren sıcak iş takım çelikleri	H41
SX	Molibden içeren sıcak iş takım çelikleri	S2
LX	Düşük alaşımlı özel amaçlı takım çelikleri	L2
FX	Diğer özel amaçlı takım çelikleri	F1

DIN eskiden Deutsch Industrienorm (Alman Endüstri Standardı) anlamına gelmekteydi ancak günümüzde Deutsch Institut für Normung (Alman Norm Enstitüsü) anlamına gelmektedir. Uluslararası standardizasyon örgütü bunu 1974 yılında güncellemiştir. Harfler ve sayılar nesnelere sınıflandırmak için kullanılmaktadır. Harfler çelik tipini, ergitme tekniğini, alaşım malzemelerini ve işleme koşullarını belirtirken sayılar çelik malzemeyi, karbon içeriğini, gerilme mukavemetini ve birincil alaşımın sabit nokta sayısını göstermektedir (Tien, 2023; Yena Engineering, 2023).

Alman Çelik Standartları (DIN) ise çekme dayanımına, kimyasal analizine ve malzeme numaralarına göre sınıflandırma yapmaktadır. Çekme dayanımına göre almanca çelik anlamına gelen “stahl” kelimesinin kısaltması ve çekme dayanımı değeri kullanılarak gösterim yapılmaktadır. Örnek olarak St35 olarak gösterilen çelik, çekme dayanımı 35 kg/mm<sup>2</sup> olan çelik anlamına gelmektedir. Kimyasal analizine göre sınıflandırmada da “C” harfi kullanılmaktadır. Özellikle karbon çeliklerinde kullanılan bu sembol, ilave kodlamalarla içerdikleri fosfor (P) ve kükürt (S) değerlerini de ortaya koymaktadır. Örnek olarak C45 ifadesinin anlamı, %0.45 karbon içeren sade çelik demektir. Bu karbon çeliklerinin sınıflandırması Tablo 2.5.’de verilmiştir. Tablo 2.5.’e göre örnek olarak Cq35 standart gösteriminin anlamı, %0.35 karbonlu, maksimum %0.035 fosfor (P) ve kükürt (S) içeren soğuk şekillendirilebilir karbon çeliği demektir.

**Tablo 2.5.** DIN normuna göre karbon çelik standartları (İçin, 2023).

Sembol	Çelik Sınıfı	Maks.% P	Maks.% S
C	Genel amaçlı karbon çeliği	0.060	0.060
Ck	Genel amaçlı karbon çeliği (Düşük P ve S)	0.035	0.035
Cm	Islah edilebilir karbon çelikleri	0.035	0.035
Cq	Soğuk şekillendirilebilir karbon çelikleri	0.035	0.035
Cf	Yüzeyi sertleştirilebilir karbon çelikleri	0.025	0.035

Avrupa Standardı olarak da bilinen Euronorm (EN), çok çeşitli ticari ve endüstriyel işlemler için Avrupa Birliği genelinde geçerli olduğu kabul edilen uluslararası bir teknik standarttır. Standartlar, dünya çapındaki ISO veya IEC standartlarıyla aynı olabilir veya uluslararası standarda eklenmiş revizyonlarla birlikte Avrupa Birliği uygulaması için teknik içerik değişiklikleri içerebilir veya bir Avrupa standart kuruluşu tarafından geliştirilebilirler (Yenaengineering, 2023). EN (Avrupa Normları) standartlarında rakamlardan sonra belirli harfler kullanılarak bazı özelliklerin gösterimi yapılmaktadır. Bu simgeler ve anlamları ile örnekleri Tablo 2.6.’da verilmiştir.

**Tablo 2.6.** EN standartlarında kullanılan simgelerin anlamları (İçin, 2023).

Simge	Anlamı	Örnek
Ê	Kükürt $\leq$ % 0.035 olan soy çelik	C40E
R	Kükürt aralığı % 0.020 – 0.040 olan soy çelik	C40R
G	Alevle/indüksiyonla sertleştirilebilir soy çelik	C40G
C	Soğuk şekillendirmeye uygun sade/soy çelik	C25C
D	Tel çekmeye uygun kaliteli soy çelik	C25D
S	Yay yapımına uygun soy çelik	C65S
W	Kaynak teli için uygun kaliteli soy çelik	C15W

JIS (Japon Endüstri Standartları) çelik standartları, Asya ve Pasifik'te yaygın olarak kullanılmaktadır. Kore, Çin ve Tayvan standartları gibi diğer ulusal sistemler, temel olarak JIS standart gerekliliklerini sıklıkla benimsemişlerdir. Çelik malzeme numarası için Japon Endüstri Standardı (JIS) iki türe ayrılmıştır. Bunlar;

- Yapısal Çelik: Malzeme numarası CNS (Çin Ulusal Standardı) ile aynıdır. Örneğin S30C çeliği yapısal çelik olduğunu ve % 0.30 C içerdiğini göstermektedir.
- Karbon Çeliği ve Alaşımli çeliğin diğer kullanım alanları: Bu tür malzeme kodu üç bölüme ayrılmıştır. Birinci kısım malzemeyi ifade eder. İkinci kısım çeliğin özelliklerini veya kullanımını, üçüncü kısım ise çelik malzemenin türünü belirtmektedir (Yena Engineering, 2023).

Fransız AFNOR çelik standartları başlıca Fransızca konuşan ülkelerde ve bunlarla çalışan firmalarda kullanılmaktadır. Standartlar, harf ve sayıların kombinasyonunu kullanmaktadır. İlk harf çeliğin türünü vermektedir. Daha sonra gelen sayılar karbon içeriğini ve ana alaşım elementlerini vermektedir (Vanilla Steel, 2023).

## 2.2. Plastik Şekil Verme İşlemleri

Plastik şekil verme işlemleri, çalışma sıcaklık aralıklarına bağlı olarak soğuk işleme, ılık işleme ve sıcak işleme olarak şekillendirme yöntemlerine sahiptir. İş parçasının ergime sıcaklığının yaklaşık 0.5 - 0.8 değer aralığında olan şekillendirme işlemleri sıcak şekillendirme, iş parçasının ergime sıcaklığının yaklaşık 0.3 - 0.5 değer aralığında olan şekillendirme işlemleri yarı sıcak (ılık) şekillendirme ve iş parçasının ergime sıcaklığının yaklaşık 0.3 değerinin altında olan şekillendirme işlemleri soğuk şekillendirme olarak ifade edilmektedir.

Soğuk şekil vermede parçalarda daha yakın tolerans ve daha iyi yüzey sonuçları avantajlar olup iş parçasının ısıtılmasına gerek kalmamaktadır. Buna karşılık şekil verme kuvvetlerine daha fazla ihtiyaç duyulması, başlangıç iş parçasının yüzeyinde talaş ve kir olmaması ve parçanın sünek olmasının gerekliliği dezavantajları arasında sayılmaktadır.

Ilık şekil vermede ise soğuk şekil vermeye göre daha az kuvvete ihtiyaç duyulması, daha karmaşık parçaların üretilebilmesi avantajları vardır. Şekil verme işlemleri sonrasında ısıl işlem gereksinimi çok az ya da yoktur.

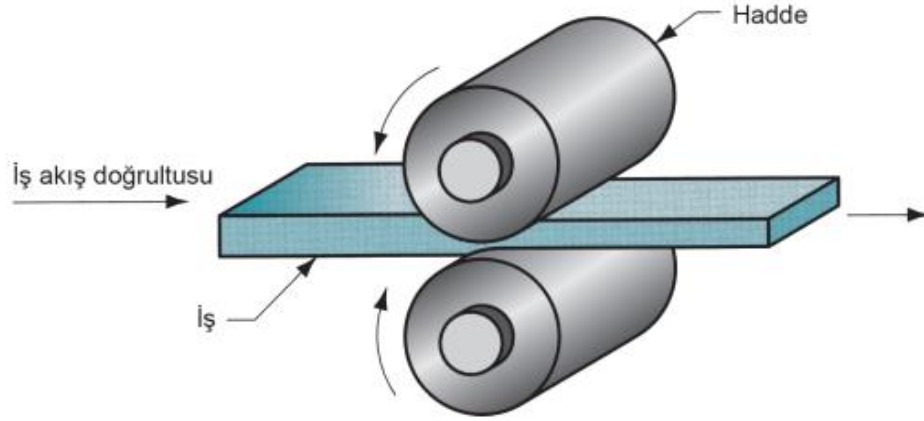
Sıcak şekil verme işlemlerinde ise iş parçasına kolaylıkla şekil verilebilmesi, şekil vermede daha az kuvvet gereksinimine ihtiyaç duyulması, şekil vermede çatlak oluşmaması avantajlar olarak görülmektedir. Buna karşılık düşük boyutsal hassasiyet, iş parçasını ısıtma amacıyla daha fazla ısı enerjisine ihtiyaç duyulması, oksitlenme nedeniyle yüzeyde tufal oluşması ve hassas olmayan yüzey sonuçları dezavantajları olarak görülmektedir (Groover, 2001; Narayanan, 2023; Raougui, 2023)

### 2.2.1. Haddeme ile şekillendirme

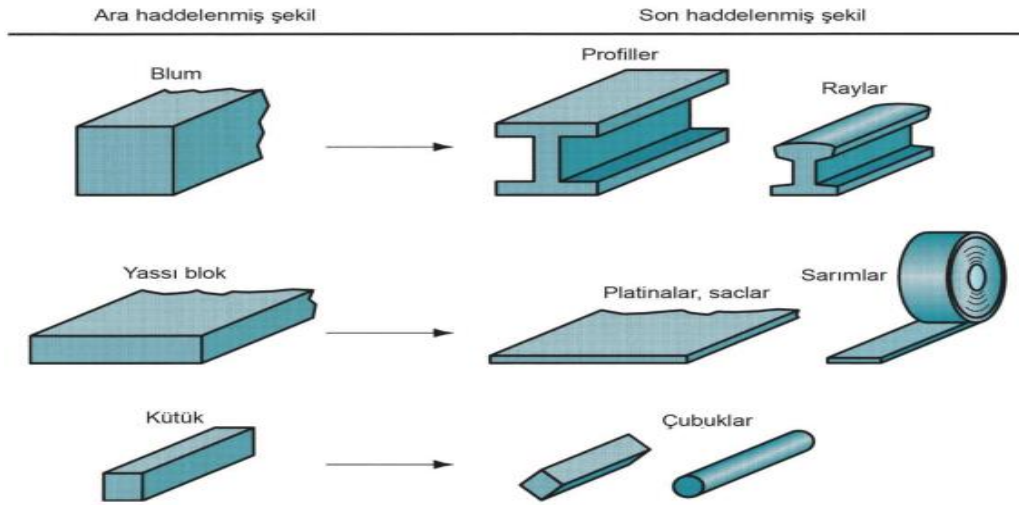
Haddeme işlemi, metalik iş parçalarının bir haddeme makinesinde iki veya daha fazla silindirik merdane arasından geçirilerek şekillendirilmesi işlemidir. Şekil 2.4.'de gösterildiği gibi haddeme esnasında merdaneler birbirine zıt yönde hareket ederler. Şekillendirilen parçanın merdane sisteminden geçmesine paso adı verilmektedir.

Malzemenin homojenliği ve özellik değişimlerini sağlamak için haddeme işlemi iş parçasının geometrisine uygun olmalıdır. Haddeme işlemi soğuk veya sıcak olarak gerçekleştirilebilir. İşlem sıcaklığına bağlı olarak haddelenen iş parçasında tane yapıları farklılık gösterecektir. Soğuk haddeme işleminde taneler hadde yönünde

uzamış şekilde iken, sıcak haddeleme işleminde şekillendirme bölgesinden sonra taneler eski haline gelmeye başlarlar. Haddeleme işlemi sırasında metal parçanın sıcaklığı kontrol altında tutulmalı, sürtünmeyi azaltmak için soğutma yağı veya benzeri bir madde kullanılmalı, parça üzerindeki gerilimler kontrol edilmeli ve çatlama veya diğer hasarların önlenmesi için gerekli tedbirler alınmalıdır (Bhaduri, 2018; Ikumapayi ve ark., 2020; Dixit, 2020; Raougui, 2021; Narayanan, 2023; Şenel, 2023).



**Şekil 2.4.** Haddeleme ile şekillendirme işlemi (Şenel, 2023).



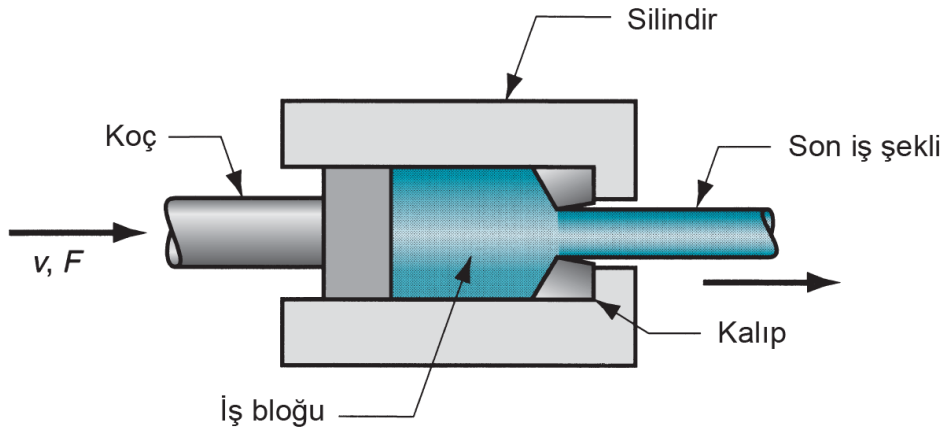
**Şekil 2.5.** Haddeleme ile elde edilen ürün türleri (Şenel, 2023).

Şekil 2.5.'de de haddeleme ile üretilen örnek ürünler gösterilmiştir. Haddeleme ile genellikle metal plakala ve tellerin şekillendirilmesinde kullanılmaktadır. Alüminyum folyo gibi bir ürün haddeleme işlemiyle ince bir levha haline getirilmektedir. Otomotiv sektöründe de şasi parçalarının üretiminde, daha ince ve daha hafif malzemeler elde etmede haddeleme işlemi kullanılmaktadır (Şenel, 2023).

## 2.2.2. Ekstrüzyon ile şekillendirme

Ekstrüzyon işlemi, belirli bir kesit şeklini üretmek için iş parçasının kalıp içerisinde zorlama yapılarak basılması işlemidir. Ekstrüzyon işlemleri sıcak, ılık veya soğuk olarak yapıldığı gibi direkt ve indirekt olarak da yapılmaktadır. Sıcak ekstrüzyonda şekil değişkenliği mümkündür. Soğuk ve ılık ekstrüzyonda tane yapısı ve mukavemet özellikleri ayarlanabilmektedir. Soğuk ekstrüzyonda ise dar toleranslarda çalışma söz konusudur. Ekstrüzyon ile şekil verme daha çok alüminyum ve alaşımlarının şekillendirilmesinde tercih edilmekte olup bakır, pirinç ve düşük karbonlu çeliklerin şekillendirilme işlemlerinde sınırlı olarak kullanılmaktadır.

İleri ekstrüzyon olarak da isimlendirilen direkt ekstrüzyon ile şekil verme işlemi Şekil 2.6.'da gösterilmiştir. Bu işlemde bir metal iş bloğu silindirik kalıp içine yüklenir ve koç adı verilen bir itici güç ile iş parçası bir açıklıktan akmaya zorlanır. Yine bu işlemde iş bloğunun az bir kısmı kalıp içerisinde kalmaktadır ve atık olarak adlandırılan bu kısım, daha sonra kesilerek nihai üründen ayrıştırılmaktadır.

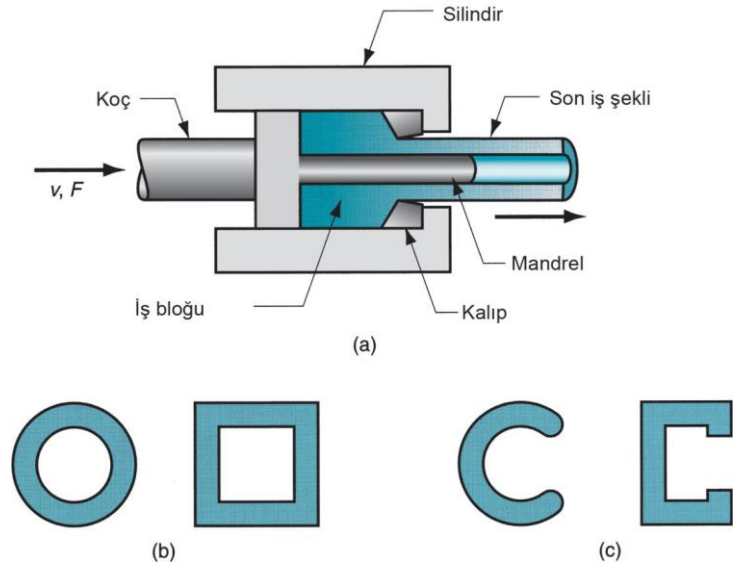


Şekil 2.6. Direkt ekstrüzyon işlemi (Şenel, 2023).

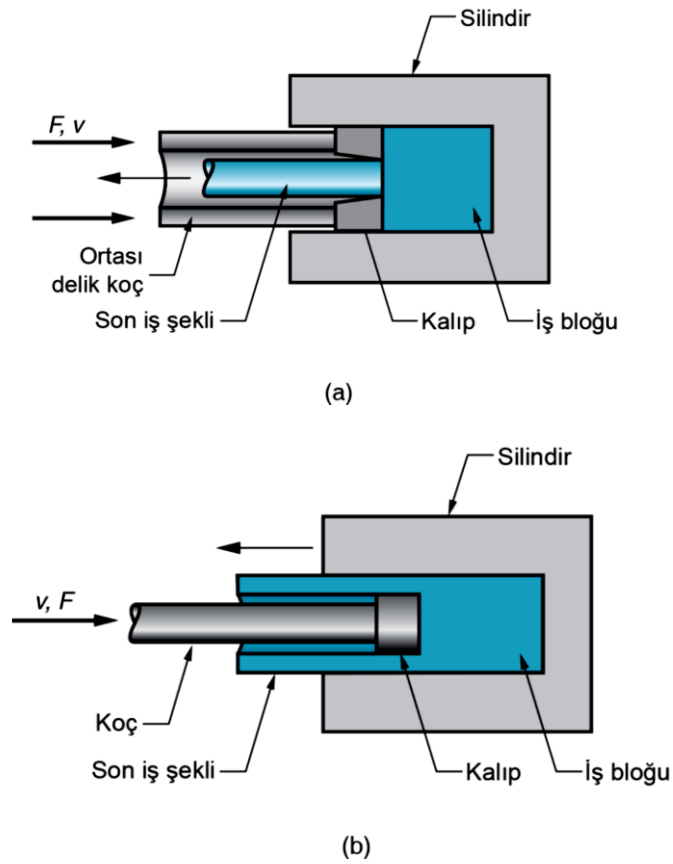
Direkt ekstrüzyonla şekil verme işlemlerinde en önemli problemlerden biri iş bloğu ile silindirik kalıp arasındaki sürtünme olayıdır. Bu sürtünme olayı da direkt ekstrüzyon işlemi esnasında uygulanan koç kuvvetinde bir artışa neden olur. Ekstrüzyon işlemi sıcak olarak yapıldığında iş bloğunun yüzeyinde bir oksit tabakası oluşur, bu da sürtünme şiddetini artırır ve yüzeyde kusur oluşumuna neden olur.

Direkt ekstrüzyon ile içi boş kesitler üretilebilmektedir. Bu amaçla Şekil 2.7.'de gösterildiği gibi mandrel adı verilen bir parça kullanılır. Kalıp ile mandrel arasından

geçmeye zorlanan iş parçası, nihai ürün olarak delikli borular ya da yarı oyuk kesitli parça haline getirilmektedir.



Şekil 2.7. (a) Direkt ekstrüzyon, (b) kapalı kutu ve (c) açık profil ürün (Şenel, 2023).



Şekil 2.8. Endirekt ekstrüzyonla (a) katı dolu kesit ve (b) içi boş kesit üretimi (Şenel, 2023).

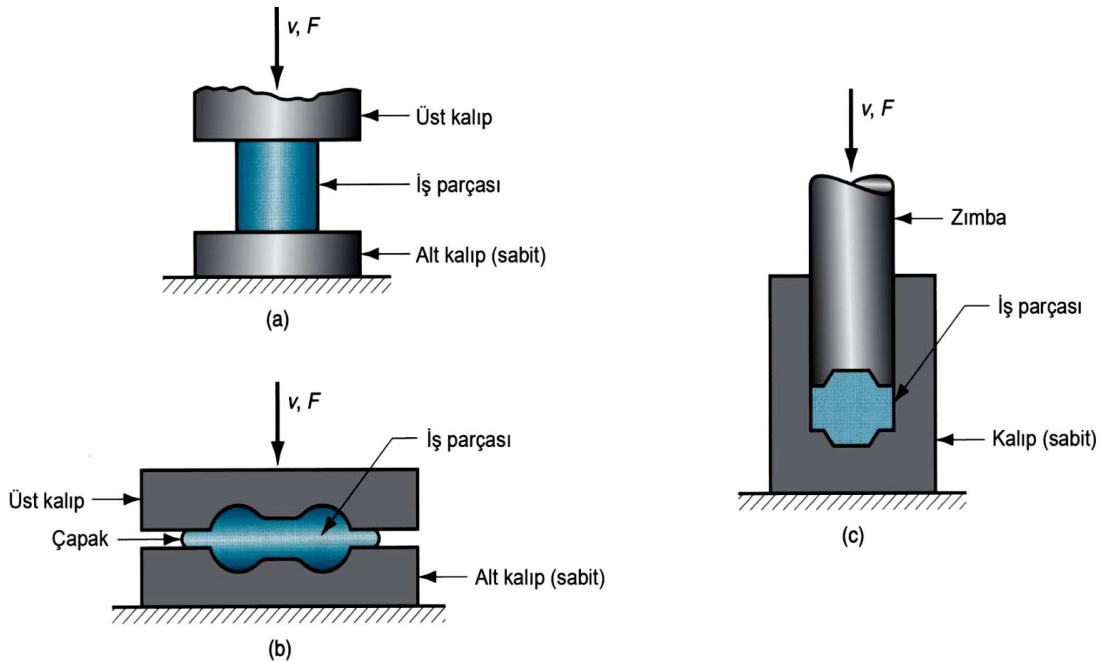
Geri ekstrüzyon ya da ters ekstrüzyon olarak da adlandırılan endirekt ekstrüzyon işleminde, metal iş bloğu koç hareketinin ters yönünde hareket etmeye zorlanmaktadır. Bu şekilde yapılan ekstrüzyon işlemi ile boru tipi yani ortası delikli ürünler elde edilmektedir (Tempelman ve ark., 2014; Bhaduri, 2018; Dixit, 2020; Groover, 2001; Raougui, 2021; Raougui, 2023; Narayanan, 2023; Şenel, 2023).

### 2.2.3. Dövme ile şekillendirme

Dövme işlemi, iki kalıp arasında basma kuvveti uygulanarak yapılan plastik şekil verme işlemidir. Milattan önce 5000’li yıllardan beri kullanılan bir yöntemdir. Otomotiv, krank, şaft, biyel, dişliler, jet motorunun türbin parçaları gibi birçok alanda kullanılan ürünlerin imalatında kullanılmaktadır.

Çeşitli şekillerde gerçekleştirilen dövme işlemleri sıcak veya yarı sıcak şekilde yapılarak iş parçası sünek hale getirilir ve şekil verme dayanımı azaltılarak kolaylıkla şekil verme işlemi gerçekleştirilebilir. Soğuk dövme işlemleri de uygulanmaktadır.

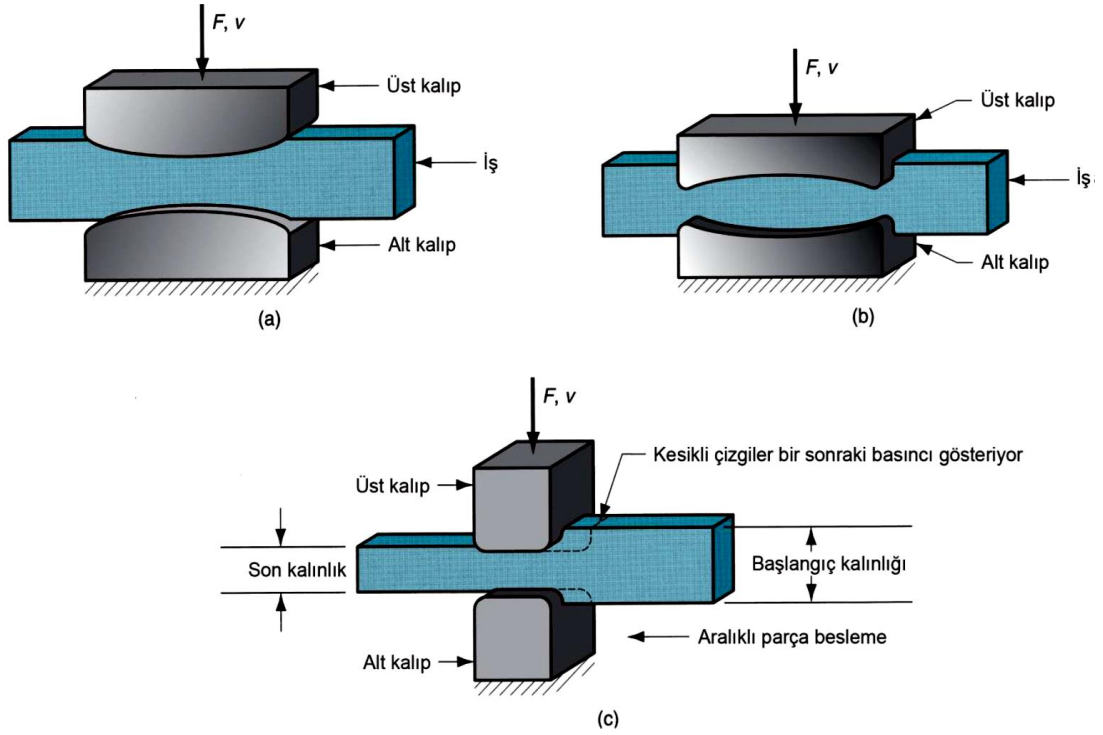
Dövme işlemleri arasındaki farklılık, iş parçasının kalıplarla kısıtlanma durumudur. Şekil 2.9.’da gösterildiği gibi açık kalıpta dövme, kapalı kalıpta dövme ve çapaksız dövme işlemleri bulunmaktadır.



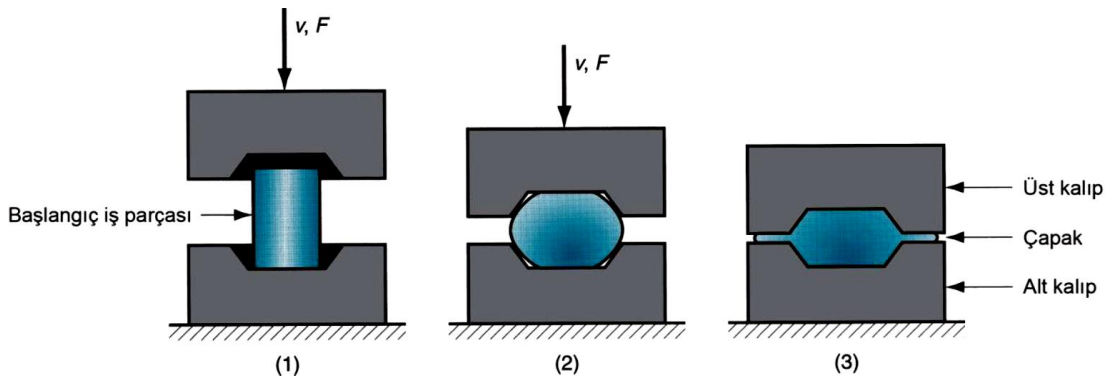
Şekil 2.9. (a) Açık kalıpta, (b) kapalı kalıpta ve (c) çapaksız dövme işlemleri (Şenel, 2023).



Yığıma olarak da isimlendirilen açık kalıpta dövme işleminde Şekil 2.10.'da gösterildiği gibi uzatma, iç bükey veya dış bükey şekillendirme işlemleri yapılmaktadır. Açık kalıpta dövmeye örnek olarak çelik endüstrisinde büyük kare döküm ingotunun şeklinin yuvarlak kesitli hale getirilmesi işlemidir.



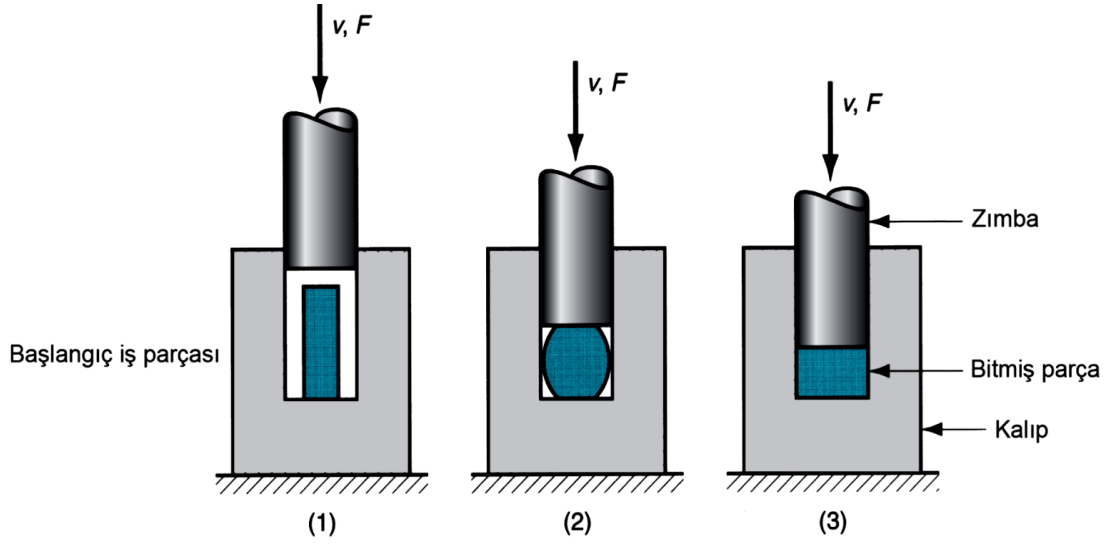
**Şekil 2.10.** Açık kalıpta (a) iç bükey, (b) dış bükey ve (c) uzatma işlemleri (Şenel, 2023).



**Şekil 2.11.** Kapalı kalıpta (1) iş parçasına basmadan önce, (2) kısmi basma işlemi ve (3) çapak oluşumuyla kalıpların kapanması (Şenel, 2023).

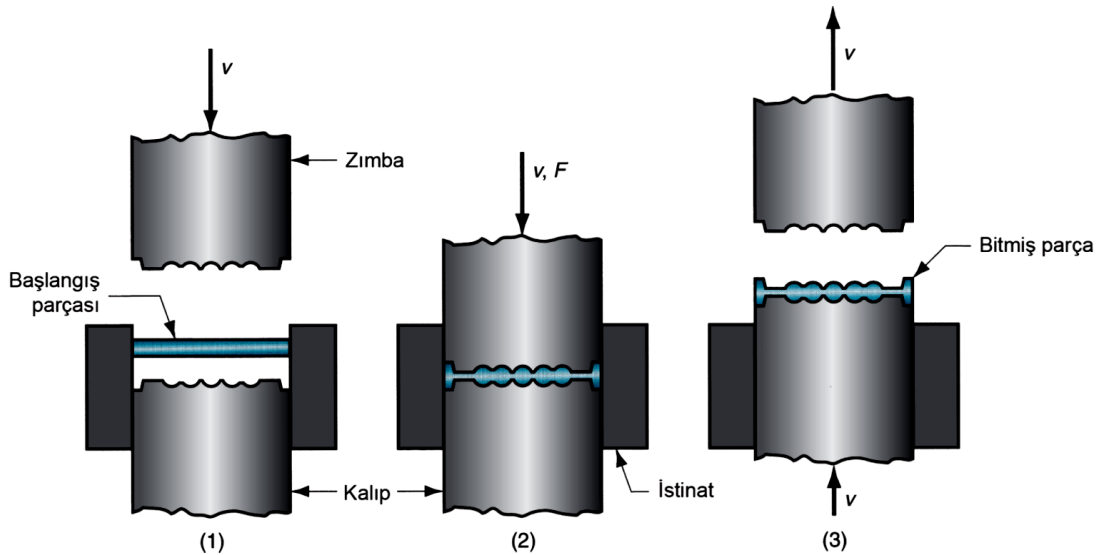
Kapalı kalıpta yapılan dövme işleminde kalıbın yüzeyleri, iş parçasının basma işleminde alacağı şekli vermektedir. Bu işlemde bir miktar metal kalıp dışına taşar ki çapak adı verilen bu kısım daha sonra iş parçasından temizlenir. Bu şekil verme işlemi

yüksek üretim hızına sahiptir. Ayrıca yüksek mukavemet ve tane yönlenmesi gibi avantajlar da sağlamaktadır.

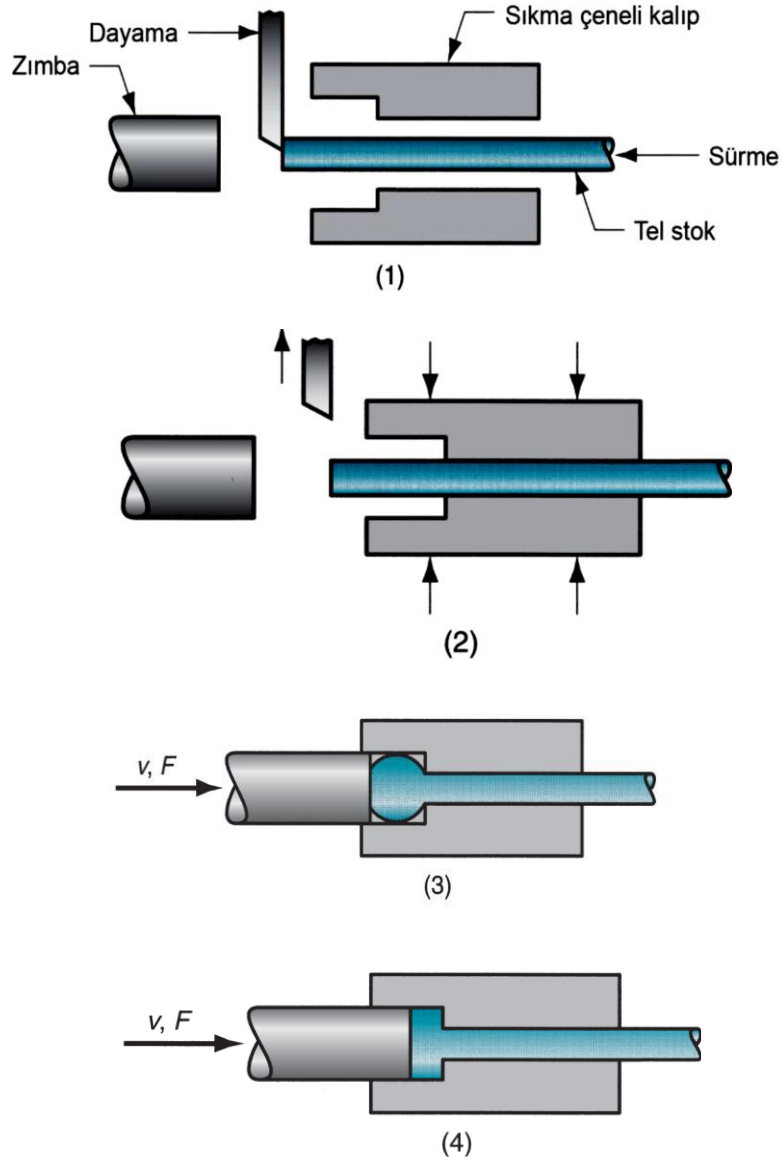


**Şekil 2.12.** Kalıpta (1) iş parçasına basmadan önce, (2) kısmi basma işlemi ve (3) çapak oluşumu olmadan zımbalama işlemi (Şenel, 2023).

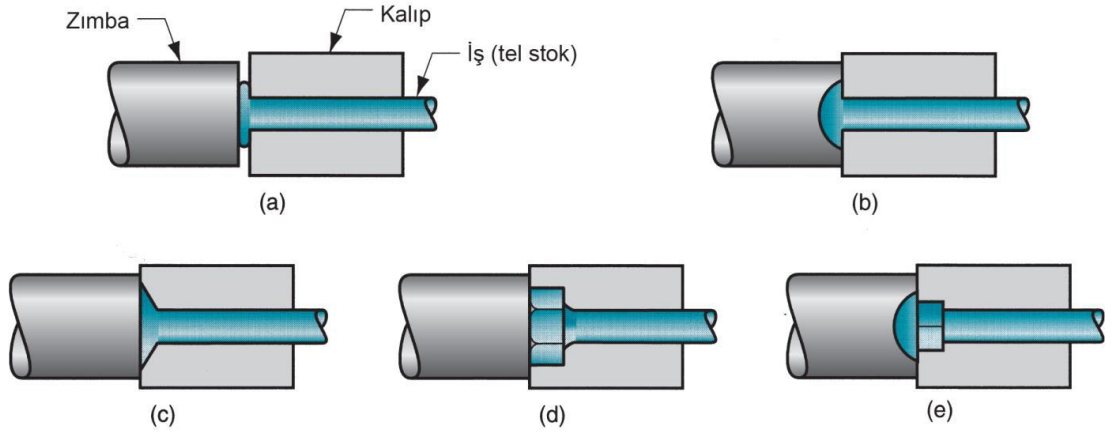
Çapaksız dövme işleminde ise iş parçası kalıp içerisinde tamamen sıkıştırılarak çapak oluşturulmaz. Ancak iş parçasının başlangıç hacmine dikkat edilmelidir. Bu işlem çok talep gören bir dövme işlemi olup basit ve simetrik parça ürünleri, alüminyum ve magnezyum alaşımları için en uygun dövme ile şekillendirme işlemidir. Çapaksız dövme işlemi, hassas dövme olarak da isimlendirilmektedir.



**Şekil 2.13.** Damgalama işlemi (1) basma öncesi, (2) damgalama işlemi ve (3) bitmiş nihai ürün (Şenel, 2023).



**Şekil 2.14.** Yığıma işlemi (1) iş parçası kalıba sürülür, (2) ve (3) tekrarlı zımbalama işlemi, (4) kafa şeklinin verilmesi (Şenel, 2023).



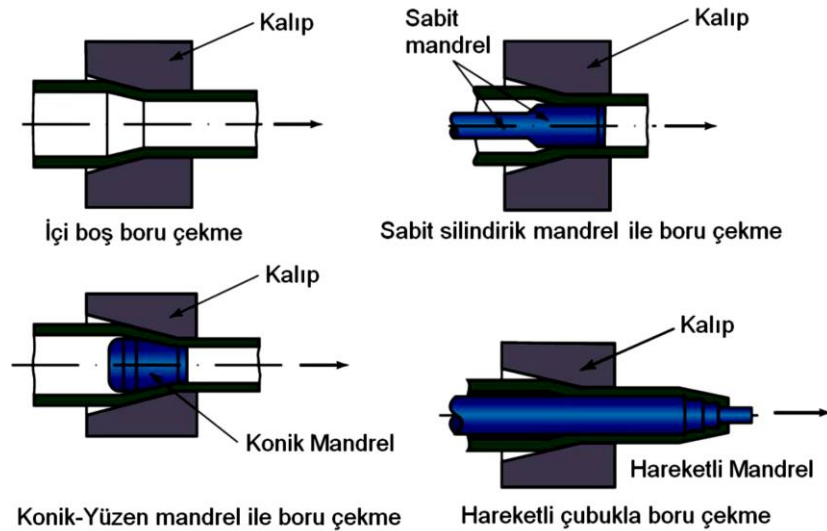
**Şekil 2.15.** Yığıma işlemi (1) iş parçası kalıba sürülür, (2) ve (3) tekrarlı zımbalama işlemi, (4) kafa şeklinin verilmesi (Şenel, 2023).





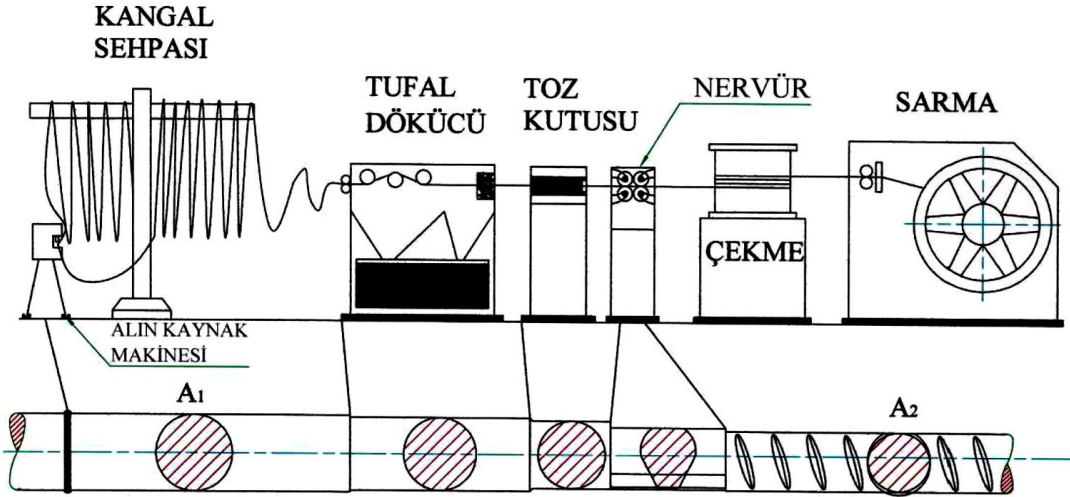
**Şekil 2.17.** Çekme öncesi çelik tel kangalları (Ay, 2023).

Pas giderme işlemi mekanik yöntemle ya da kimyasal yöntemle yapılmaktadır. Mekanik yöntemde paslı teller birbirine dik iki makara arasından geçirilerek yüzeydeki oksit tabakaları çatlatılır ve akabinde tel metal fırçalar yardımıyla temizleme işlemi yapılmaktadır. Metal bilya püskürtme yoluyla da pas tabakasını giderme işlemi yapılmaktadır. Dekapaj olarak da adlandırılan kimyasal yöntemle pas giderme işleminde sülfürik asit ve hidroklorik asit banyoları kullanılmakta, filmaşın kangalları asit banyolarına daldırılması neticesinde pas tabakasının giderilmesi işlemi yapılmaktadır. Oksit tabakasının giderilmesinden sonra ikinci adım olarak yıkama işlemi yapılmaktadır. Suyu daldırma yapılarak gerçekleştirilen bu işlemde sonra üçüncü adım olarak kireç banyosuna daldırma işlemi yapılmaktadır. Bunda amaç, filmaşinde kalan kalıntı asitlerin nötralle edilmesidir. Son kademe de kireç banyolarından çıkarılan kangallar yıkanıp kurutulularak çekme işlemine hazır hale getirilmektedir (Alkan, 2019; Ay, 2023; Çelik, 2019).



**Şekil 2.18.** Boru çekme işlemleri (Ay, 2023).

Boru çekme işlemleri tel çekme işlemlerine benzer ve bu yöntemle küçük çaplı ve ince cidarlı borular üretilebilmektedir. Şekil 2.18.'de gösterildiği gibi içi boş borular, sabit silindirik mandrel ile içi boş borular, konik mandrel ile borular ve hareketli çubukla içi boş borular üretilebilmektedir (Ay, 2023).



Şekil 2.19. Tel çekme makinesi (Yıldırım, 2019).

Tel çekme sürecinde bir ısı uygulanmadığı için soğuk şekil verme işlemidir ancak tel çekilirken soğuk şekillendirmede kangal halindeki metalin özellikleri değişirken sıcaklık da artmaktadır. Tel çekme işlemi için, çekme makinesi, tel, yağlayıcı ve matris gereklidir. Şekil 2.19.'da kuru tip tel çekme işleminin gerçekleştirildiği tel çekme makinesi gösterilmektedir (Yıldırım, 2019).

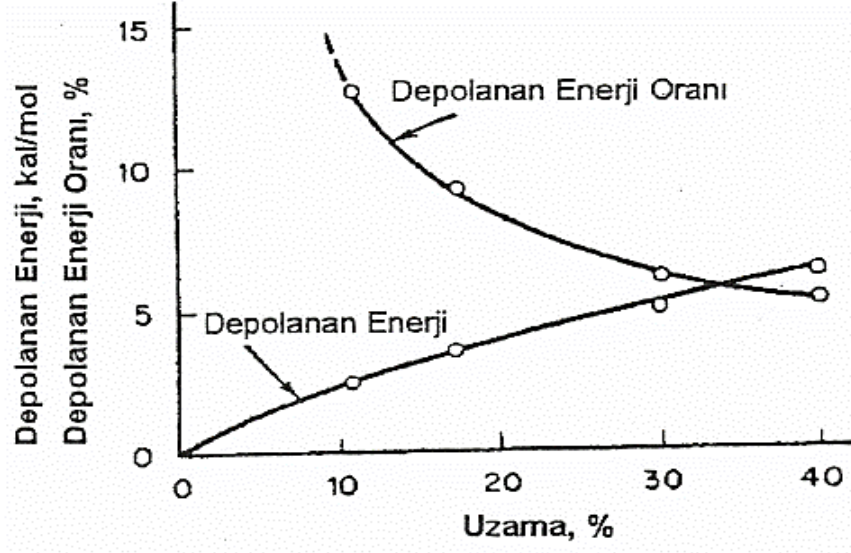
### 2.3. Yeniden Kristallenme ve Kinetik İncelemeler

Plastik şekil verme işlemleri sonrasında metalik yapılarda  $10^{10} - 10^{11}/m^2$  olan dislokasyon yoğunluğu  $10^{16}/m^2$  değerlerine çıkmaktadır. Dislokasyon yoğunluğu artışı sonrası metalik yapıların sünekliğinde azalmaya, mukavemet ve sertlik gibi mekanik değerlerinde de bir artışa neden olmaktadır. Depolanmış enerji olarak da ifade edilen kristal yapıdaki kusurların artışı metallerin ileri kademedeki şekil verme kabiliyetlerini sınırlandırmaktadır (Raabe, 2014; Raougui, 2023).

Şekil 2.20.'de saf bakırda soğuk deformasyon sonrası depolanmış enerjideki artışa bağlı olarak yapının sünekliğindeki değişim gösterilmiştir. Depolanmış enerji, soğuk şekil vermede uygulanan kuvvet sonucu oluşan enerjinin ısıya dönüşmesi ve bu enerjinin bir miktarının (yaklaşık %10) yapıda depolanması sonucu oluşan enerjidir. Şekilden görüldüğü gibi soğuk olarak gerçekleştirilen plastik şekil verme işlemleri



arttıkça yapıda depolanan enerji miktarı artmakta ve süneklik özelliği azalmakta, ileri kademedeki şekil verilebilmesi zorlaşmaktadır (Doğan, 2006; Grecu, 2021; Raougui, 2023).



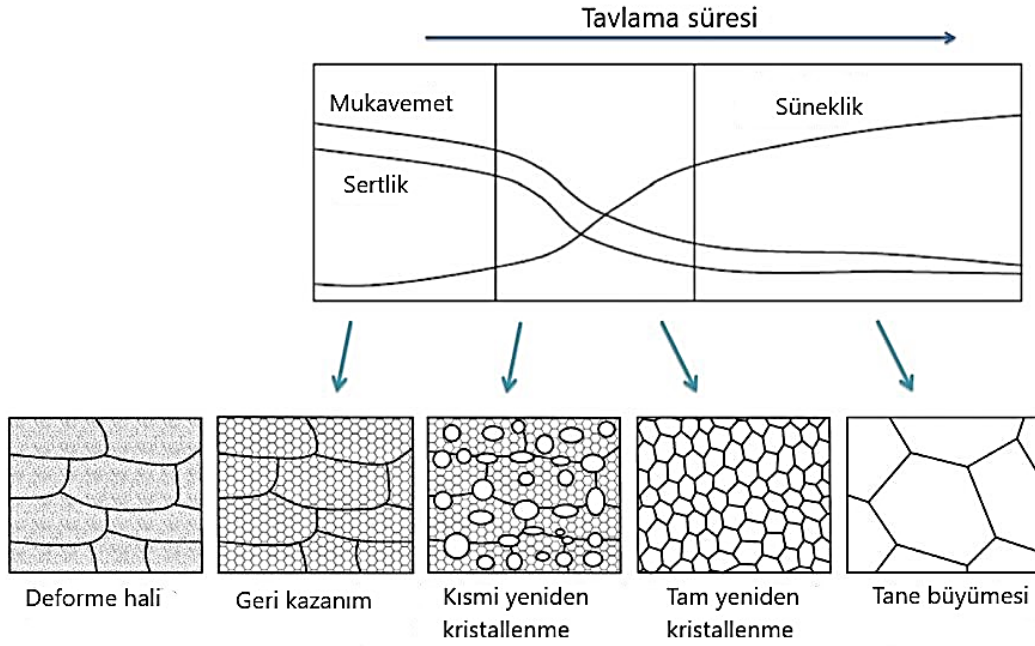
**Şekil 2.20.** Saf bakırda depolanmış enerji – uzama ilişkisi (Doğan, 2006; Grecu, 2021; Raougui, 2023).

Depolanmış enerji miktarı metal veya alaşımın tabiatına, çözünen maddenin miktarına, ikincil faz miktarına ve başlangıç tane boyuna bağlıdır. Bu değişkenler malzeme yapısına bağlıdır. İlave olarak soğuk işlem değişkenleri olarak soğuk işlem tipi, hızı ve şekil verme sıcaklığı da depolanmış enerji miktarına etki etmektedir (Çetintürk, 1993).

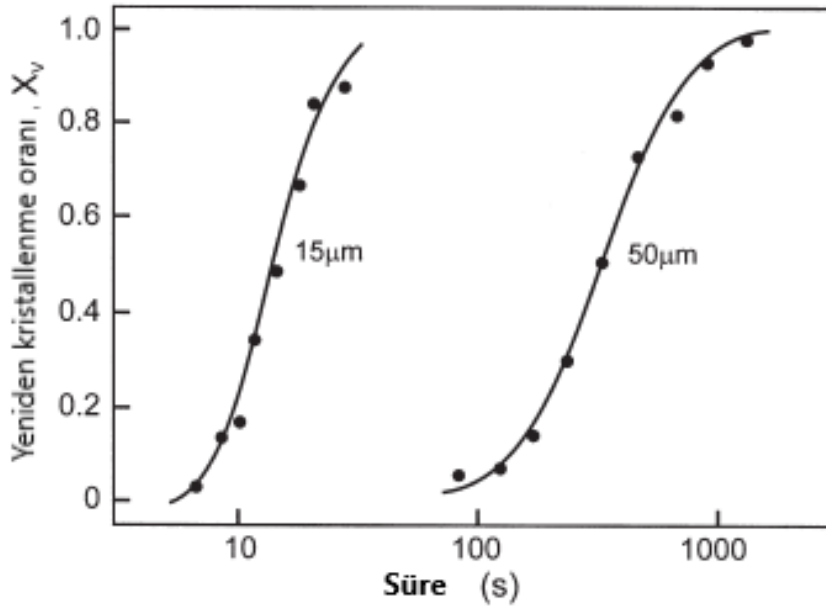
Soğuk plastik şekil verme işleminden sonra, yapının şekil verme öncesi yapıya getirilmesi, daha ileri kademedeki şekil verme işlemlerine devam edilebilmesi açısından önemlidir. Bu ısıl işleme yeniden kristallenme adı verilmektedir. Yeniden kristallenme işleminin kademeleri, buna bağlı yapıdaki mikroyapıdaki ve mekanik özelliklerdeki değişimler Şekil 2.21.'de gösterilmiştir.

Yeniden kristallenme süreci toparlanma (geri kazanım), yeniden kristallenme ve tane büyümesi olmak üzere üç temel kademe içermektedir. Toparlanma ya da geri kazanım süreci, şekil verme ile deformasyona sonrasında malzemenin mekanik özelliklerinde oluşan değişikliklerinin kısmi olarak şekil verme öncesi haline geri getirilmesi olayıdır. Toparlanma süreci akabinde gerçekleşen yeniden kristallenme sürecinde yeni taneler kristallenmeye başlar ve buna bağlı olarak süneklik özelliği artarken mukavemet değerleri azalmaktadır. Bu kademedeki hem taneler çekirdeklenmeye hem

de devamında büyüme başlar (Alaneme ve Okotete, 2018; Grecu, 2021; Humphreys ve ark., 2017; Raabe, 2014; Raougui, 2021; Smallman ve Bishop, 1999).

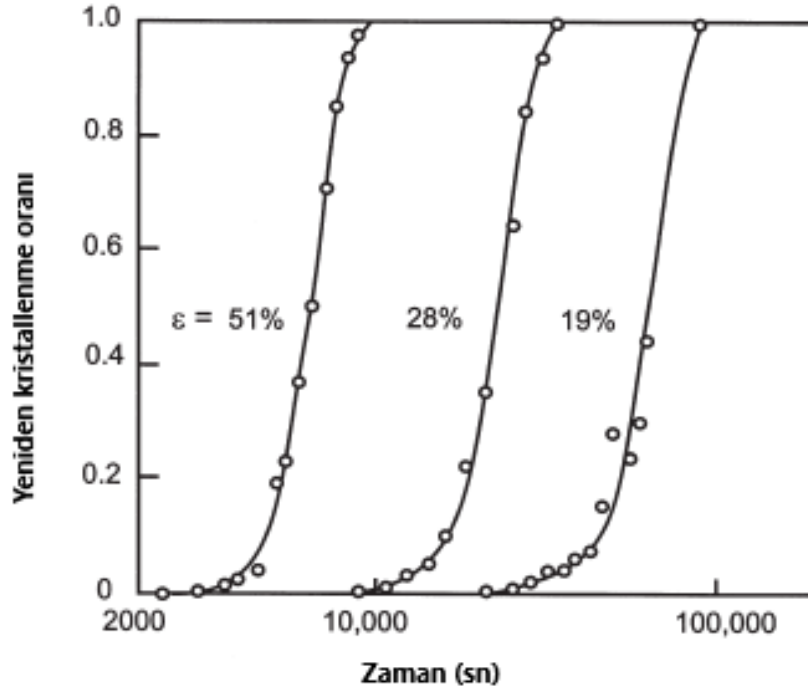


**Şekil 2.21.** Yeniden kristallenme kademelerindeki değişimler (Raabe, 2014; Raougui, 2023).



**Şekil 2.22.** Bakırda başlangıç tane boyutu ve sürenin yeniden kristallenme oranına etkisi (Humphreys ve ark., 2017; Raougui, 2023).





**Şekil 2.23.** Deformasyon miktarının alüminyumda yeniden kristallenme oranı ve süresine etkisi (Humphreys ve ark., 2017; Raougui, 2023).

Şekil 2.22.'de bakır için başlangıç tane boyutunun ve yeniden kristallenme süresinin yeniden kristallenme oranına etkisi verilmiştir. Bu şekile göre başlangıçta daha küçük tane boyutuna sahip malzemelerde daha çok tane sınırı olması nedeniyle ve bu tane sınırlarının çekirdekleşme olayını teşvik etmesi nedeniyle daha kısa sürede yeniden kristallenme olayının gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 2.23.'de ise alüminyumda farklı deformasyon oranlarının ve sürenin yeniden kristallenme oranına etkisi gösterilmiştir. Bu şekile görede plastik şekil verme ile sağlanan deformasyon oranının artması ile dislokasyon yoğunluğunun artması ile depolanmış enerji miktarı artmakta, buna bağlı olarak yeniden kristallenme davranışı daha erken başlamakta ve süreç daha kısa sürede tamamlanmaktadır (Grecu, 2021; Humphreys ve ark., 2017; Raougui, 2021; Raougui, 2023).

Yeniden kristallenme süreci için;

- Yeniden kristallenmenin sürecinin başlaması için deformasyon oranının minimum bir kritik değere ulaşması ve itici güç için gerekli depolanmış enerjinin bulunması gereklidir
- Kritik miktarda deformasyon miktarı, itici gücün düşük ve iç yapının kaba taneli olmasına neden olur

- Daha düşük deformasyon oranları sonrasında yeniden kristallenme sıcaklığı da artmaktadır
- Ergime sıcaklığı yüksek olan metallerde atom bağları daha kuvvetli olması nedeniyle gerekli yeniden kristallenme sıcaklıkları da artmaktadır.

Yeniden kristallenme sürecine etki eden temel faktörler;

- Deformasyon miktarı
- Sıcaklık
- Zaman
- Başlangıç tane boyutu
- Çözelti ve ikinci faz partiküllerinin bileşimidir.

Yeniden kristallenmede sürecinde;

- Minimum miktarda soğuk deformasyon gerekmektedir
- Deformasyon miktarına bağlı olarak yeterli yükseklikte yeniden kristallenme sıcaklığı gereklidir
- Isıl işlem süresinin artması ile yeniden kristallenme sıcaklığı düşer
- Nihai tane boyutu deformasyon oranına, sıcaklığa ve süreye bağlıdır
- Metalde saflık derecesi arttıkça yeniden kristallenme sıcaklığı düşer
- Yeniden kristallenme ısıl işleminde sürenin artması ile tane boyutunda artma gözlenir (Çetintürk, 1993).

### **3. MALZEME VE YÖNTEM**

#### **3.1. Malzeme**

Kocaeli'nin Kartepe ilçesinde bulunan Çelik Halat ve Tel Sanayi A.Ş. firmasından C55 çelik telden 5.50 mm çapındaki başlangıç malzemesi ve aynı çeliğin soğuk çekme ile 3 mm çapa getirilmiş numuneler Şekil 3.1.'de, yine aynı firmadan C83 çelik telden 5.50 mm çapındaki başlangıç malzemesi ve soğuk çekme ile 3.20 mm çapa getirilmiş numuneler Şekil 3.2.'de verilmiştir.

#### **3.2. Yöntem**

##### **3.2.1. Metalografi çalışmaları**

Başlangıç ve soğuk çekme işlemine tabi tutulmuş C55 ve C83 çelik tel numunelerin metalografik incelemeleri için çekme yönündeki kesitlerden parçalar alınmış ve soğuk bakalite alma işlemleri yapılmıştır. Metalografi incelemelerinden önce bakalite alınmış numunelerde zımparalama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sulu ortamda ve kademeli aşındırıcılar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zımparalama işlemlerinin takibinde alumina aşındırıcı kullanılarak parlatma işlemleri yapılmıştır. En son kademede de nital çözeltisi ile dağlama yapılarak metalografik çalışmalarla optik mikroskop görüntüleri alınmıştır.

##### **3.2.2. Çelik tellerde deformasyon hesaplamaları**

C55 ve C83 çelik tellerde soğuk deformasyon miktarını ( $\epsilon$ ) tespit etmek için denklem (3.1) kullanılmıştır. Bu denklemde  $A_0$  başlangıç kesit alanı,  $A_s$  ise soğuk çekme sonrası kesit alanıdır. Bu denklem yerine çap kullanıldığında denklem (3.2) elde edilmektedir.

$$\epsilon = \ln \left( \frac{A_0}{A_s} \right) \quad (3.1)$$

$$\epsilon = \ln \left( \frac{d_0^2}{d_s^2} \right) \quad (3.2)$$



**Şekil 3.1.** Deneysel çalışmalarda kullanılan C55 çelik tel numuneler.



**Şekil 3.2.** Deneysel çalışmalarda kullanılan C83 çelik tel numuneler.

Bu denkleme bağı olarak C55 çelik telde başlangıç çapı 5.50 mm ve soğuk çekme sonrası çapı 3.00 mm'dir. Bu durumda C55 çelik telde soğuk çekme ile gerçekleşen deformasyon miktarı ( $\epsilon=1,21$ ) % 121 ve C83 çelik telde soğuk çekme ile gerçekleşen deformasyon miktarı ( $\epsilon=1,08$ ) % 108 olarak tespit edilmiştir.

### 3.2.3. Termal analiz ile yeniden kristallenme kinetiği

Endüstriyel çalışmalarda aktivasyon enerjisi, reaksiyon hızı ve reaksiyon derecesi gibi kinetik veriler çok önemlidir. Bu kinetik veriler statik ya da dinamik deneysel çalışmalarla elde edilebilmektedir. Bunlardan dinamik kinetik inceleme, reaksiyon mekanizmasını detaylı araştırmadan ve modelsiz kinetik analiz olarak da adlandırılan izotermal olmayan kinetik analiz modelleri geliştirilmiştir.

Termogravimetri (TG), diferansiyel termal analiz (DTA) ve diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) gibi temel termal analiz yöntemleri kullanılarak yapılan kinetik incelemelere izotermal olmayan kinetik inceleme adı verilmektedir. Statik kinetik incelemelerde, kinetik incelemesi yapılan malzeme ısıtıldığı süreçte zaman kavramı devreye girmektedir. Ayrıca birden fazla reaksiyonun meydana geldiği durumlarda da sıkıntı oluşmaktadır. İzotermal olmayan dinamik kinetik analizlerde ise bu sıkıntılar ortadan kaldırılmaktadır (Raougui, 2023; Zhang, 2021).

Metalik malzemelerde birçok metalurjik olayların (yeniden kristallenme, çökeltme, homojenizasyon, faz dönüşümleri vb.) kinetik incelemelerinde termal analiz yöntemleri kullanılabilir (Starink, 2004).

Bu tez çalışmasında soğuk çekilmiş C55 ve C83 çelik tellerde yeniden kristallenme kinetiği, DSC kullanılarak ve Kissenger (Kissenger, 1957), Boswell (Boswell, 1980), Ozawa (Ozawa, 1992) ve Starink (Starink, 2004) gibi izotermal olmayan kinetik analiz ile incelenmiştir. Soğuk çekilmiş tellerin 5 – 10 – 15 – 20 °C/dak ısıtma hızlarında DSC ile termal analizleri alınmıştır. Bu analizlerin grafiklerinden tespit edilen yeniden kristallenme pik sıcaklıkları göz önüne alınarak kinetik analizler yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan denklemler;

Kissenger kinetik denklemi;

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right) = k_1 - \frac{E_a}{RT_p} \quad (3.3)$$

Boswell kinetik denklemi;

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p}\right) = k_2 - \frac{E_a}{RT_p} \quad (3.4)$$

Ozawa kinetik denklemi;

$$\ln(\beta) = k_3 - 1,051 \cdot \frac{E_a}{RT_p} \quad (3.5)$$

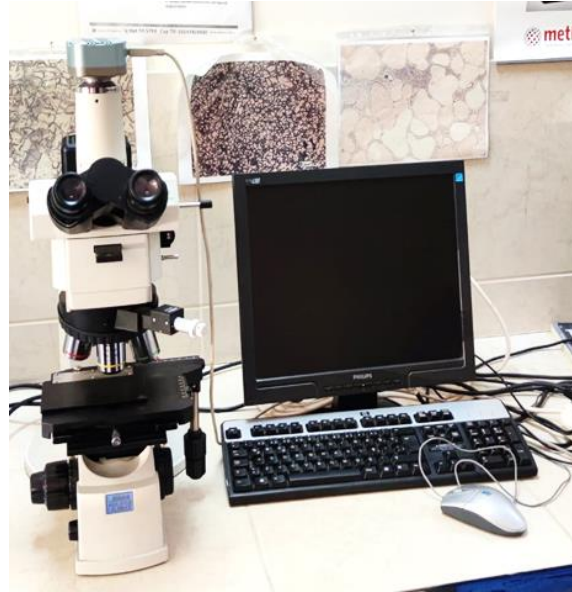
Starink kinetik denklemi;

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^{1,92}}\right) = -k_4 - 1,0008 \cdot \frac{E_a}{RT_p} \quad (3.6)$$

Bu denklemlerde  $T_p$  pik sıcaklığı (K),  $\beta$  ısıtma hızı (K/dak),  $E_a$  aktivasyon enerjisi (kJ/mol),  $R$  gaz sabiti (8,314 jul/mol.K) ve  $k$  değerleri ( $k_1, k_2, k_3, k_4$ ) sabitlerdir.

### 3.3. Kullanılan Cihazlar

Metalografik çalışmalar Şekil 3.3.'de gösterilen Nikon ECLIPSE L150 optik mikroskobu ile yapılmıştır. Uygun zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri sonrasında optik mikroskop görüntüleri alınmıştır.



Şekil 3.3. Nikon ECLIPSE L150 optik mikroskobu.

Hem başlangıç hem de soğuk çekilmiş C55 ve C83 çelik tellerin mekanik değerlerindeki değişimleri incelemek için Şekil 3.5.'de gösterilen Instron marka cihazla 3 ton yük altında çekme testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4. INSTRON marka çekme cihazı.



Şekil 3.5. HITACHI STA 7300 marka termal analiz cihazı.

Yeniden kristallenme kinetiğinin inceleneceği soğuk çekilmiş C55 ve C83 çelik tellerin termal analizleri Şekil 3.5.'de gösterilen Hitachi STA 7300 cihazı kullanılarak ve farklı ısıtma hızlarında (5, 10, 15 ve 20 °C/dak) yapılmıştır.



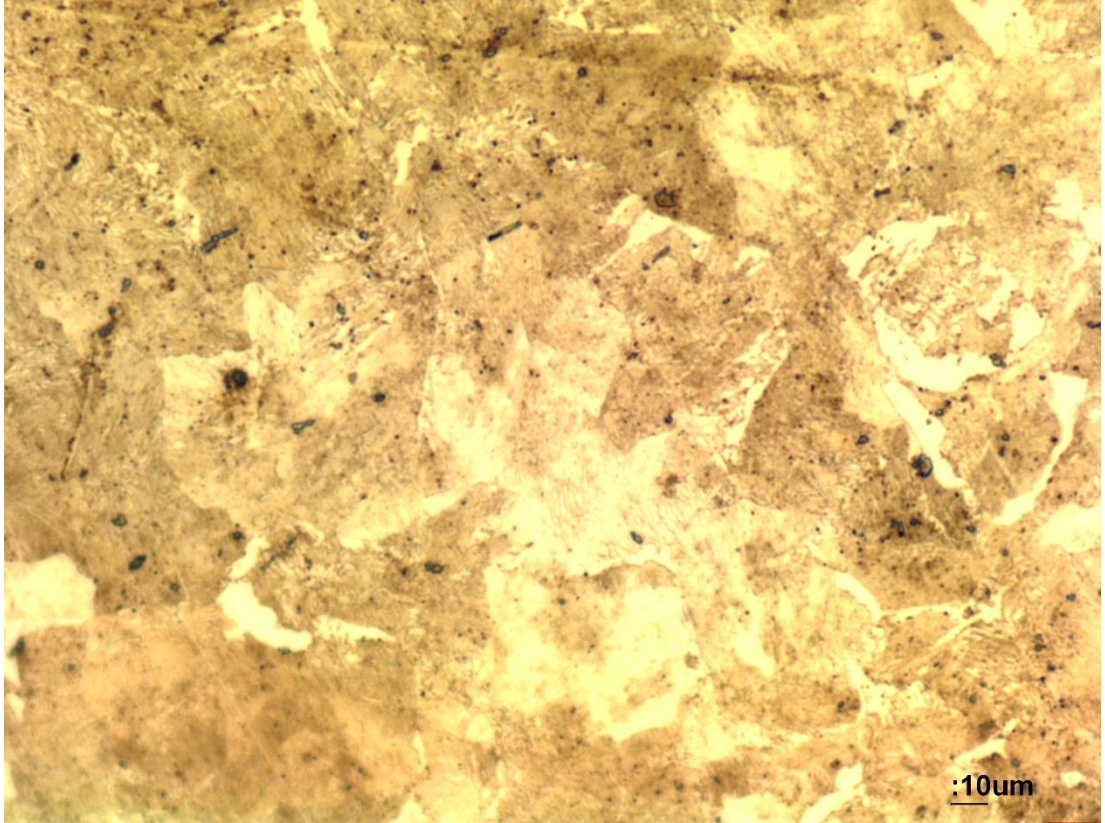


## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

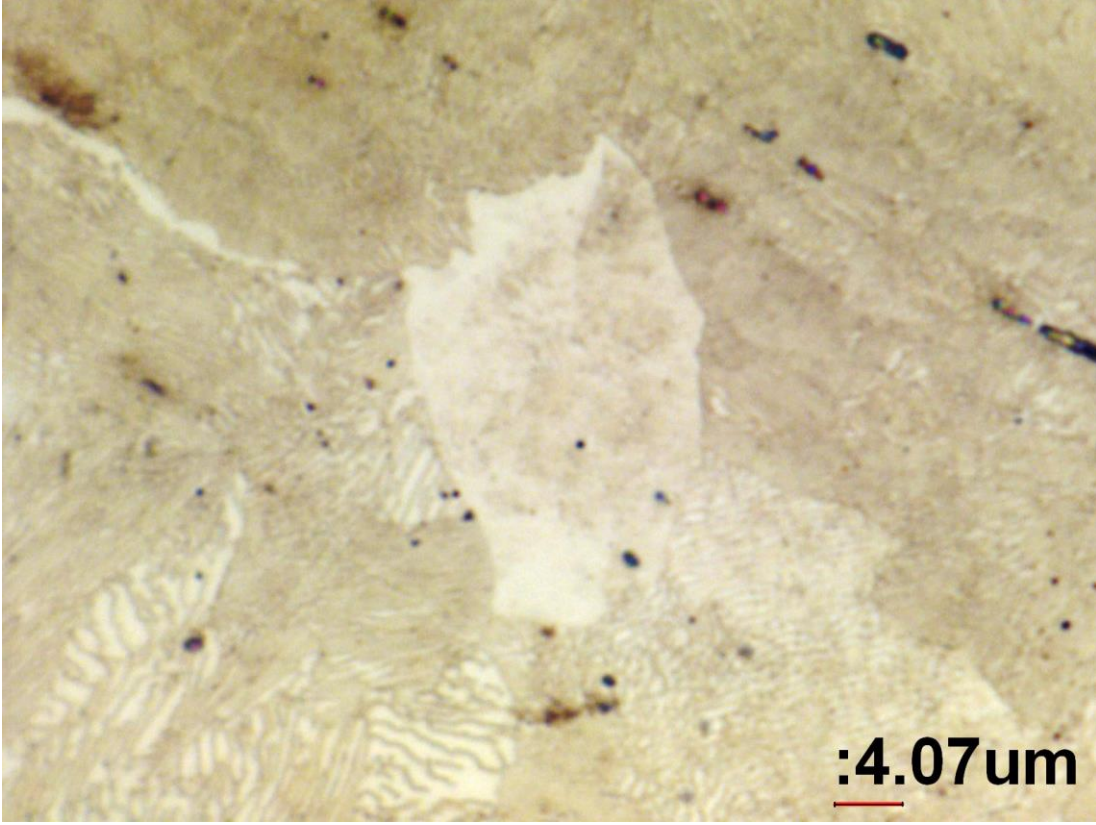
### 4.1. Metalografik alıŐmalar

Başlangıç C55 elik telinin ( $\phi$  5.5 mm) ve % 121.2 oranında soğuk çekilmiş elik telin ( $\phi$  3 mm) optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.1. – Şekil 4.4.'de, Başlangıç C83 elik telinin ( $\phi$  5.5 mm) ve % 108.3 oranında soğuk çekilmiş telin ( $\phi$  3.2 mm) optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.5. – 4.8.'de verilmiştir.

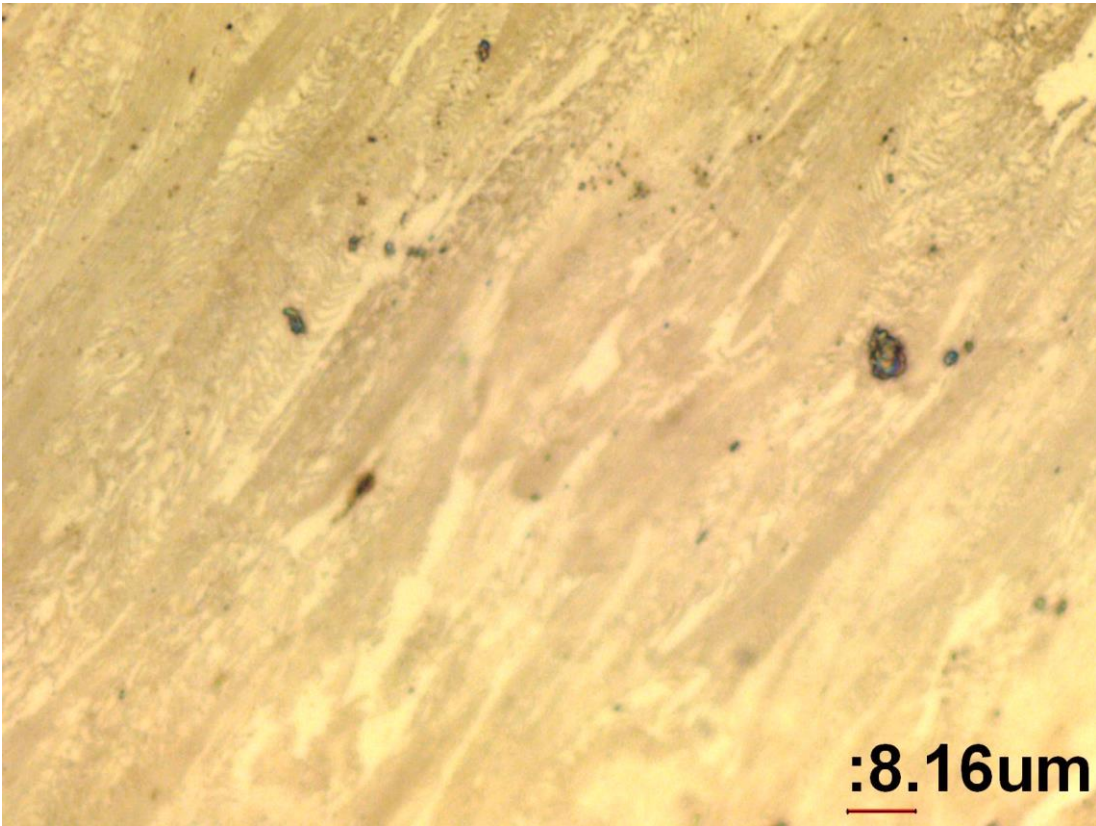
Metalografik incelemelerde elde edilen optik mikroskop görüntülerine göre hem C55 hem de C83 elik tellerde, soğuk çekme işlemi sonrasında tanelerin çekme yönünde uzadığı görülmektedir. Tanelerin soğuk deformasyon sonrasında dislokasyon yoğunluğunun arttığı, bu sayede sünekliğin azalarak mukavemet değerlerinin artması gözlenmektedir.



**Şekil 4.1.** C55 elik telin optik mikroskop görüntüsü (X500).

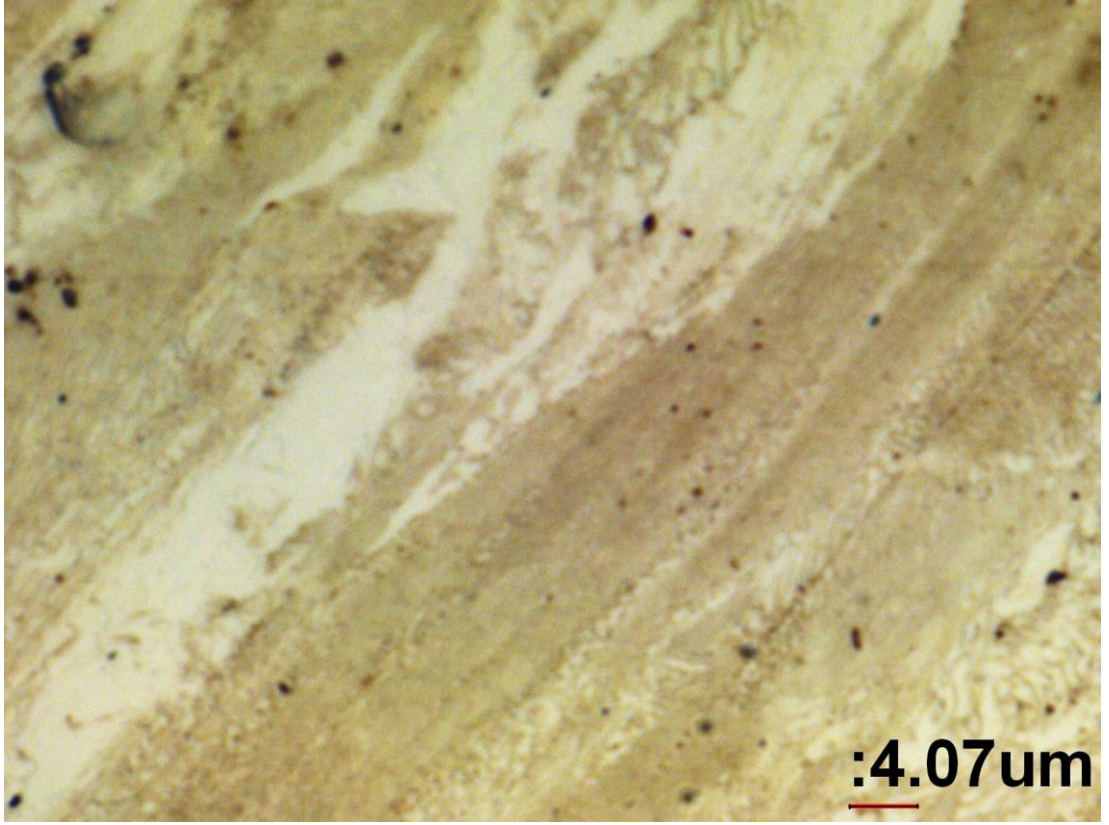


Şekil 4.2. C55 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X1000).

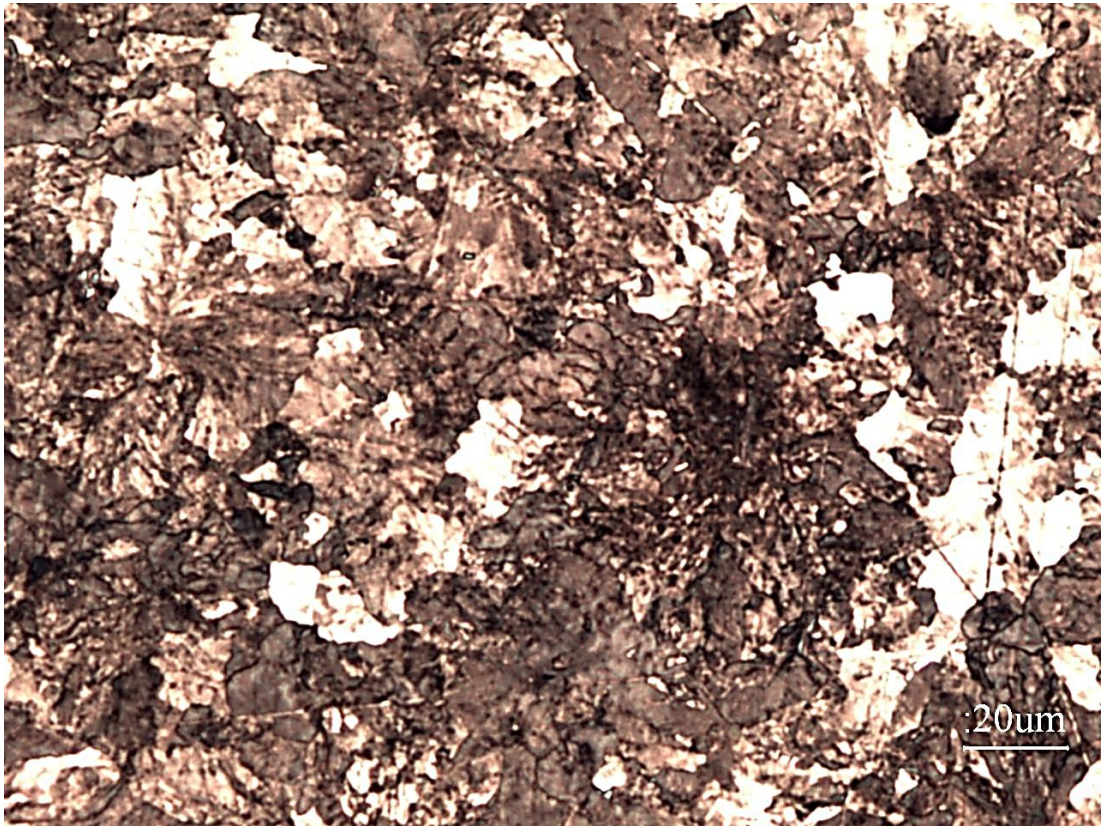


Şekil 4.3. Soğuk çekilmiş C55 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X500).



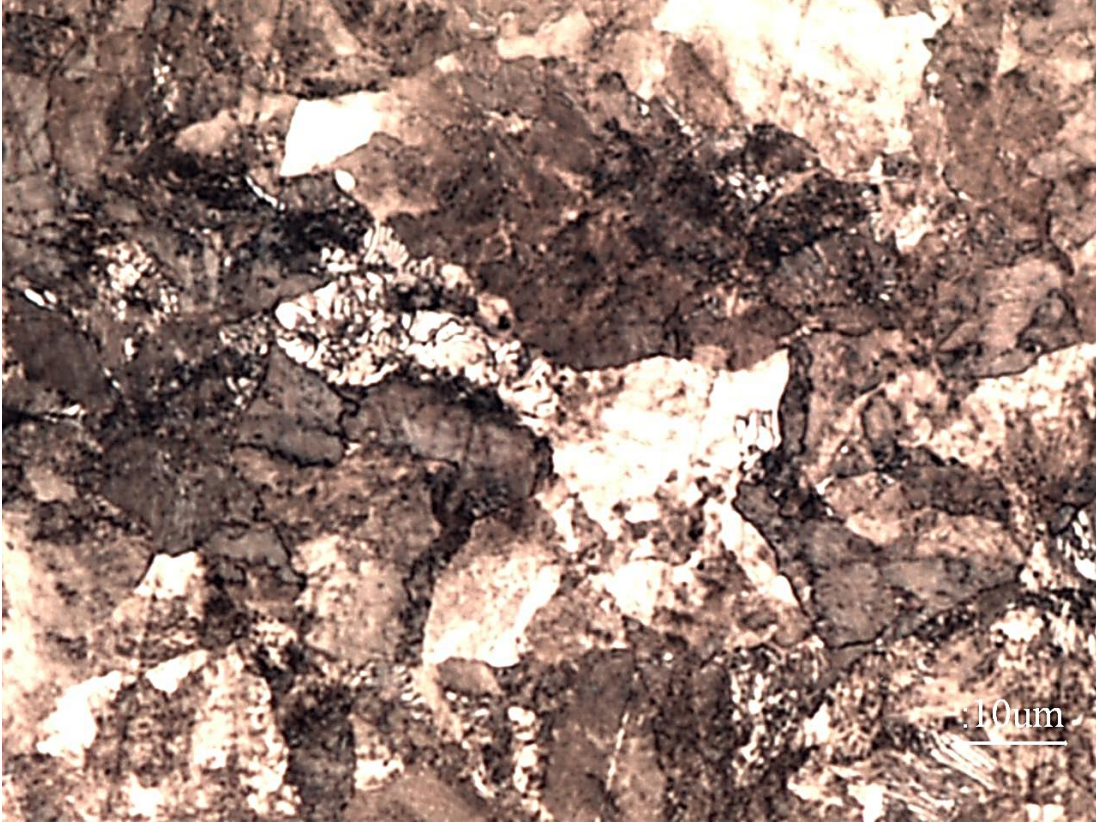


Şekil 4.4. Soğuk çekilmiş C55 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X1000).

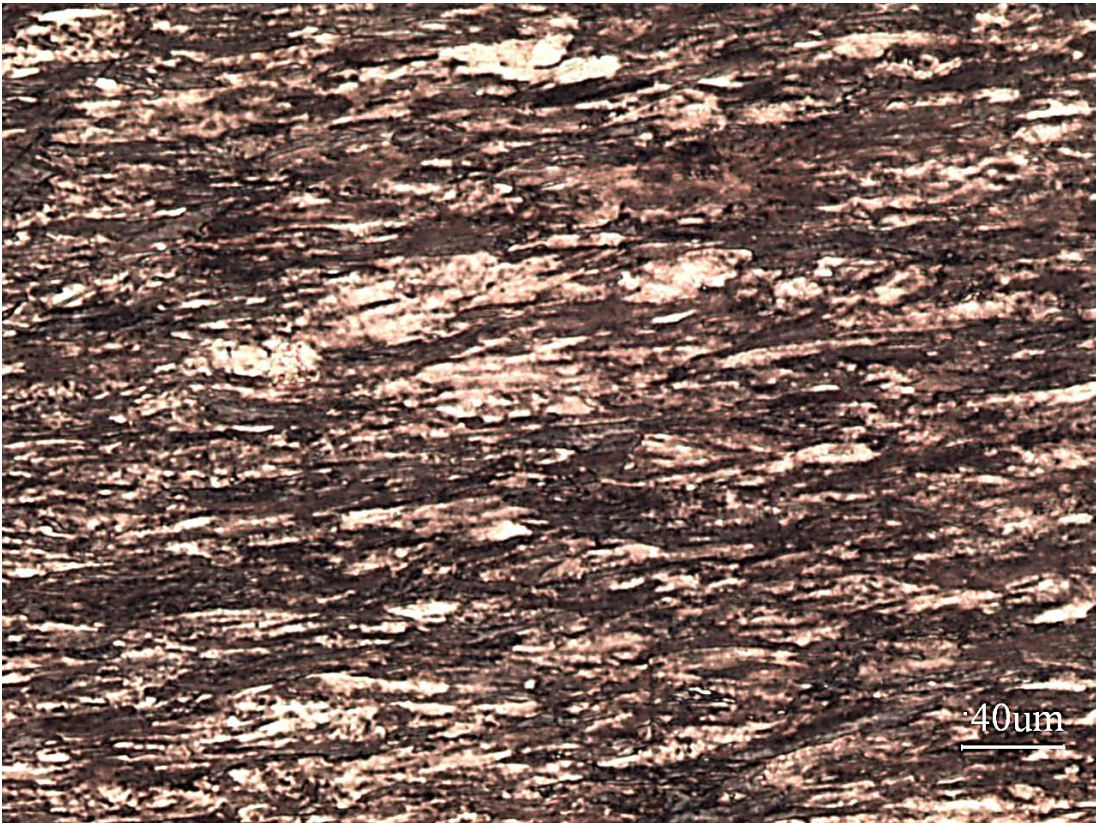


Şekil 4.5. C83 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X200).



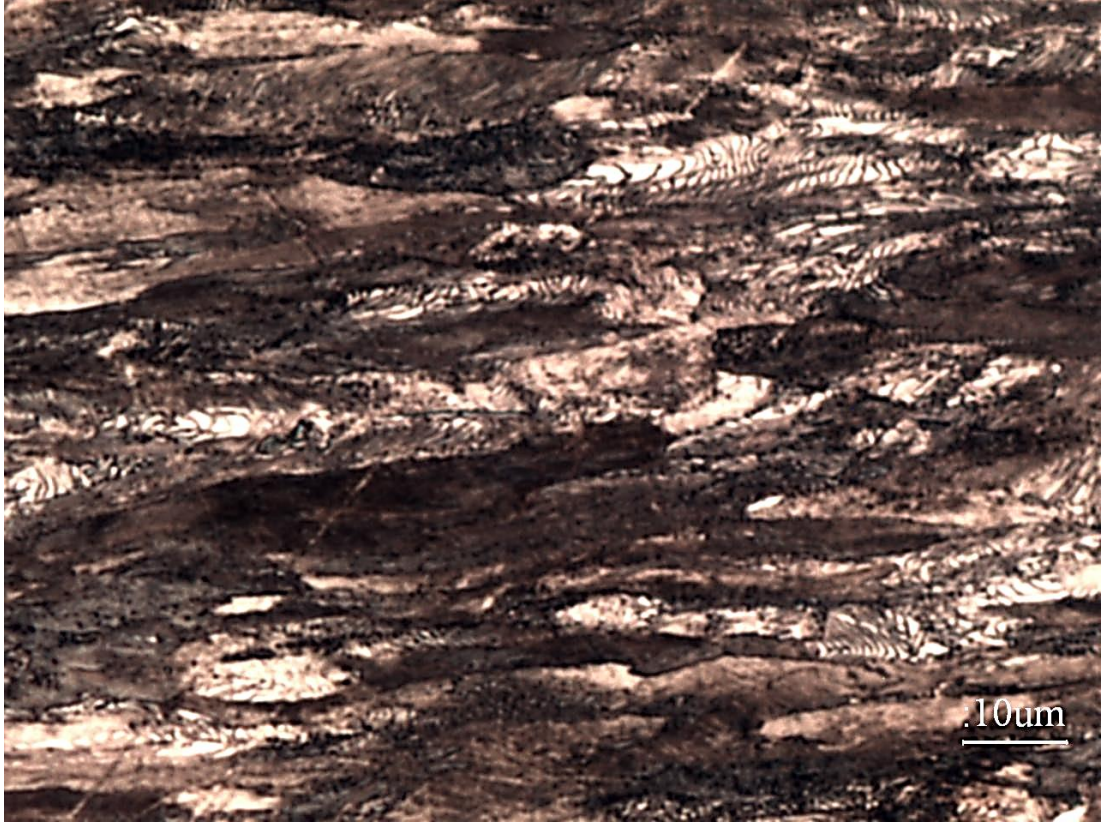


Şekil 4.6. C83 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X500).



Şekil 4.7. Soğuk çekilmiş C83 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X1000).





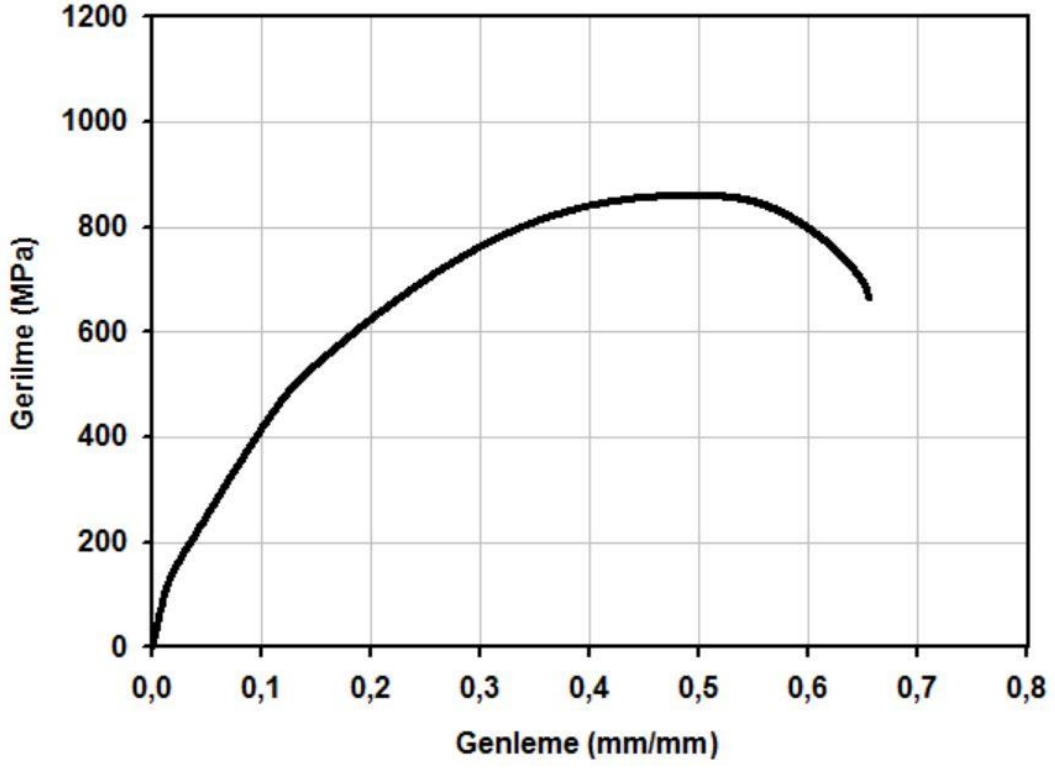
**Şekil 4.8.** Soğuk çekilmiş C83 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X500).

#### **4.2. Soğuk Çekmenin Mekanik Özelliklere Etkisi**

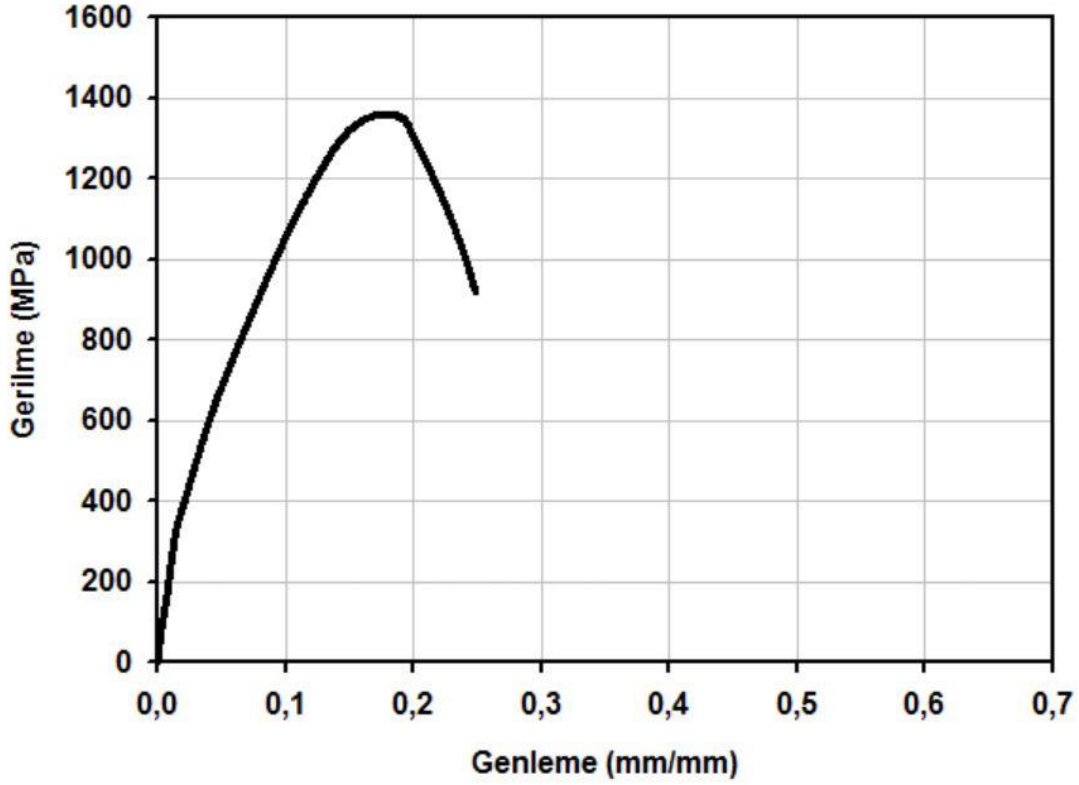
Başlangıç C55 çelik telin gerilme – genleme diyagramı Şekil 4.9.’da, soğuk çekme sonrasında %121.2 oranında soğuk deformasyona uğramış C55 çelik telin gerilme – genleme diyagramı Şekil 4.10.’da, hem soğuk çekme öncesi hem de soğuk çekme sonrası C55 çelik tellerin gerilme – genleme diyagramları birlikte Şekil 4.11.’de verilmiştir.

Başlangıç C83 çelik telin gerilme – genleme diyagramı Şekil 4.12.’de, soğuk çekme sonrasında %108.3 oranında soğuk deformasyona uğramış C83 çelik telin gerilme – genleme diyagramı Şekil 4.13.’de, hem soğuk çekme öncesi hem de soğuk çekme sonrası C83 çelik tellerin gerilme – genleme diyagramları birlikte Şekil 4.14.’de verilmiştir.

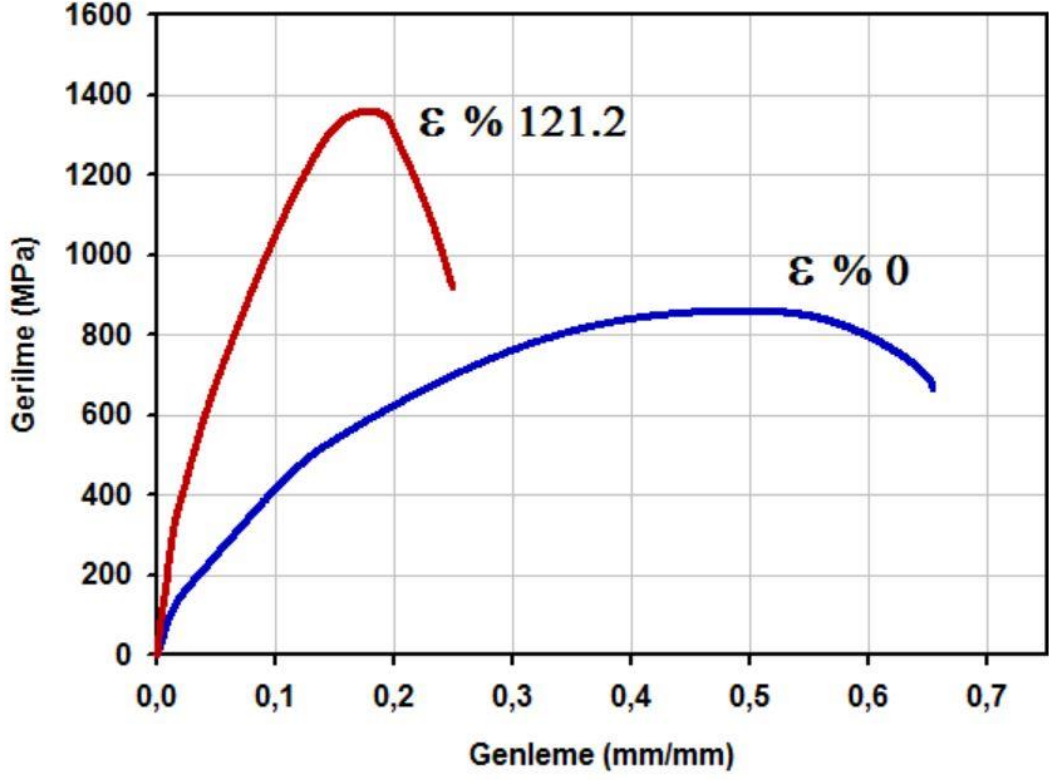
Tablo 4.1.’de ise başlangıç ve soğuk çekilmiş C55 ve C83 çelik tellerin çekme mukavemeti ve % uzama değerleri listelenmiştir.



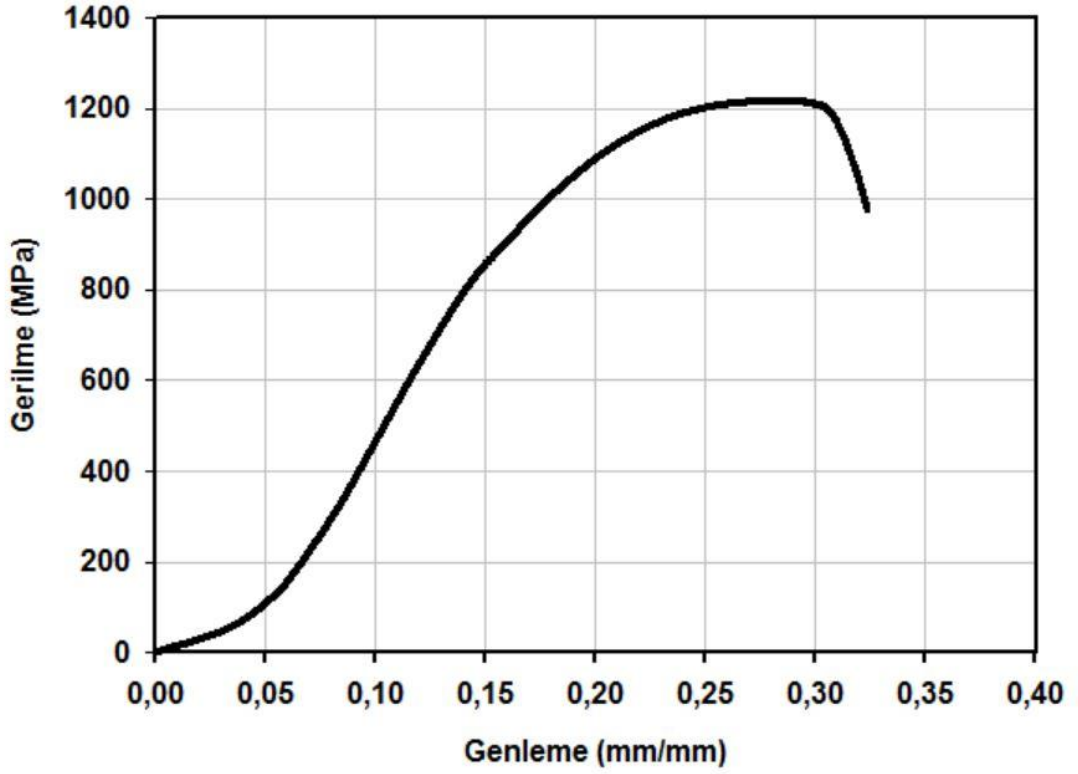
Şekil 4.9. C55 çelik telin gerilme - genleme diyagramı.



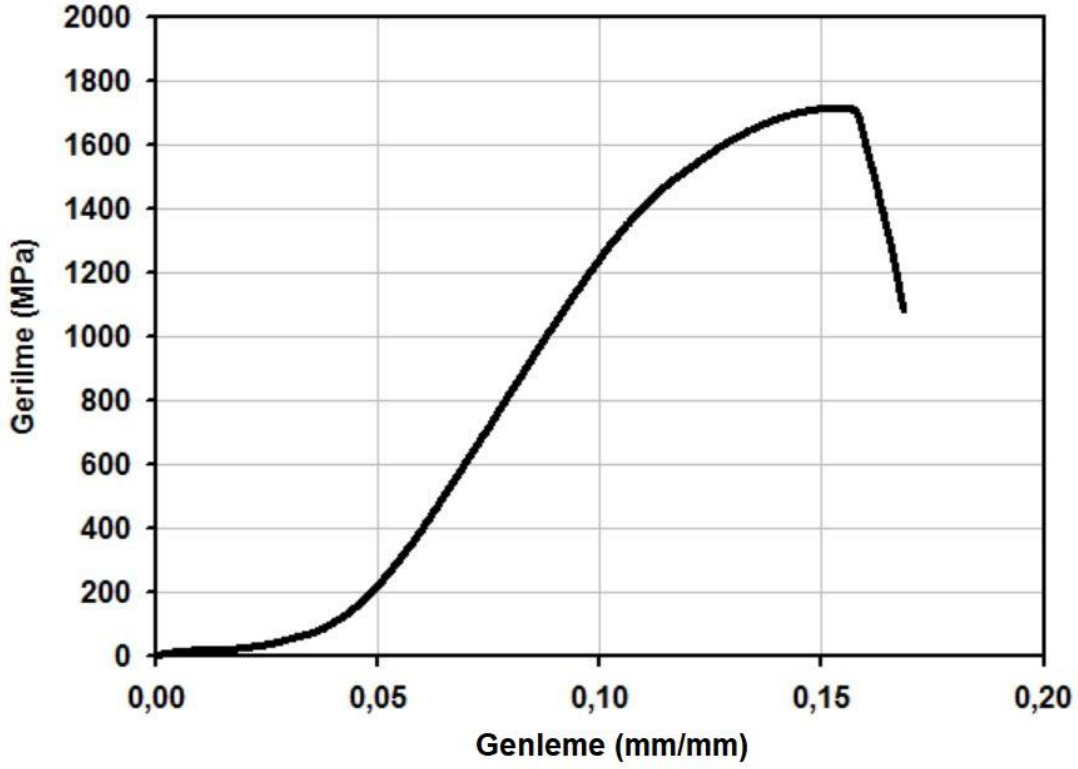
Şekil 4.10. %121,2 oranında soğuk çekilmiş C55 çelik telin gerilme - genleme diyagramı.



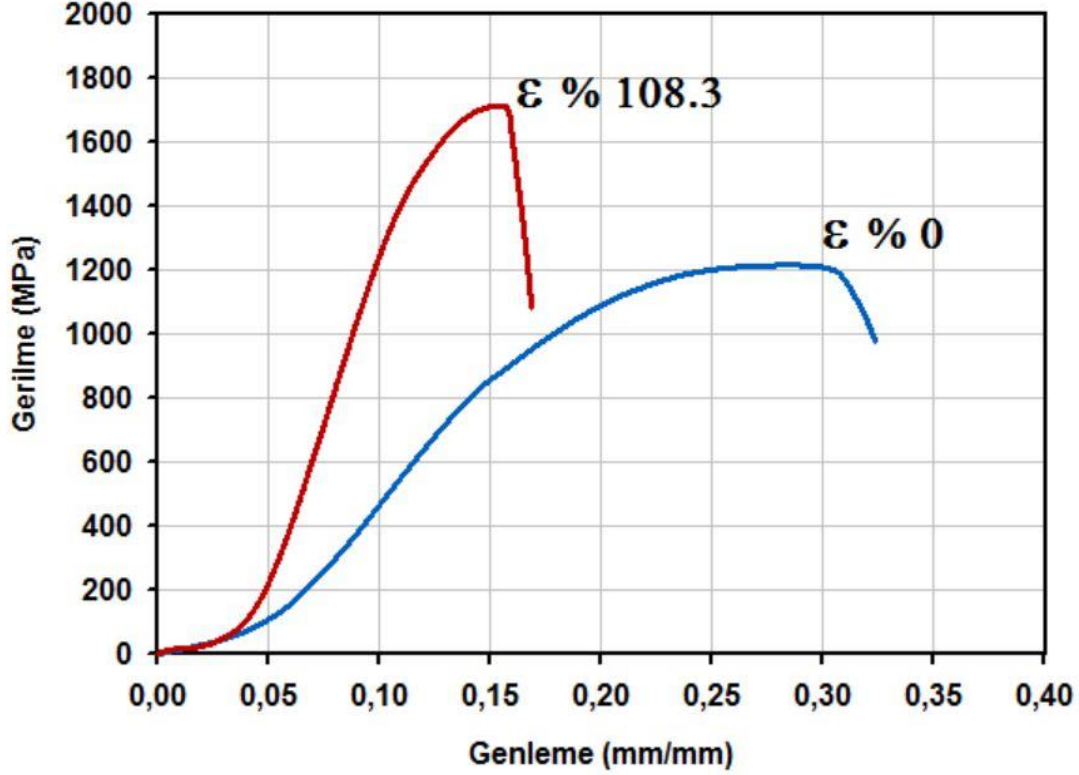
Şekil 4.11. Başlangıç ve soğuk çekilmiş C55 çelik tellerin gerilme - genleme diyagramı.



Şekil 4.12. C83 çelik telin gerilme - genleme diyagramı.



Şekil 4.13. %108.3 oranında soğuk çekilmiş C83 çelik telin gerilme - genleme diyagramı.



Şekil 4.14. Başlangıç ve soğuk çekilmiş C83 çelik telin gerilme - genleme diyagramı.



**Tablo 4.1.** C55 ve C83 çelik tellerde soğuk deformasyon sonrası çekme mukavemeti ve süneklik özelliklerindeki değişimler.

Çelik Türü	Deformasyon Oranı (%)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Süneklik (%)
C55	0	859.2	65.8
	121.2	1358.2	24.7
C83	0	1216.7	32.4
	108.3	1717.5	16.8

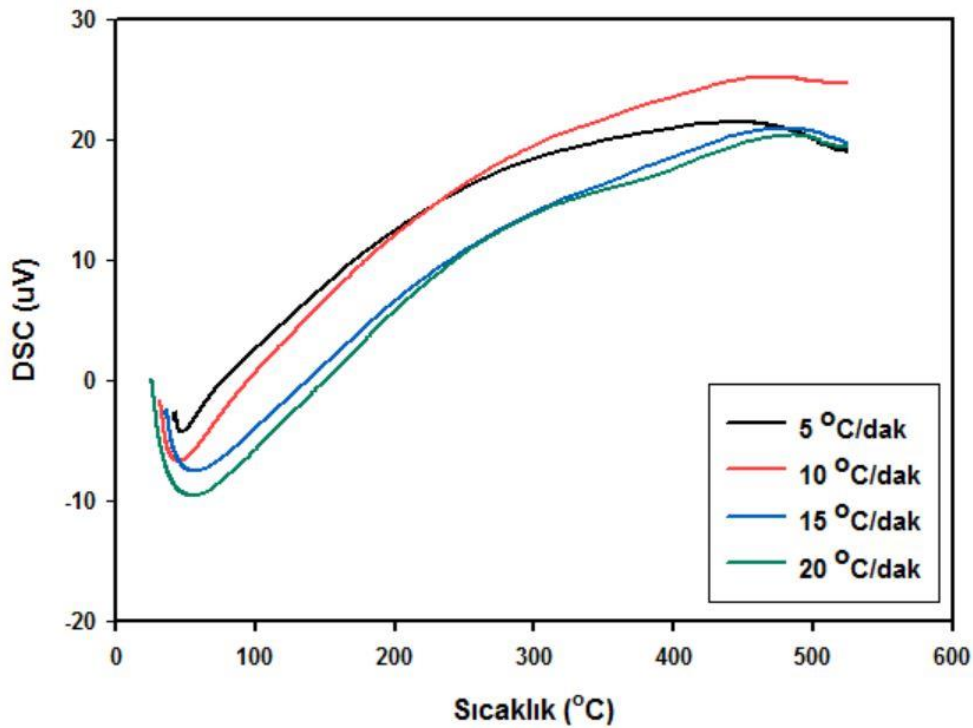
Şekil 4.9., Şekil 4.10. ve Şekil 4.11.'den görüldüğü gibi başlangıç C55 çelik telin çekme mukavemeti 859.2 MPa ve uzama yüzdesi %65.8 olarak tespit edilmiştir. C55 çelik telin %121.2 oranında soğuk deformasyonu sonrasında çekme mukavemeti değeri 1358.2 MPa değerine artarken uzama yüzdesi %24.7 değerine düşmüştür. Benzer şekilde Şekil 4.12., Şekil 4.13. ve Şekil 4.14. grafiklerinden de başlangıç C83 çelik telin çekme mukavemeti 1216.7 MPa ve süneklik değeri %32.4 olarak gerçekleşirken bu değerler %108.3 oranında soğuk deformasyon sonrası çekme mukavemeti 1717.5 MPa değerine artmış ve süneklik %16.8 değerine düşmüştür.

Mukavemet, bir malzemenin bozulmadan kalabileceği maksimum gerilim değeridir. Metalik malzemelerin soğuk şekil verilmeleri gibi deformasyon sonrasında hem tane yapıları şekil verme yönünde uzamakta hem de çekme mukavemeti, akma mukavemeti, kopma mukavemeti gibi değerleri artarken süneklik özellikleri azalmaktadır. Bununla beraber elektriksel özellikleri ve korozyon dirençleri de düşmektedir. Bir malzeme soğuk deformasyon oranının artması ile malzemenin akma ve çekme mukavemeti arasındaki farkın da azaldığı ifade edilmiştir (Danченко, 2007; Raougui, 2023).

Çelikteki karbon miktarı arttıkça çeliğin çekme mukavemet değeri artarken sünekliği azalmaktadır (Köksal ve ark., 2004; Özçatalbaş, 2020). Mevcut çalışma göz önüne alındığında C83 çelikteki karbon miktarı C55 çeliğe daha fazla olduğundan çekme mukavemeti değeri daha fazla olduğu doğrulanmıştır.

### 4.3. Yeniden Kristallenme Kinetiği

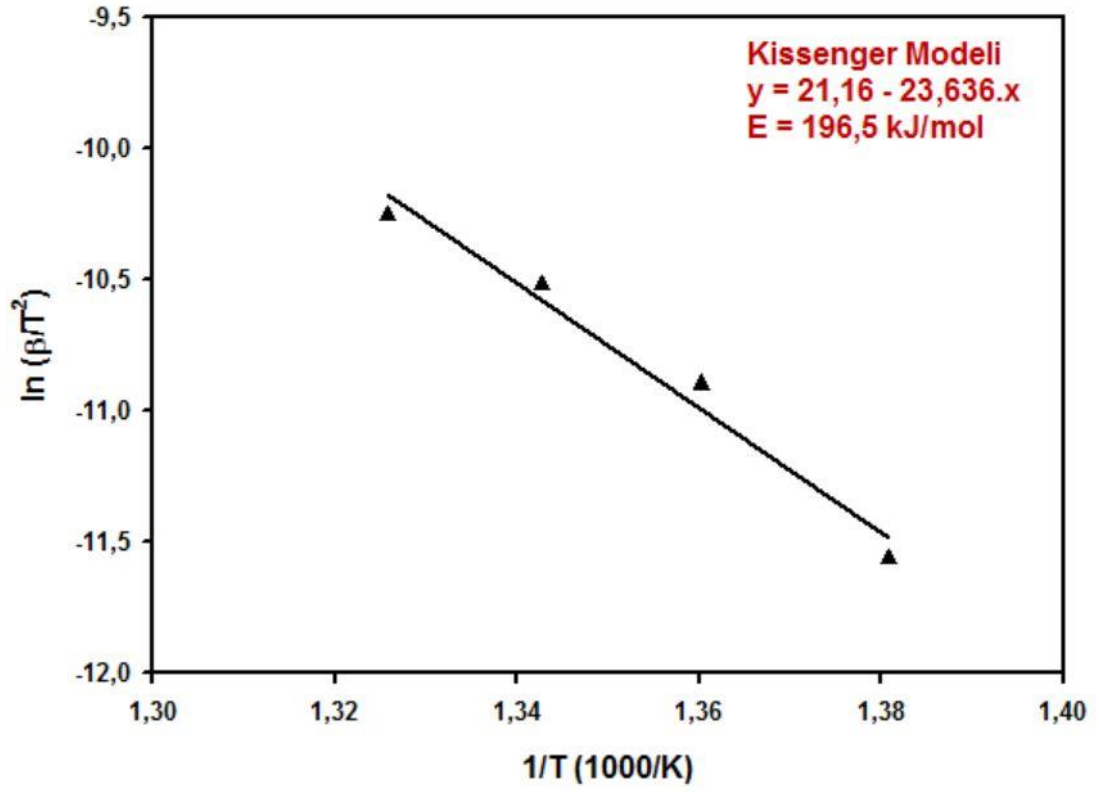
Şekil 4.15.'de tel çekme yöntemi ile %121.2 oranında deformasyona uğratılmış C55 çelik telin 5 – 10 – 15 – 20 °C/dak ısıtma hızlarında alınan DSC analizleri verilmiştir. DSC analizinde tespit edilen küçük ve yayvan ekzotermik pikler yeniden kristallenme davranışını vermektedir. Farklı ısıtma hızlarına göre yeniden kristallenme sıcaklıkları, 5°C/dak ısıtma hızı için 451,2 °C (724,2 K), 10°C/dak ısıtma hızı için 462,1 °C (735,1 K), 15°C/dak ısıtma hızı için 471,8 °C (744,8 K) ve 20°C/dak ısıtma hızı için 481,3 °C (754,3 K) olarak tespit edilmiştir. Bu pik sıcaklıklar kullanılarak farklı yöntemlere göre elde edilen kinetik veriler Tablo 4.2.'de verilmiştir.



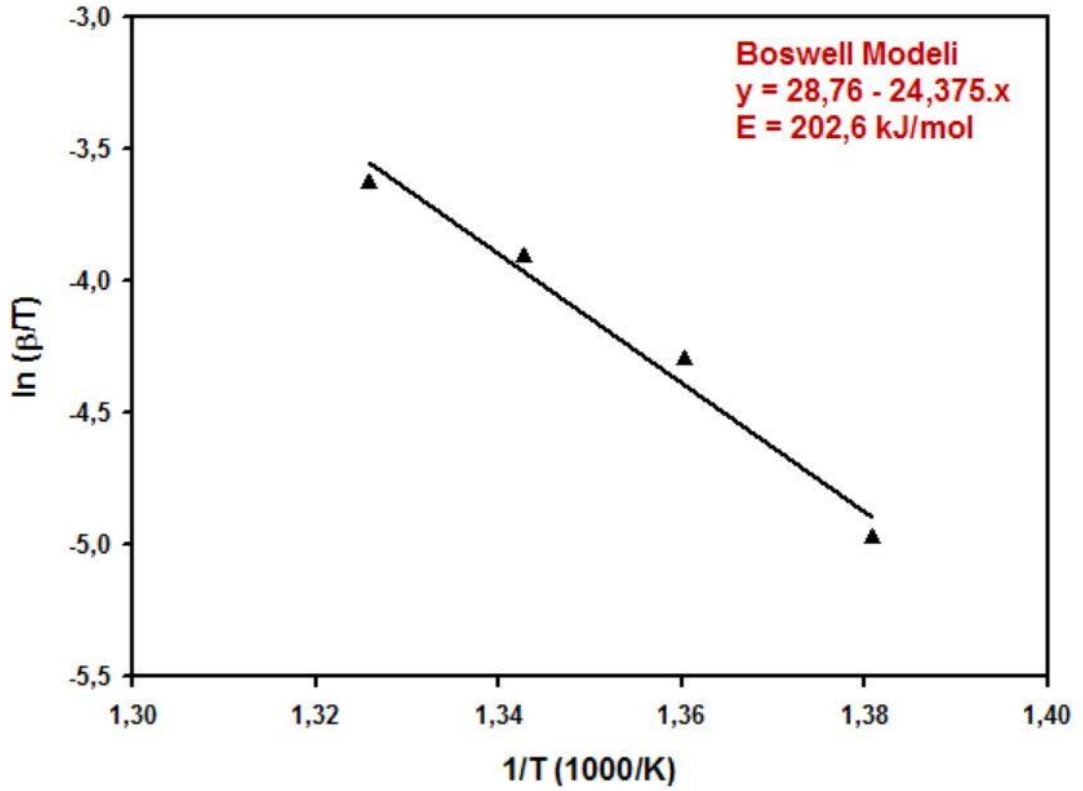
Şekil 4.15. %121.2 oranında soğuk deformasyon sonrası C55 çelik telin DSC analizleri.

Tablo 4.2. %121.2 oranında soğuk çekilmiş C55 çelik tel için kinetik veriler.

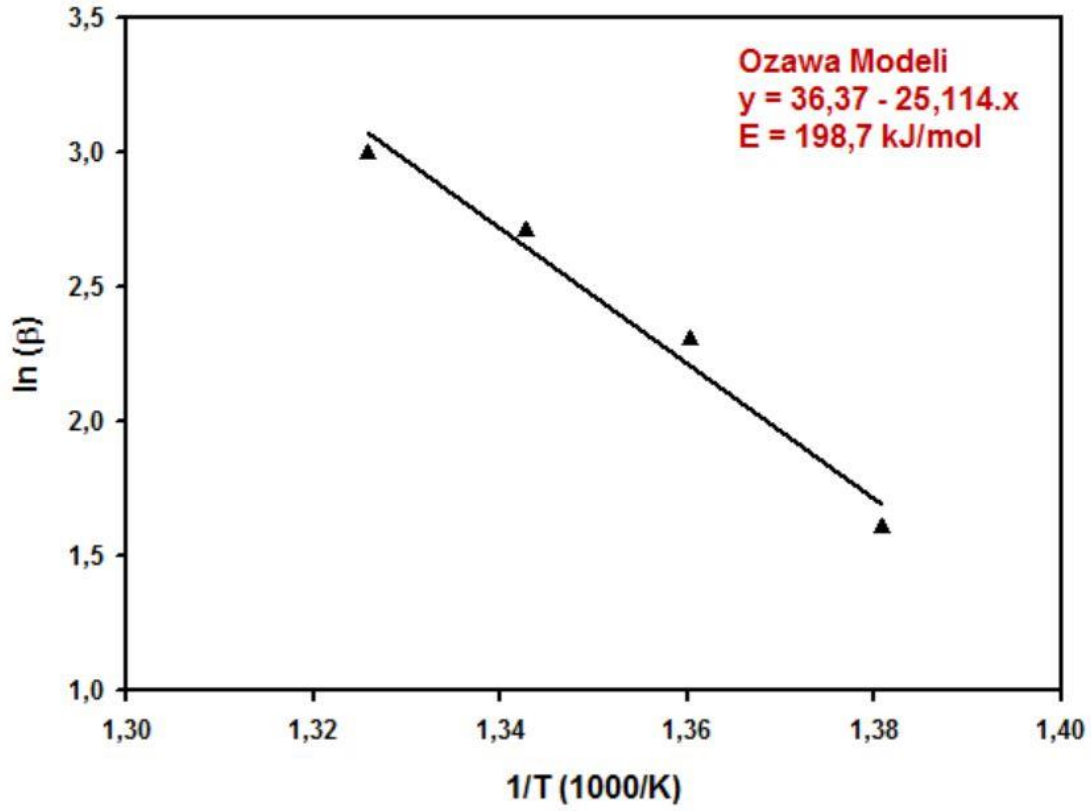
$\beta$	T (K)	1/T	$\ln(\beta/T^2)$	$\ln(\beta/T)$	$\ln(\beta)$	$\ln(\beta/T^{1.92})$
5	724,2	$1,381.10^{-3}$	-11,5607	-4,9756	1,6094	-11,0339
10	735,1	$1,361.10^{-3}$	-10,8974	-4,2974	2,3026	-10,3694
15	744,8	$1,343.10^{-3}$	-10,5182	-3,9051	2,7081	-9,9891
20	754,3	$1,326.10^{-3}$	-10,2558	-3,6301	2,9957	-9,7258



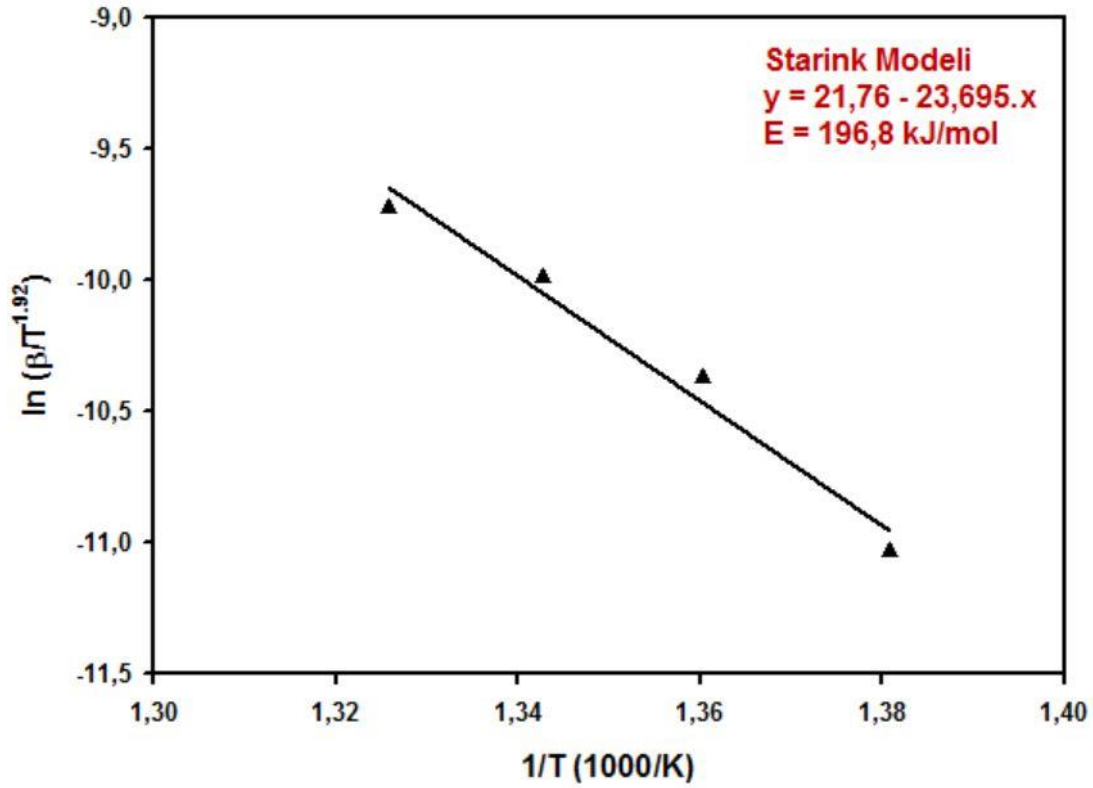
Şekil 4.16. %121.2 oranında soğuk çekilmiş C55 çelik tel için Kissenger grafiği.



Şekil 4.17. %121.2 oranında soğuk çekilmiş C55 çelik tel için Boswell grafiği.



Şekil 4.18. %121.2 oranında soğuk çekilmiş C55 çelik tel için Ozawa grafiği.

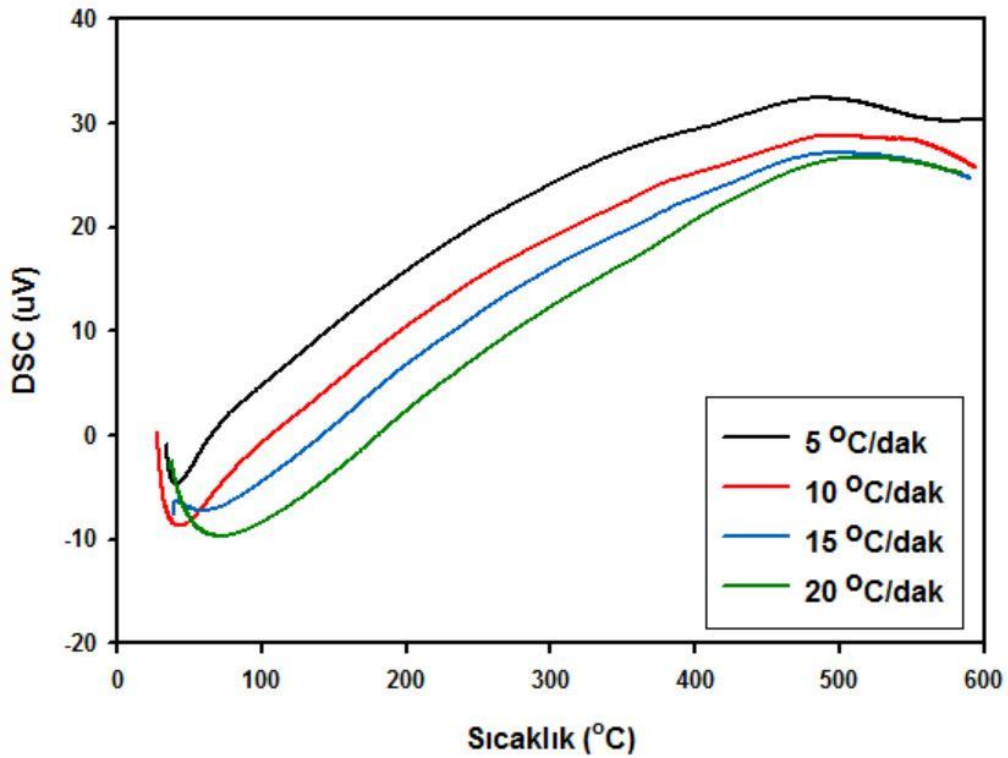


Şekil 4.19. %121.2 oranında soğuk çekilmiş C55 çelik tel için Starink grafiği.

Hesaplamalar sonrası elde edilen Tablo 4.2.'de ki veriler ile Şekil 4.16.'da Kissenger grafiği, Şekil 4.17.'de Boswell grafiği, Şekil 4.18.'de Ozawa grafiği ve Şekil 4.19.'da Starink grafiği verilmiştir. Her bir grafiğin eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi değerleri Tablo 4.3.'de verilmiştir.

**Tablo 4.3.** %121.2 oranında soğuk çekilmiş C55 çelik tel için yeniden kristallenme aktivasyon enerji değerleri.

Kinetik Yöntem	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)
Kissenger	196,5
Boswell	202,6
Ozawa	198,7
Starink	196,8



**Şekil 4.20.** %108.3 oranında soğuk deformasyon sonrası C83 çelik telin DSC analizleri.

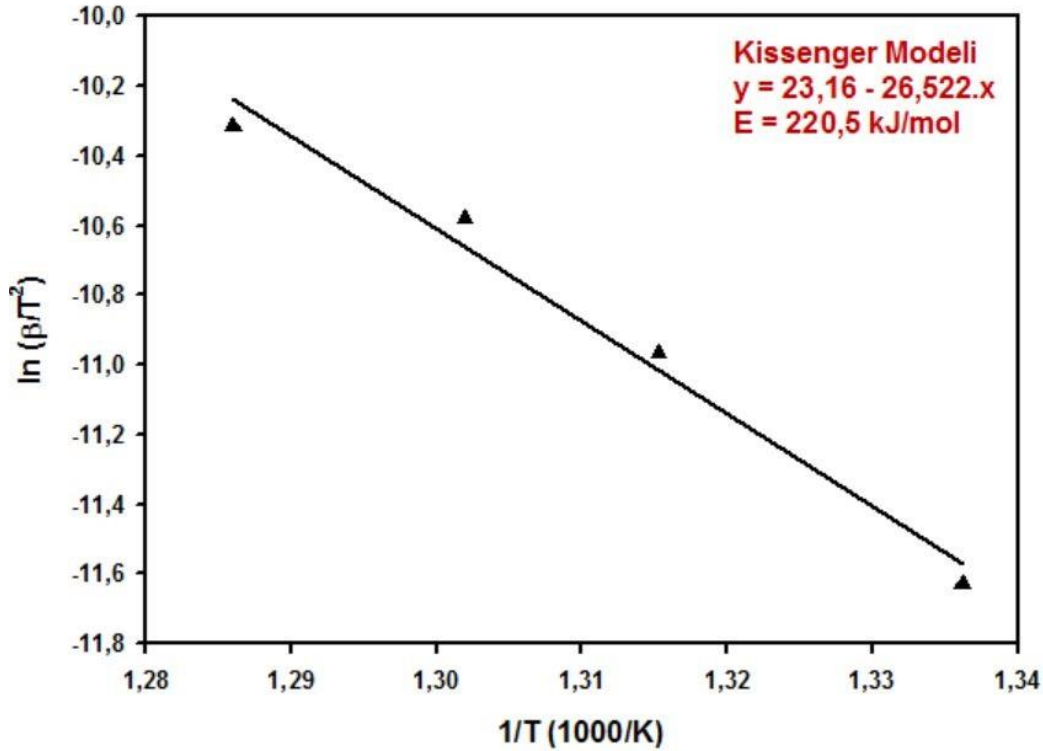
Şekil 4.20.'de tel çekme yöntemi ile %108.3 oranında deformasyona uğratılmış C83 çelik telin 5 – 10 – 15 – 20 °C/dak ısıtma hızlarında alınan DSC analizleri verilmiştir. Farklı ısıtma hızlarına göre yeniden kristallenme sıcaklıkları, 5°C/dak ısıtma hızı için 475,4 °C (748,4 K), 10°C/dak ısıtma hızı için 487,3 °C (760,3 K), 15°C/dak ısıtma

hızı için 495,1 °C (768,1 K) ve 20°C/dak ısıtma hızı için 504,6 °C (777,6 K) olarak tespit edilmiştir. Bu pik sıcaklıklar kullanılarak farklı yöntemlere göre elde edilen kinetik veriler Tablo 4.4.'de verilmiştir.

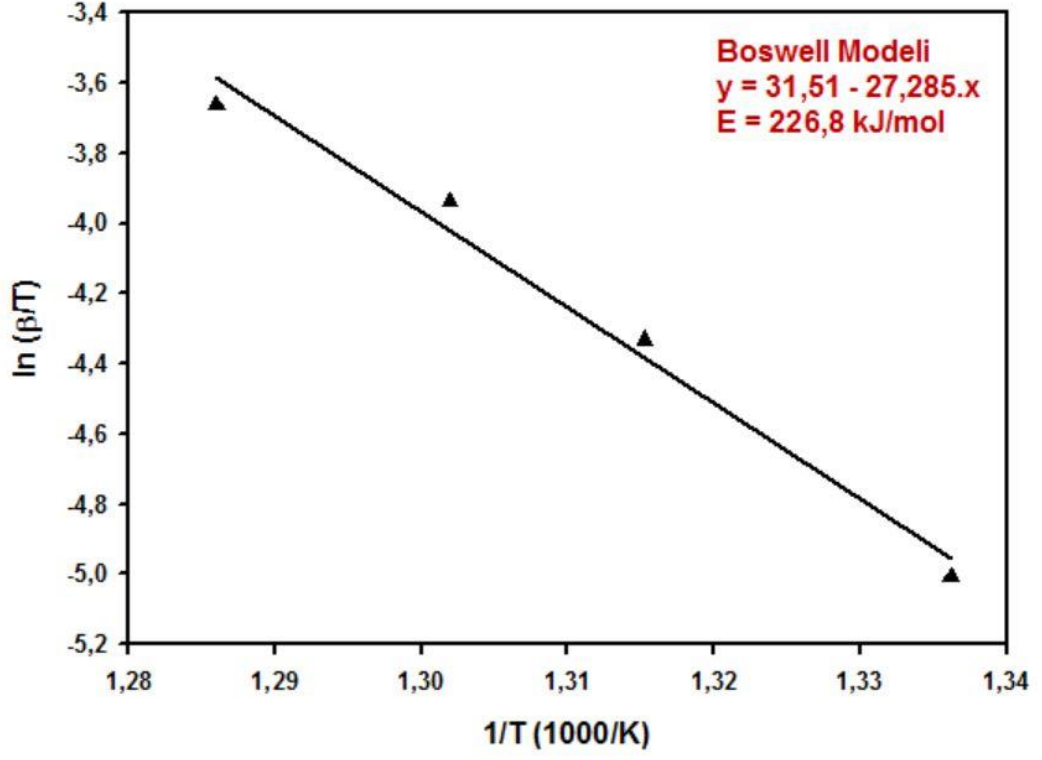
Şekil 4.21.'de Kissenger grafiği, Şekil 4.22.'de Boswell grafiği, Şekil 4.23.'de Ozawa grafiği ve Şekil 4.24.'da Starink grafiği verilmiştir. Her bir grafiğin eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi değerleri Tablo 4.5.'de verilmiştir.

**Tablo 4.4.** %108.3 oranında soğuk çekilmiş C83 çelik tel için kinetik veriler.

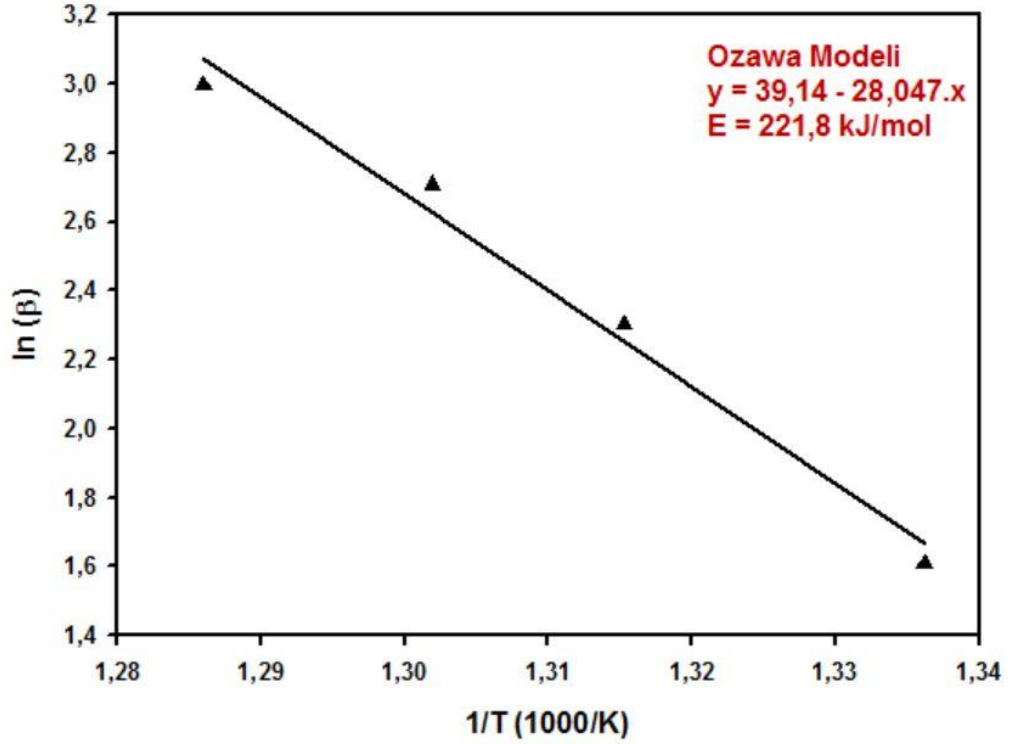
$\beta$	T (K)	1/T	$\ln(\beta/T^2)$	$\ln(\beta/T)$	$\ln(\beta)$	$\ln(\beta/T^{1.92})$
5	748,4	$1,336 \cdot 10^{-3}$	-11,6264	-5,0085	1,6094	-11,0970
10	760,3	$1,315 \cdot 10^{-3}$	-10,9648	-4,3311	2,3026	-10,4341
15	768,1	$1,302 \cdot 10^{-3}$	-10,5798	-3,9359	2,7081	-10,0483
20	777,6	$1,286 \cdot 10^{-3}$	-10,3167	-3,6605	2,9957	-9,7842



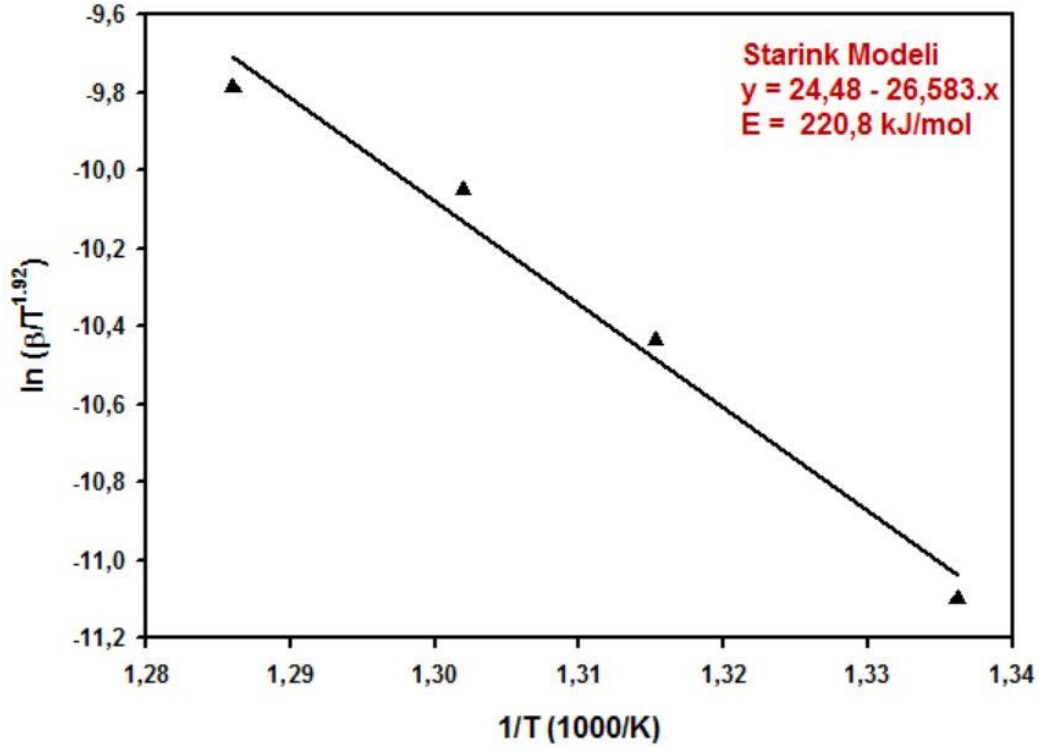
**Şekil 4.21.** %108.3 oranında soğuk çekilmiş C83 çelik tel için Kissenger grafiği.



Şekil 4.22. %108.3 oranında soğuk çekilmiş C83 çelik tel için Boswell grafiği.



Şekil 4.23. %108.3 oranında soğuk çekilmiş C83 çelik tel için Ozawa grafiği.



**Şekil 4.24.** %108.3 oranında soğuk çekilmiş C83 çelik tel için Starink grafiği.

**Tablo 4.5.** %108.3 oranında soğuk çekilmiş C83 çelik tel için yeniden kristallenme aktivasyon enerjisi değerleri.

Kinetik Yöntem	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)
Kissenger	220,5
Boswell	226,8
Ozawa	221,8
Starink	220,8

Tablo 4.3.'de verilen kinetik sonuçlara göre %121.2 oranında soğuk çekme işlemi yapılarak deformasyona uğratılmış C55 çelik telde yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi Kissenger yöntemine göre 196,5 kJ/mol, Boswell yöntemine göre 202,6 kJ/mol, Ozawa yöntemine göre 198,7 kJ/mol ve Starink yöntemine göre 196,8 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. %121.2 oranında soğuk deformasyona uğramış C55 çelik telde yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi  $198.6 \pm 2$  kJ/mol olarak tespit edilmiştir.

Tablo 4.5.'de verilen kinetik sonuçlara göre %108.3 oranında soğuk çekme işlemi yapılarak deformasyona uğratılmış C83 çelik telde yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi Kissenger yöntemine göre 220,5 kJ/mol, Boswell yöntemine göre



226,8 kJ/mol, Ozawa yöntemine göre 221,8 kJ/mol ve Starink yöntemine göre 220,8 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. %108.3 oranında soğuk deformasyona uğramış C83 çelik telde yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi  $222,5 \pm 2$  kJ/mol olarak tespit edilmiştir.

Yapılan bir çalışmada, düşük alaşımlı bir çeliğe burulma testleri ile deformasyon işlemleri yapıldıktan sonra yeniden kristallenme davranışına C, Mo, Mn ve Si gibi temel elementleri ve ayrıca Ti, V ve Nb gibi mikro alaşımlama elementlerinin etkileri incelenmiştir. Aktivasyon enerjisinin çeliğin kimyasal kompozisyonuna bağlı olan en hassas parametre olduğu ifade edilmiştir. Bu çalışmaları %20 ve %35 deformasyona uğratılmış çelik üzerine yapmışlardır. Yeniden kristallenme işlemlerini statik olarak  $900^{\circ}\text{C} - 1100^{\circ}\text{C}$  aralıklarında gerçekleştirdiklerinde sıcaklığın artması ile yeniden kristallenme işleminin daha kısa sürede gerçekleştiği ifade edilmiştir. Östenitik demirde yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 124.7 kJ/mol olduğu, herhangi bir alaşımlama elementinin etkisiyle aktivasyon enerjisi değerinin arttığı belirtilmiştir. Bu alaşımlama elementleri içinde karbon ve vanadyumun etkisinin çok fazla olmadığı da ifade edilmiştir. Karbon ilavesinde aktivasyon enerjisinin 169 kJ/mol olduğu ve deformasyon miktarının artması ile yeniden kristallenme sıcaklığının düştüğü belirtilmiştir (Medina ve Mancilla, 1996).

Diğer bir çalışmada arayer atomları içermeyen çelik üzerinde kinetik modellerle yeniden kristallenme incelemesi yapılmıştır. Bu çalışmada yeniden kristallenme çalışması %70, %80 ve %90 oranlarında soğuk haddelenmiş çelik üzerinde yapılmıştır. Johnson Mehl (JMAK) modeli ile çalışma yapıldığında %70 deformasyonda yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin  $237 \pm 17$  kJ/mol, %80 deformasyonda yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin  $331 \pm 23$  kJ/mol ve %90 deformasyon sonunda da yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin  $365 \pm 22$  kJ/mol olduğu belirtilmiştir. Ayrıca deformasyon miktarının artması ile yeniden kristallenme süresinin kısaldığını ifade etmişlerdir (Ye ve ark., 2002).

Bir başka çalışmada, kaba taneli ve heterojen yapıya sahip ve soğuk haddelenmiş düşük karbonlu bir çeliğin yeniden kristallenme kinetiğinin gelişim süreci, çekirdeklenme ve ara yüzey – tane sınırı taşınım hızıyla incelenmiştir. Yeniden kristallenmenin iki tavlama süresi tarafından yönetildiğini, ilk kademede çoğunlukla yüksek enerji depolanmış bölgelerin yeniden kristallenme gerçekleştiğini, ikinci

kademede de daha düşük enerji depolanmış bölgelerde yeniden kristallenme olayının ilerlediğini belirtmişlerdir (Oyarzabal ve ark., 2008).

## 5. SONUÇLAR

C55 çelik telin %121.2 oranında ve C83 çelik telin %108.3 oranında soğuk çekme ile gerçekleştirilen soğuk deformasyonu sonrasında mekanik özelliklerindeki değişimler incelenmiş ve yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi değerleri izotermal olmayan yöntemlerle tespit edilmiştir. Elde edilen genel sonuçlar;

- C55 ve C83 çelik telin başlangıç çapı 5.5 mm olup C55 çelik tel soğuk çekme sonrası 3 mm çapa, C83 çelik tel soğuk çekme sonrası 3.2 mm çapa indirilmiştir. Soğuk deformasyon oranı C55 çelik tel için %121.2, C83 çelik tel için %108.3 olarak tespit edilmiştir.
- C55 çelik telin çekme mukavemeti 859.2 MPa iken bu değer %121.2 oranında soğuk deformasyon sonrası 1358.2 MPa değerine çıkmıştır.
- C55 çelik telin % uzama değeri %65.8 iken bu değer %121.2 oranında soğuk deformasyon sonrası %24.7 değerine düşmüştür.
- C83 çelik telin çekme mukavemeti 1216.7 MPa iken bu değer %108.3 oranında soğuk deformasyon sonrası 1717.5 MPa değerine çıkmıştır.
- C83 çelik telin % uzama değeri %32.4 iken bu değer %108.3 oranında soğuk deformasyon sonrası %16.8 değerine düşmüştür.
- Metalografik incelemeler sonucunda hem C55 çelik telde hem de C83 çelik telde çekme yönünde tanelerin uzadığı gözlenmiştir.
- C55 ve C83 çelik tellerde soğuk deformasyon sonrası yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi, DSC (Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi) kullanılarak, çelik tel numunelerin 5 – 10 – 15 – 20 °C/dak ısıtma hızlarında alınan termal analiz grafikleri yardımıyla gerçekleştirilmiştir.
- Çelik tel numunelerde yeniden kristallenme kinetiği, izotermal olmayan 4 farklı yöntem (Kissenger, Boswell, Ozawa ve Starink) kullanılarak yapılmıştır.
- Soğuk tel çekme yöntemiyle %121.2 oranında soğuk deformasyona uğramış C55 çelik telde yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi, Kissenger metoduna göre 196.5 kJ/mol, Boswell metoduna göre 202.6 kJ/mol, Ozawa metoduna göre 198.7 kJ/mol ve Starink metoduna göre 196.8 kJ/mol olarak

tespit edilmiştir. Tel çekme yöntemiyle %121.2 oranında soğuk deformasyona uğratılmış C55 çelik telde yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi  $198.6 \pm 2$  kJ/mol olarak bulunmuştur.

- Soğuk tel çekme yöntemiyle %108.3 oranında soğuk deformasyona uğramış C83 çelik telde yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi, Kissenger metoduna göre 220.5 kJ/mol, Boswell metoduna göre 226.8 kJ/mol, Ozawa metoduna göre 221.8 kJ/mol ve Starink metoduna göre 220.8 kJ/mol olarak tespit edilmiştir. Tel çekme yöntemiyle %108.3 oranında soğuk deformasyona uğratılmış C83 çelik telde yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi  $222.5 \pm 2$  kJ/mol olarak bulunmuştur.
- C55 ve C83 çelik tellerin yeniden kristallenme kinetiği karşılaştırıldığında, karbon miktarının artması ile yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisinin bir miktar arttığı gözlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Alaneme, K.K., Okotete, E.A. (2018). Recrystallization mechanisms and microstructure development in emerging metallic materials: A review. *Journal of Science Advanced Materials and Devices*, 4(1), 19–33. <https://doi.org/10.1016/k.jsamd.2018.12.007>
- Alkan, H. (2019). *Yüksek karbonlu çelik tel çekiminde işlem parametre etkilerinin araştırılması* [Yüksek lisans tezi] Erciyes Üniversitesi.
- Ay, İ. (2023, 10 Mayıs). İmalat Yöntemleri: Tel ve çubuk çekme yoluyla imalat. <http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/iy2/lecture10.pdf> adresinden 10 Mayıs 2023 tarihinde alınmıştır.
- Bell, T. (2023, 24 Nisan). Steel Grades and Properties. <https://www.thoughtco.com/steel-grades-2340175> adresinden 24 Nisan 2023 tarihinde alınmıştır.
- Bhaduri, A. (2018). *Mechanical properties and working of metals and alloys*. Springer.
- Boswell, P.G. (1980). On the calculation of activation energies using a modified Kissenger method. *Journal of Thermal Analysis*, 18(2), 353-358. <https://doi.org/10.1007/BF02055820>
- Çelik, E. (2019). *Çelik tel çekme hadde geometrisinin telin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi* [Yüksek lisans tezi] Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi.
- Çetintürk, S. (1993). *Faz dağılım parametrelerinin düşük soğuk deformasyon ve yeniden kristalleşme özelliklerine etkileri* [Yüksek lisans tezi] Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Danchenko, V. N. (2007). Metal forming. <https://metal-forming.org/images/for-books/Danchenko-omd-engl.pdf> adresinden 5 Mart 2023 tarihinde alınmıştır.
- Dekmake (2023, 23 Şubat). Sıcak iş takım çeliği vs soğuk iş takım çeliği, hangisi bana uygun? <https://dekmake.com/tr/sıcak-iş-takım-çeliği-vs-soğuk-iş-takım-çeliği/> adresinden 23 Şubat 2023 tarihinde alınmıştır.
- Dixit, U.S. (2020). Modeling of Metal Forming: A review. *Mechanics of Materials in Modern Manufacturing Methods and Processing Techniques*. (pp. 1-30). Elsevier.
- Doğan, E. (2006). *1050 ve 8006 alüminyum alaşımlarının deformasyon ve yeniden kristalleşme davranışı* [Yüksek lisans tezi] İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Greco, I. (2021). *Soğuk haddelenmiş AA3105 saclarda termal analizle yeniden kristalleşme kinetiğinin incelenmesi* [Yüksek lisans tezi] Sakarya Üniversitesi.
- Groover, M.P. (2001). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*. Wiley & Sons.

- Humphreys, J., Rohrer, G. S., Rollett, A. (2017). *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. Elsevier.
- Ikumapayi, O. M., Akinlabi, E. T., Onu, P., Abolusoro, O. P. (2020). Rolling operation in metal forming: Process and principles–A brief study. *Materials Today: Proceedings* 26(2), 1644-1649. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.343>
- İçin, K. (2023, Mart 24). Çeliklerin sınıflandırılması Ders Notları <https://avesis.ktu.edu.tr/kursaticin/dokumanlar> adresinden 24 Mart 2023 tarihinde alınmıştır.
- Kalaylı Demir Çelik (2023, Şubat 22). Paslanmaz Çelik. [https://www.kalaylidemircelik.com/urun\\_liste/paslanmaz](https://www.kalaylidemircelik.com/urun_liste/paslanmaz) adresinden 22 Şubat 2023 tarihinde alınmıştır.
- Kissenger, H.E. (1957). Reaction kinetics in differential thermal analysis. *Analytical Chemistry*, 29(11), 1702-1706. <https://doi.org/10.1021/ac60131a045>
- Koçak, H. (2012). *Çelik Rehberi* (I.Baskı) Sağlam Metal Yayınları.
- Köksal, N.S., Uzkut, M., Ünlü, B.S. (2004). Farklı karbon içerikli çeliklerin mekanik özelliklerinin ısı işlemlerle değişimi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(2), 95-100. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/deumffmd/issue/40875/493524>
- Lyon, S.B., (2010). Corrosion of Carbon and Low Alloy Steels. In *Shreir's Corrosion* (Vol.3, pp. 1693-1736). Elsevier
- Medina, S.F., Mancilla, J.E. (1996). Influence of alloying elements in solution on static recrystallization kinetics of hot deformed steels. *ISIJ (Iron and Steel Institute of Japan) International*, 36(8), 1063-1069. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.1063>
- Narayanan, R.G. (2023, Kasım 20). Metal Forming Processes. [https://www.iitg.ac.in/engfac/ganu/public\\_html/Metal%20forming%20processes\\_full.pdf](https://www.iitg.ac.in/engfac/ganu/public_html/Metal%20forming%20processes_full.pdf) adresinden 20 Kasım 2023 tarihinde alınmıştır.
- Oyarzabal, M., Guerenú, A.M., Gutierrez, I. (2008). Effect of stored energy and recovery on the overall recrystallization kinetics of a cold rolled low carbon steel, *Material Science and Engineering A*, 485(1-2), 200-209. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.07.077>
- Ozawa, T. (1992). Estimation of activation energy by isoconversion methods. *Thermochimica Acta*, 203, 159-165. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(92\)85192-X](https://doi.org/10.1016/0040-6031(92)85192-X)
- Özçatalbaş, Y. (2020). Çeliklerin işlenebilirliği: kimyasal bileşim, mikroyapı, mekanik özellikler ve işlenebilirlik ilişkisi. *Politeknik Dergisi*, 23(2), 457-482. <https://doi.org/10.2339/politeknik.550000>
- Raabe, D. (2014). *Recovery and Recrystallization: Phenomena, Physics, Models and Simulation, Physical Metallurgy*. Elsevier.
- Raougui, A. (2021). *AA5005 saclarda haddeleme sonrası yeniden kristallenme kinetiğinin termal analizle incelenmesi* [Yüksek lisans tezi] Sakarya Üniversitesi.

- Raougui, J. (2023). *Soğuk çekilmiş elektrolitik bakır tellerin yeniden kristallenme kinetiğinin incelenmesi* [Yüksek lisans tezi] Sakarya Üniversitesi.
- Smallman R.E., Bishop, R.J. (1999). *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering*. Elsevier.
- Starink, M. (2004). Analysis of aluminium based alloys by calorimetry: quantitative analysis of reactions and reaction kinetics. *International Materials Reviews*. 49(3-4), 191-226. <https://doi.org/10.1179/095066004225010532>
- Şenel, M. (2023, Mart 15). Metallerde Plastik Şekillendirme [file:///C:/Users/taurn/Downloads/6\)%20Metallerde%20Plastik%20%C5%9Eekillendirme%20%C4%B0%C5%9Flemeleri%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/taurn/Downloads/6)%20Metallerde%20Plastik%20%C5%9Eekillendirme%20%C4%B0%C5%9Flemeleri%20(2).pdf) adresinden 15 Mart 2023 tarihinde alınmıştır.
- Tempelman, E., Shercliff, H., Van Eyben, B.N. (2014). *Forging of Metals. In Manufacturing and Design*. Elsevier.
- The Process Piping (2023, Mart 23). Introduction to the SAE/AISI Steel Numbering System. <https://www.theprocesspiping.com/introduction-sae-aisi-steel-numbering-system/> adresinden 23 Mart 2023 tarihinde alınmıştır.
- Tien (2023, Nisan 16). Steel Standart Comparison, CNS, JIS, AISI, ASTM, DIN. [https://www.tien-i.com/blog\\_detail/27-steel-standard-comparison-cns-jis-aisi-astm-din](https://www.tien-i.com/blog_detail/27-steel-standard-comparison-cns-jis-aisi-astm-din) adresinden 16 Nisan 2023 tarihinde alınmıştır.
- Uyarlar (2023, Şubat 22). Paslanmaz çelik ürünler. <http://www.uyarlar.com.tr/urunler.php?id=11> adresinden 22 Şubat 2023 tarihinde alınmıştır.
- Vanilla Steel (2023, Nisan 12). Different steel grades and their designation. <https://www.vanillasteel.com/content/steel-grades> adresinden 12 Nisan 2023 tarihinde alınmıştır.
- Yena Engineering (2023, Nisan 16). A Comprehensive Guide to Structural Steel. <https://yenaengineering.nl/a-comprehensive-guide-to-structural-steel-2/> adresinden 16 Nisan 2023 tarihinde alınmıştır.
- Ye, W., Gall, R., Saindrenan, G. (2002). A study of the recrystallization of an IF steel by kinetics models. *Material Science and Engineering A*, 332,41-46. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01715-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01715-4)
- Yıldırım, Y. (2019). *316L Kaliteye sahip paslanmaz çelik tellerin tel çekme ve parlak tavlama proseslerinin araştırılması* [Yüksek lisans tezi] Mersin Üniversitesi.
- Zhang, X. (2021). Applications of kinetic methods in thermal analysis: A review. *Engineered Science*, 14, 1-13. <https://doi.org/10.30919/es8d1132>





## ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Amer RAOUGUI

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2021-h.d.e B/S/H'de Stajyer Mühendis olarak çalışmaktadır.

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Raougui A., Yıldız K. (2022, 21-22, Mayıs). C55 Çeliğın Mekanik Özelliklerine ve Yeniden Kristallenme Davranışına Soğuk Çekmenin Etkisinin İncelenmesi. *EGE 5th International Congress on Applied Sciences*, İzmir, Turkey.