

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

**SAE 1008 ÇELİK TELİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE YENİDEN
KRİSTALLENME KİNETİĞİNE SOĞUK ÇEKMENİN
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Pelin RAOUGUI

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

HAZİRAN 2023

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

**SAE 1008 ÇELİK TELİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE YENİDEN
KRİSTALLENME KİNETİĞİNE SOĞUK ÇEKMENİN
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Pelin RAOUGUI

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Kenan YILDIZ

HAZİRAN 2023

Pelin Raougui tarafından hazırlanan ‘‘SAE 1008 elik Telin Mekanik zellikleri ve Yeniden Kristallenme Kinetiğine Soğuk ekmenin Etkilerinin İncelenmesi’’ adlı tez çalışması 22.06.2023 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. Nil TOPLAN**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof.Dr. Ahmet ATASOY**
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 “SAE 1008 ÇELİK TELİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE YENİDEN KRİSTALLENME KİNETİĞİNE SOĞUK ÇEKMENİN ETKİLERİNİN 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. (22/06/2023).

(imza)

Pelin RAOUGUI

Babam Kasım Kalınlı ve annem Pervin Kalınlı'ya

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 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 ve değerli eşim Atae RAOUGUI ile numunelerin temininde gösterdikleri katkılarından dolayı PELENKOĞLU (Karabük) firmasına çok teşekkür ederim.

Pelin 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	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Çelik	3
2.2. Plastik Şekil Verme Yöntemleri.....	15
2.2.1. Haddelme ile şekillendirme.....	15
2.2.2. Ekstrüzyon ile şekillendirme.....	16
2.2.3. Dövme ile şekillendirme	17
2.2.5. Derin çekme ile şekillendirme	19
2.3. Yeniden Kristallenme Süreci	20
3. MALZEME VE YÖNTEM	29
3.1. Malzeme	29
3.2. Yöntem	29
3.2.1. Metalografi çalışmaları	29
3.2.3. Termal analiz ile yeniden kristallenme kinetiği	30
3.3. Kullanılan Cihazlar	31
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	33
4.1. Soğuk Çekilmiş Tellerde Metalografik İncelemeler	33
4.2. Mekanik Özelliklerdeki Değişimler	35
4.3. Termal Analizle Yeniden Kristallenme Kinetiği	38
5. SONUÇLAR	47
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ.....	53

KISALTMALAR

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

SİMGELER

A_o	: Başlangıç kesit alanı [mm ²]
A_s	: Deformasyon sonrası kesit alanı [mm ²]
β	: Isıtma hızı [°C/dakika]
d_o	: Başlangıç çapı [mm]
d_s	: Deformasyon sonrası çap [mm]
E_a	: Aktivasyon enerjisi [kJ/mol]
ε	: Deformasyon miktarı
R	: Gaz sabiti [J/mol.K]
T	: Mutlak sıcaklık [K]
T_p	: Pik sıcaklığı [K]

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Çeliklerin standartları	10
Tablo 2.2. SAE ve AISI çelik norm ve simgeleri	11
Tablo 2.3. Çeliklerin kullanım alanlarına göre sınıflandırılması	12
Tablo 2.4. Çelik standartları için çapraz referans gösterimi	14
Tablo 4.1. Çelik tellerde soğuk çekme ile mekanik özelliklerdeki değişimler.	37
Tablo 4.2. %31,8 deforme olmuş SAE1008 çelik tel için kinetik veriler.	39
Tablo 4.3. %31,8 soğuk deformasyona uğramış SAE1008 çelik telde yeniden kristallenme aktivasyon enerji değerleri.	41
Tablo 4.4. %92,7 deforme olmuş SAE1008 çelik tel için kinetik veriler.	42
Tablo 4.5. %92,7 soğuk deforme olmuş SAE1008 çelik telde yeniden kristallenme aktivasyon enerji değerleri.	45

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Fe-C Denge Diyagramı	4
Şekil 2.2. Çeliklerin genel sınıflandırılmalarına göre şematik gösterim	5
Şekil 2.3. Haddemele işleminin şematik gösterimi	16
Şekil 2.4. Ekstrüzyon işlemi	17
Şekil 2.5. Dövme ile şekillendirme	18
Şekil 2.6. Çekme ile şekil verme	19
Şekil 2.7. Derin çekme işlemi ile şekil verme.	20
Şekil 2.8. Yeniden kristallenme kademelerindeki değişimler	21
Şekil 2.9. Plastik deforme olmuş bir malzemenin toparlanma safhasında çeşitli aşamalar	22
Şekil 2.10. Bir malzemenin sıcak deformasyonu sırasında mikroyapının değişimi (a) dinamik toparlanma (b) dinamik yeniden kristallenme	23
Şekil 2.11. Soğuk şekil değiştirmiş bir pirinç alaşımında yeniden kristallenme ve tane büyümesi çeşitli safhalarını gösteren mikroyapı	23
Şekil 2.12. Bir pirinç alaşımı için tavlama sıcaklığına göre yeniden kristallenme şeması	24
Şekil 2.13. Atomsal yayınmayla oluşan tane büyümesinin şematik gösterimi.....	26
Şekil 2.14. Pirinç için farklı sıcaklıklardaki tane büyüme olayında, logaritma olarak tane çapının, işlem süresinin logaritmasıyla değişimi	26
Şekil 3.1. Çekme testi sonrası kopmuş SAE 1008 çelik tel numuneler.	30
Şekil 3.2. Nikon ECLIPSE L150 optik mikroskopu.....	31
Şekil 3.3. INSTRON marka çekme cihazı.	32
Şekil 3.4. HITACHI STA 7300 marka termal analiz cihazı.	32
Şekil 4.1. Başlangıç SAE1008 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X200).	33
Şekil 4.2. %31,8 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X200).	34
Şekil 4.3. %92,7 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X200).	34
Şekil 4.4. Başlangıç SAE1008 çelik telin gerilme - genleme diyagramı.....	35
Şekil 4.5. %31,8 oranında soğuk çekilmiş bakır telin gerilme - genleme diyagramı.	36
Şekil 4.6. %92,7 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik telin gerilme - genleme diyagramı.....	36
Şekil 4.7. Başlangıç ve farklı oranda soğuk çekilmiş SAE1008 çelik tellerin gerilme - genleme diyagramları.	37
Şekil 4.8. %31,8 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik telin DSC analizleri.....	38
Şekil 4.9. %31,8 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik tel için Kissenger grafiği.	39
Şekil 4.10. %31,8 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik tel için Boswell grafiği.	40
Şekil 4.11. %31,8 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik tel için Ozawa grafiği.	40
Şekil 4.12. %31,8 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik tel için Starink grafiği.	41
Şekil 4.13. %92,7 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik telin DSC analizleri.	42

Şekil 4.14. %92,7 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik tel için Kissenger grafiği.	43
Şekil 4.15. %92,7 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik tel için Boswell grafiği.	43
Şekil 4.16. %92,7 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik tel için Ozawa grafiği.	44
Şekil 4.17. %92,7 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik tel için Starink grafiği.	44

SAE 1008 ÇELİK TELİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE YENİDEN KRİSTALLENME KİNETİĞİNE SOĞUK ÇEKMENİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, soğuk çekme işlemi yapılarak soğuk deformasyona uğratılmış SAE 1008 çelik tellerin mekanik özelliklerindeki değişimler ve yeniden kristallenme kinetiği incelenmiştir. Çelik tel numuneler Karabük’de bulunan PELENKOĞLU firmasından temin edilmiştir.

SAE 1008 çeliği, düşük karbonlu bir çelik olup maksimum %0,1 karbon içermektedir. Ayrıca %0,30 – 0,50 Mn, maks. %0.03 P, maks. %0.05 S içermektedir. Düşük karbonlu çelikler kolaylıkla soğuk şekil verilebilirler ve genel olarak otomobil parçaları, teller, borular ve konserve kutuların üretiminde kullanılırlar.

SAE 1008 çelik telin deneysel çalışmalarında 6,74 mm olan tel soğuk çekme yöntemiyle 5,75 mm çapa, daha sonra da ısıtma işlemi uygulanmadan soğuk çekme ile 4,24 mm çapa getirilmiştir. Soğuk çekme işlemleri bahsi geçen firmada gerçekleştirilmiştir. Çelik tellerin soğuk çekme işlemleri sonrasında yapılan metalografik incelemelerde, tane yapısının çekme eksenine yönünde uzadığı tespit edilmiştir.

SAE 1008 çelik tellerin çekme test sonuçlarına göre, SAE 1008 çelik telin çekme mukavemeti 510 MPa iken, bu değer %31,8 oranında soğuk deformasyon sonrasında 650 MPa değerine, %92,7 oranında soğuk deformasyon sonrasında 810 MPa değerine artmıştır. SAE 1008 çelik telin süneklik değeri %25,6 iken bu değer %31,8 oranında soğuk deformasyon sonrasında %18,7’ye ve %92,7 oranında soğuk deformasyon sonrasında %12,7 değerine düşmüştür. SAE 1008 çelik telin mikrosertlik değeri 243 HV iken bu değer %31,8 oranında soğuk deformasyon sonrasında 287 HV’ye ve %92,7 oranında soğuk deformasyon sonrasında 372 HV değerine artmıştır. Soğuk çekme ile gerçekleştirilen deformasyon sürecinde dislokasyon yoğunluğunun artması nedeni ile SAE 1008 çelik telin çekme mukavemeti ve sertliği artarken süneklik özelliği azalmıştır.

Soğuk deformasyon sonrasında malzemenin işlenebilirlik özelliği azalmaktadır. Malzemeye bu özelliği yeniden sağlayabilmek için yeniden kristallenme ısıtma işlemi uygulanmaktadır. Yeniden kristallenme için itici güç, soğuk deformasyon sırasında dislokasyon yoğunluğunun artması ile oluşan depolanmış enerjidir.

Yeniden kristallenme ve faz dönüşümleri gibi katı hal dönüşümlerinin kinetik çalışmaları, izotermal olmayan kinetik analiz yöntemleriyle yapılabilmektedir. Bu tez çalışmasında da, diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC), soğuk çekilmiş SAE 1008 çelik telde yeniden kristallenme kinetiğinin incelenmesinde kullanılmıştır. 5-10-15-20°C/dak ısıtma hızlarında alınan termal analiz grafiklerindeki yeniden kristallenme pik sıcaklıkları tespit edilmiş ve Kissinger, Boswell, Ozawa ve Starink gibi izotermal olmayan kinetik modellerle yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi değerleri tespit edilmiştir.

%31,8 oranında soğuk çekilmiş SAE 1008 çelik telde yeniden kristallenme aktivasyon enerjisi Kissenger modeline göre 210,7 kJ/mol, Boswell modeline göre 216,7 kJ/mol, Ozawa modeline göre 212,1 kJ/mol ve Starink modeline göre 211 kJ/mol olarak bulunmuştur. %92,7 oranında soğuk çekilmiş SAE 1008 çelik telde yeniden kristallenme aktivasyon enerjisi Kissenger modeline göre 194,9 kJ/mol, Boswell modeline göre 200,8 kJ/mol, Ozawa modeline göre 196,8 kJ/mol ve Starink modeline göre 195,2 kJ/mol olarak tespit edilmiştir. Kinetik çalışmanın sonucuna göre, soğuk deformasyon miktarının artması ile depolanmış enerji miktarı artmıştır ve bu duruma bağlı olarak yeniden kristallenme için gerekli sıcaklık ve aktivasyon enerjisi bir miktar düşmüştür.

INVESTIGATION OF EFFECTS OF COLD DRAWN ON MECHANICAL PROPERTIES AND RECRYSTALLIZATION KINETICS OF SAE 1008 STEEL WIRE

SUMMARY

In this thesis, the effects of cold-drawing of SAE 1008 steel wire on its mechanical properties and recrystallization kinetics were investigated. The steel samples were obtained from PELENKOĞLU located in Karabük.

Cold drawing is one of the plastic forming methods and it is used to reduce the cross section of metallic materials under a drawing force through a single or a series of drawing dies. Electrical wires, cables, springs, paper clips, stress-loaded structural components and stringed musical instruments were produced by cold drawing of metallic materials.

SAE 1008 steel is a low carbon steel and it has maximum 0.10% carbon. It has also 0.30 – 0.50% Mn, max. 0.04% P, max. 0.05% S, max. 0.1% Si. It has good weldability and good ductility. Additionally, adding certain elements such as aluminum helps improve the hot rolled finish during operation. This type of steel is used in construction, automotive, aerospace and other industries where strength and durability are essential. In additionally, it can be used for various applications, including cold headed fasteners, screws, nails and drilling components.

In the experimental studies of SAE 1008 steel wire, the initial diameter of 6,74 mm was brought to 5,75 mm in first cold drawing step. The amount of cold deformation in first step was determined as 31,8%. In the second cold drawing step, the diameter of 5,75 mm was brought to 4,24 mm and the amount of cold deformation is determined as 92,7%. The cold drawing processes for SAE 1008 steel wires were carried out in Pelenkoğlu company.

As a result of metallographic examinations on structures of cold drawn SAE 1008 steel wires, the grain structures were elongated in the direction of the tensile axis and no crack formation was found.

When the tensile tests results of SAE 1008 steel wires are examined, while the tensile strength of initial SAE 1008 steel wire was 510 MPa, this value increased to 650 MPa after 31,8% cold deformation and increased to 810 MPa after 92,7% cold deformation. The ductility of SAE 1008 steel wire decreased from 25,6% to 18,7% for 31,8% cold deformation and then decreased to 12,7% for 92,7% cold deformation. The micro hardness of initial SAE 1008 steel wire was 243 HV. This value increased to 287 HV after 31,8% cold deformation and increased to 372 HV after 92,7% cold deformation. The strength and hardness of SAE 1008 steel wire increased and the ductility of SAE 1008 steel wire decreased during cold drawing due to the increase in dislocation density in structure. Because dislocation density increases during plastic deformation leading to work hardening, also named as strain hardening.

The microstructure and mechanical properties of the metallic materials change during cold plastic deformation. As the dislocation density in cold deformed metallic material increase, their strength and hardness increase and their ductility decreases. The workability property of the metallic material is decreased. The heat treatment named as recrystallization should be done to give back the material its reworkability property. This is an annealing process and it is applied to cold worked metallic materials to obtain new and stress free grains. The structures of metallic materials are unstable thermodynamically after cold deformation, therefore recrystallization heat treatment allows recovery process by reduction or removal of stresses on the grains and increases equiaxed grains formed from the elongated grains. This heat treatment decreases the strength and hardness and increases ductility. Recrystallization of cold deformed metallic materials is carried out at 30 – 60% of the melting temperature of the material. This temperature depends on the initial grain size, composition, impurity content and degree of cold deformation.

The three steps in recrystallization are recovery, recrystallization and grain growth. The driving force in the recrystallization of deformed metallic materials is the stored energy. The recovery occurs at low temperatures and no change in the microstructure is observed. Dislocations move and rearrange, residual stresses decrease in the structure during recovery. Recrystallization is polygonizing and annihilating process of dislocations. Dislocation density decreases during recrystallization and therefore strength decreases and ductility increases. Finally grain growth takes place in the structure, as depending on temperature and time.

Kinetic studies of solid state transformations such as recrystallization of deformed materials and phase transformations can be done by non-isothermal kinetic analysis methods. Isothermal kinetic analysis requires a kinetic function for the evolution the reaction rate with time and the kinetic parameters such as the pre-exponential factor. The non-isothermal kinetic analysis is the alternative model-free methods based on the isoconversional method. The thermal analysis, such as differential thermal analysis (DTA), differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetry (TG), are used to study the non-isothermal kinetics.

In this thesis, differential scanning calorimetry (DSC) was used to investigate the recrystallization kinetics of cold drawn SAE 1008 steel wire. The recrystallization peak temperatures were determined in the thermal analysis graphs taken at 5 – 10 – 15 – 20°C/min heating rates (β) and the activation energy values (E) required for recrystallization were determined with non-isothermal kinetics models such as Kissinger, Boswell, Ozawa and Starink.

The recrystallization peak temperatures obtained from differential scanning calorimetry data were between 447,6 °C and 475,4 °C for 31,8% cold deformed SAE 1008 steel wire and between 434,3 °C and 462,7 °C for 92,7% cold deformed SAE 1008 steel wire, depending on different heating rates. The graphs of Kissinger ($\ln(\beta/T^2) - 1/T$), Boswell ($\ln(\beta/T) - 1/T$), Ozawa ($\ln(\beta) - 1/T$) and Starink ($\ln(\beta/T^{1.92}) - 1/T$) methods were drawn by using recrystallization peak temperatures. The slopes in the graphics are equal to $-E/R$, so the activation energies can be determined from the slopes.

The recrystallization activation energies for 31,8% cold deformed SAE 1008 steel wire are determined as 210,7 kJ/mole, 216,7 kJ/mole, 212,1 kJ/mole and 211 kJ/mole according to Kissinger, Boswell, Ozawa and Starink methods, respectively. Considering these four models, the recrystallization activation energy for 31,8% cold

deformed SAE 1008 steel wire is $212,6 \pm 2$ kJ/mole. The recrystallization activation energies for 92,7% cold deformed SAE 1008 steel wire are determined as 194,9 kJ/mole, 200,8 kJ/mole, 196,8 kJ/mole and 195,2 kJ/mole according to Kissinger, Boswell, Ozawa and Starink methods, respectively. Considering these four models, the recrystallization activation energy for 92,7% cold deformed SAE 1008 steel wire is $196,7 \pm 2$ kJ/mole.

It can be explained from these studies that cold deformation of SAE 1008 steel wires increased their strength and hardness, decreased their ductilities due to stored energy formed during cold drawing. As the amount of cold deformation on SAE 1008 steel wires increased, the recrystallization temperature and the recrystallization activation energy decreased slightly.

1. GİRİŞ

Çelik, endüstriyel öneme sahip, kullanım alanı geniş ve tekrar tekrar kullanılabilen bir demir – karbon alaşımıdır. En bilinen mühendislik malzemesidir ve dayanıklı ve kullanılacağı alana uyarlanabilir. Alaşımlama elementlerinin katkısıyla 2000'e varan türü bulunmakta ve bunlar çeşitli standartlarla sınıflandırılmaktadır. Çelik üretimi düşük maliyetle üretilebilir, kolaylıkla geri dönüştürülerek kullanılabilir ve çevreye karşı sorunlu olmayan bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Kullanılacağı yere göre kolaylıkla şekillendirilebilir, birleştirilebilir ve istenen özellikler alaşımlama ve ısı işlemler sayesinde sağlanabilir. Entegre demir - çelik tesislerinde cevherden ya da elektrik ark fırınlarında hurdadan üretilen çelik, kullanım yerine bağlı olarak gerekli boyutsal, teknolojik ve arzu edilen mekanik özelliklere sahip olması için yassı kütük (slab), kaba kütük (blum), kütük (bilet) ve ingotlar halinde dökülüp daha sonraki kademelerle şekil verme ve ısı işlemlerle nihai ürüne dönüştürülmektedir (Koçak, 2012).

Çelik, kristalin yapıda olup dışarıdan uygulanacak bir kuvvetin etkisi ile yapısında plastik şekil değişimi yani deformasyon meydana gelmektedir. Malzemenin uygulanan kuvvet kaldırıldığı zaman malzemenin eski haline gelmesi, değişimin elastik şekil değişimi olduğunu, eski haline gelmemesi ise plastik şekil değişimine uğradığını göstermektedir. Plastik şekil değişiminde kristal kafesinde kayma düzlemlerinde kaymalar gerçekleşmektedir. Plastik şekil değişimi devam ettiği süreçte kristal kafesi içinde distorsiyonlar belirli bir seviyeye gelir ve kayma işlemleri kısıtlanır. Deformasyon sertleşmesi olarak adlandırılan ve istenmeyen bu özelliğin giderilmesi ve malzemenin yeniden şekil verilebilir hale gelebilmesi için ilk özelliklerine dönmesi gerekmektedir. Plastik şekil verilmesi sürecinde dislokasyon yoğunluğunun artması sonucunda yapıda süneklilik yani şekil verilebilme özelliği azalmaktadır. Plastik şekillendirme esnasında deformasyona uğrayan çelik, yeniden kristallenme işlemi uygulanarak kristal yapısı eski haline gelmekte ve yeniden şekil verilebilir özelliğine sahip olmaktadır (Grecu 2021; Koçak, 2012; Raougui, 2021; Raougui, 2023).

Sade karbon çelikleri dünya genelinde üretilen çeliklerin % 85'inden fazlasını oluşturur ve en genel kullanılan demir – karbon alaşımıdır. Çelikleri karbon içeriğine göre sınıflandırmak olağandır ancak belirli sınırlar iyi tanımlanmamıştır (Lyon, 2010).

Bu tez çalışmasında, Karabük'de bulunan Pelenkoğlu firmasından temin edilen SAE 1008 elik telin, soğuk çekme işlemi ile deformatsyona uğratılması sonucunda mekanik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Bununla beraber soğuk tel çekme sonrasında elik tellerde yeniden kristallenme kinetiği, bir termal analiz türü olan diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) ile, Kissenger, Ozawa, Boswell ve Starink modelleri gibi izotermal olmayan kinetik yöntemler kullanılarak incelenmiştir.

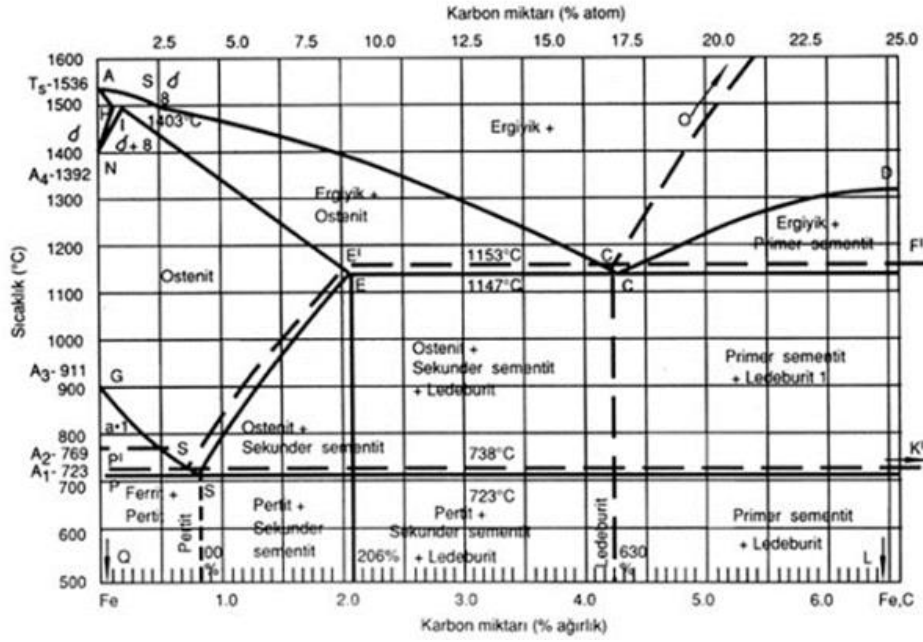
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. elik

Demir (Fe) – Karbon (C) denge diyagramında ağırlıkça %0,02 ile %2,3 C içeren alaŐımlarına elik adı verilmektedir. Mekanik zellikleri içerisinde bulunan karbon ağırlığına göre deđiŐkenlik göstermektedir. Karbon, çeliklerdeki faz iliŐkisini mikroyapıyı ve özellikleri deđiŐtirir. Genel olarak sünekliği ve tokluğu yüksek, iyi kaynaklanabilirlik özellikleri istenen çeliklerde karbon içeriği düşük bulundurulurken, mukavemeti ve sertliği yüksek, yorulmaya ve aşınmaya karşı dirençli olması istenen çeliklerde daha yüksek seviyelerde tutulur.

Piyasadaki tüm çelikler form olarak demir ve karbon içerse de farklı türdeki çeliklerin kimyasal yapısında farklı elementler bulunur. İçerdikleri alaşım elementlerine göre alt gruplandırılmaları olabilir. Basit karbonlu çelikler az miktarda mangenez ve karbon içerir, alaşımlı çelikler ise özellikle belirli miktarda dahil edilmiş olan farklı alaşım elementlerini içerebilir. Bu elementlere kobalt, bor, titanyum, nikel ve molibden örnek olarak verilebilir. Bu elementler madene işlenebilirlik paslanmayı nleme gibi özellikler sağırlar. Düşük maliyet ve yüksek mukavemet avantajı sebebiyle elik özellikle binalarda, altyapı elemanlarında, ısı direnç parçaları, gemilerde, trenlerde, arabalarda, makinelerde, elektrikli cihazlarda, savunma sanayinde gibi çeşitli alanlarda kullanılır (Callister ve Rethwisch, 2014).

Çeliklerin faz yapılarının belirlenmesinde sıcaklık ve karbon oranına bağlı olarak çizilmiŐ demir-karbon (Fe-C) faz diyagramları kullanılmaktadır. Şekil 2.1.'de Fe-C denge diyagramında elik bölgesinde sıcaklığa bağlı olarak oluşan faz yapıları ferrit (α), östenit (γ), sementit (Fe_3C) ve delta ferrit (δ) görülmektedir. Demir- karbon alaşımları karbon içeriğine göre elik veya dökme demir olarak tanımlanmaktadır. Çelikler %0,008 ile %2,1 oranları arasında karbon içeriğine sahiptir (Callister ve Rethwisch, 2014; Kkakarsu, 2022).



Şekil 2.1. Fe-C Denge Diyagramı (Callister ve Rethwisch, 2014).

Saf demir, başta karbon olmak üzere özellikle mangan, kükürt, fosfor ve silisyum gibi elementleri içermesi ile çeliği oluşturur. Allotropik özelliğe sahip olan demir, çeşitli ısıl işlem ve alaşımlamalar sayesinde farklı özelliklere sahip iki binden fazla türde üretilen bir mühendislik malzemesidir (Kayır, 2001).

Dünya genelinde en çok kullanılan alaşım olan çelik, ülkelerin kalkınmasında da önemli rol oynamaktadır. Sürekli olarak çeliğe olan talep artmakta ve buna paralel olarak da çelik üretim sektörü hızla büyümektedir. Demir çelik endüstrisinde sıvı ham çelik üretimi hem demir cevherinden hem de hurdalarından geri dönüşüm yoluyla gerçekleştiği görülmektedir. Cevherden üretim entegre tesislerde, hurdadan üretim ise elektrik ark ocaklarında gerçekleştirilmektedir (Ersundu, 2007).

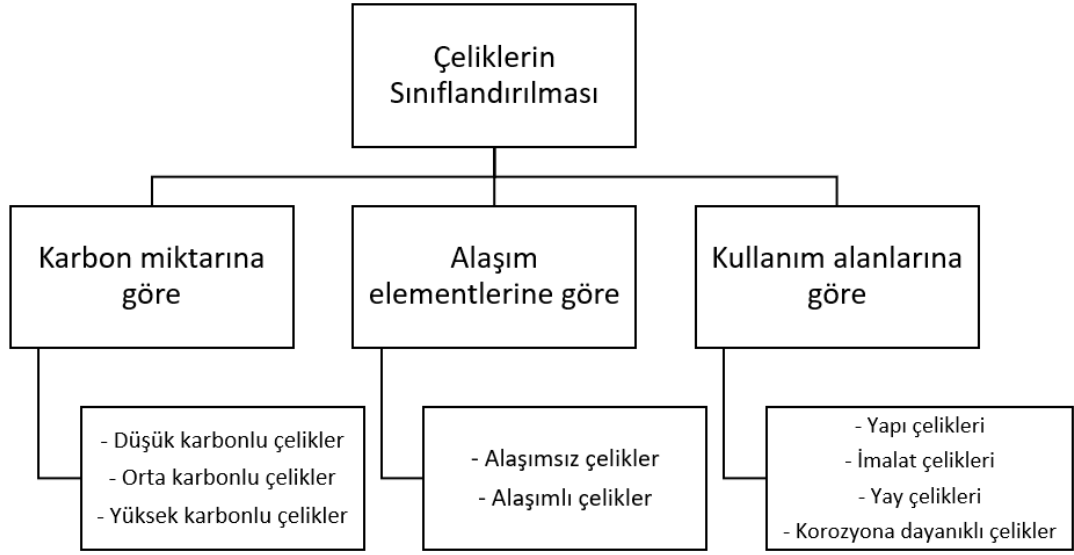
2.1.1. Çeliklerin sınıflandırılması

Çelik, aşağıdaki parametrelere bağlı olarak farklı sistemlerle sınıflandırılır;

- Karbon, paslanmaz çelik veya düşük alaşımlı gibi bileşim.
- Açık ocak, elektrikli fırın veya bazik oksijen işlemi yöntemleri gibi üretim yöntemleri.
- Sıcak veya soğuk haddeleme gibi nihai işlemler.
- Çubuk levha, boru, şerit veya yapısal şekil gibi ürün formu.
- Deoksidasyon uygulaması, öldürülmüş, yarı öldürülmüş, kapaklı veya kenarlı çelik.

- Ferritik, perlitik ve martensitik gibi mikro yapı.
- API, ASTM/ASME vb. gibi çeşitli endüstri standartlarında belirtilen gerekli güç seviyesi.
- Tavlama, söndürme ve temperleme gibi ısı işleme ve termomekanik işleme vb.
- Dövme kalitesi ve ticari kalite gibi kalite tanımlayıcılar (Singh, 2012).

Şekil 2.2.'de karbon miktarına, alaşım elementlerine ve kullanım alanlarına göre genel sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Çeliklerin genel sınıflandırmalarına göre şematik gösterim

Çelikleri çeşitli bakımlardan sınıflandırılmaktadır. Alaşım-sız çelik olarak ifade edilen çelik türünde ana bileşenler demir, karbon ve mangan olmakla birlikte çok az miktarda silisyum, fosfor ve kükürt içermektedir. Alaşım-lı çelik olarak ifade edilen çelik türünde ise karbon ve mangan içeriğinin yanısıra, molibden, krom, vanadyum, nikel ve wolfram gibi alaşımlama elementlerini de içermektedir.

Düşük karbonlu çelikler %0,30'a kadar C içerirler. Bu çelik sınıfının en büyük kategorisi, genellikle soğuk haddelenmiş ve tavllanmış durumdaki yassı haddelenmiş sac ve şerit ürünleridir. Bu yüksek şekillendirilebilir çelikler için karbon içeriği çok düşüktür, %0,10 C'den az ve %0,4'e kadar Mn içerir. Tipik kullanım alanları otomobil gövde panelleri, teneke levha ve tel ürünlerdir. Haddelenmiş çelik yapısal levhalar ve profiller için, karbon içeriği yaklaşık %0,30'a, daha yüksek manganez ise %1,5'e kadar yükseltilebilir. Bu son malzemeler dövme, dikişsiz borular ve kazan plakası için kullanılabilir (ASM Handbook, 1990).

En çok üretilen ve en çok kullanılan düşük karbonlu çeliklerde martenzitik dönüşümler olmadığı için soğuk şekillendirmeye uygundurlar ve bu yolla mukavemetleri arttırılabilir. Mikroyapıları ferrit ve perlitten oluşur. Mikroyapaları kaynaklı nispeten yumuşak ve düşük dayanım, yüksek tokluk ve süneklik özellikleri bulunmaktadır. Ayrıca bu çelikler kaynaklı birleştirmeye ve talaşlı imalata uygundurlar. Bu çelikler genellikle 275 MPa mertebesinde akma dayanıma, 415 ile 550 MPa aralığında çekme dayanıma kopma uzaması cinsinden %25 mertebelerinde süneklik değerine sahiptir (Callister ve Rethwisch, 2014).

Orta karbonlu çelikler %0,30 ile 0,60 arasında karbon ve %0,60 ile 1,65 arasında manganez içerirler. Manganezdeki artışla birlikte karbon içeriğinin yaklaşık %0,5'e çıkarılması, orta karbonlu çeliklerin su verilmiş ve temperlenmiş durumda kullanılmasına izin verir. Bu çelikler özellikle kaplin aks, dişli, krank mili, mil ve dövme yapımında kullanılır. Bu çeliklerin kimyasal yapısındaki karbon miktarının yüksek olması düşük karbonlu çeliklere göre daha sert özellikte olmalarını sağlar. Perlit hacim oranı daha yüksek olduğu için ısıtılma işlemi ile mekanik özellikleri ve işlenebilirlikleri iyileştirilebilmektedir (Singh, 2012).

Yüksek karbonlu çelikler %0,60 ile 1,4 arasında karbon içerirler, karbon çelikleri içinde en dayanıklı, en sert ancak en düşük süneklik özelliğine sahiptirlerdir. Bu çelikler genellikle su verme ve temperleme yapılmış halde kullanılırlar. Aşınma direncinin iyi olması istenen uygulamalarda tercih edilmektedir. Soğuk iş takım çelikleri ile kalıp çelikleri yüksek karbonun yanı sıra tungsten, krom, vanadyum ve molibden gibi alaşım elementleri de içermektedir. Bu alaşım elementleri karbonla birleşerek çeliğin yapısında sert ve aşınmaya dayanıklı karbür bileşikleri oluşturur. Bu tür çelikler; kesici takımların, şekillendirme kalıplarının imalatında kullanıldığı gibi bıçak, testere, jilet, yay ve yüksek dayanımlı tellerin üretiminde de kullanılır (Callister ve Rethwisch, 2014).

Alaşım elementi miktarı %5'in altında olan çeliklere düşük alaşımlı çelik, %5'in üzerinde olan çeliklere ise yüksek alaşımlı çelik denilmektedir (Serfiçeli, 2001).

Alaşım çeliklerin genel sınıflandırması;

- Karbon hariç alaşımlama elementi % 2 – 5 aralığında ise düşük alaşımlı çelikler
- Karbon hariç alaşımlama elementi % 5'den fazla ise yüksek alaşımlı çelikler
- Mikroalaşımlı çelikler

Düşük alaşımlı çelikler, alaşım çeliklerine kıyasla ısıtma sırasında düşük çatlama daha yüksek sertleşme kabiliyetine ve çarpılma özelliğine sahiptirler. Az alaşımlı çeliklerde genellikle nikel, krom molibden ve volfram bulunmaktadır. İlave olarak kurşun, kobalt, bor, bakır, alüminyum, kurşun, titanyum ve niyobyum da ilave edilmektedir. % 5'den fazla alaşımlama elementi içeren yüksek alaşımlı çelikler ise takım çelikleri ve paslanmaz çeliklerdir (Çarboğa, 2010).

Mikroalaşımlı çelikler, yüksek mukavemete sahip düşük alaşımlı çeliklerdir ve HSLA (High Strength Low Alloy) simgesiyle gösterilirler. Geleneksel karbon çeliklerine göre atmosferik korozyona karşı daha fazla dirence sahip ve daha iyi mekanik özellikler sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. HSLA çelikleri yeterli şekillendirilebilir ve kaynaklanabilir özellikleri olması için düşük karbonlu (%0,05–0,25) ve maksimum %2,0 mangan içermesi gerekir. Spesifik özellikler kazandırmak için krom, nikel, molibden, bakır, azot, vanadyum, niyobyum, titanyum ve zirkonyum da ilave edilmektedir (ASM Handbook, 1990).

Üstün atmosferik korozyon direnci sergilemek üzere tasarlanmış SSAB siper çelikleri, kontrollü haddelenmiş çelikler, önceden belirlenmiş bir haddelendirme programına göre sıcak haddelenmiş, soğutma sırasında çok ince eş eksenli bir ferrit yapıya dönüşecek olan oldukça deforme olmuş bir östenit yapı geliştirmek üzere tasarlanmıştır.

Perlitli azaltılmış çelikler, çok ince taneli ferrit ve çökeltme sertleştirilmesi ile güçlendirilmiş, ancak düşük karbon içeriğine sahip ve bu nedenle mikroyapılarında çok az perlit vardır veya hiç yoktur.

Tane boyutunu iyileştirmek ve/veya çökeltme sertleştirilmesi için niyobyum, vanadyum ve/veya titanyum gibi elementlerin çok küçük ilaveleriyle (her biri genellikle <%0,10) mikroalaşımlı çeliklerdir.

İğnemsiz (asiküler) ferrit çelik, soğutma sırasında normal poligonal ferrit yapı yerine çok ince, yüksek mukavemetli iğnemsiz ferrit yapıya dönüşmek için yeterli sertleşebilirliğe sahip çok düşük karbonlu çelikler.

Çift fazlı çelikler, düşük akma mukavemeti ve yüksek oranda sertleşmeye sahip bir ürünle sonuçlanan, yüksek karbonlu martenzitin küçük düzgün dağılmış bölgelerini içeren bir ferrit mikro yapısına işlenir, böylece üstün şekillendirilebilirliğe sahip yüksek mukavemetli bir çelik elde edilir (ASM Handbook, 1990).

Düşük alaşımlı çelikler, nikel, krom ve molibden gibi alaşım elementlerinin ilave edilmesiyle düşük karbonlu çeliklerden daha üstün mekanik özellikler sergiler. Alaşım içeriği %2,07'den minimum %10 krom içeren paslanmaz çeliklerin altındaki seviyelere kadar değişebilir. Birçok düşük alaşımlı çelik için, alaşım elementlerinin temel görevi, ısıtılma işlem sonrasında arzu edilen mekanik özellikleri sağlamak içindir. Genel olarak çeliklerde olduğu gibi, düşük alaşımlı çelikler, molibden çelikleri, nikel çelikleri, nikel-krom çelikleri, nikel çelikleri ve krom-molibden çelikleri gibi kimyasal bileşimlerine göre sınıflandırılabilir. Çelikler su verilmiş ve temperlenmiş, normalize edilmiş ve temperlenmiş veya tavlanmış gibi ısıtılma işlemlerine göre de sınıflandırılırlar. Çok çeşitli olası kimyasal bileşimler ve bazı çeliklerin birden fazla ısıtılma işlem görmüş durumda kullanılması nedeniyle, alaşımlı çelik sınıflandırmaları arasında bir miktar benzerlik vardır. Dört ana alaşımlı çelik grubu tanımlanmıştır.

Düşük karbonlu su verilmiş ve temperlenmiş çelikler 350 ila 1035 MPa arasında değişen yüksek akma dayanımını iyi çentik tokluğu, süneklik, korozyon direnci ve kaynaklanabilirlik ile birleştirir. Amaçlanan uygulamalarına göre değişen özelliklere sahip bu çeliklerin farklı kombinasyonları vardır.

Orta karbonlu ultra yüksek mukavemetli çelikler akma dayanımları 1380 MPa geçebilen yapı çelikleridir. Bu çeliklerin çoğu SAE/AISI tanımlamaları kapsamındadır. Ürün formları arasında kütük, çubuk, çubuk, dövme, levha, boru ve kaynak teli bulunur.

Rulman çelikleri bilyalı ve makaralı rulman uygulamalarında kullanılmaktadır. Yaklaşık %0,10 ila 0,20 oranında düşük karbon içerirler ve bu çelikler yüzey sertleştirilmiştir. Bu çeliklerin çoğu SAE/AISI tanımlamaları kapsamındadır.

Krom-molibden ısıya dayanıklı çelikler, %0,5 ila %9 krom ve %0,5 ila %1,0 molibden içerir. Karbon içeriği genellikle %0,2'nin altındadır. Krom, geliştirilmiş oksidasyon ve korozyon direnci sağlar ve molibden ise yüksek sıcaklıklarda mukavemeti artırır. Genellikle normalleştirilmiş ve temperlenmiş, su verilmiş ve temperlenmiş veya tavlanmış durumda tedarik edilirler. Krom-molibden çelikleri, petrol ve gaz endüstrilerinde ve fosil yakıt ve nükleer enerji santrallerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (ASM Handbook, 1990).

Teknoloji ile birlikte ve farklı çelik kalitelerinin geliştirilmesi ile çelik hemen hemen birçok endüstriyel alanda kullanılan bir malzeme haline gelmiştir. Çeliklerin sahip

olduğu mekanik özellikleri alaşım elementi ilaveleri ve farklı üretim prosesleri ile değiştirmek mümkündür. Çeliklerin kullanım alanına göre sınıflandırılması řu şekilde yapılabilmektedir (Serfiçeli, 2001).

Yapı eliklerinin kullanım alanlarına örnek makine elemanları, sanayi aksamaları, inşaat sektöründeki elik tasarımlar verilebilir. Rulman elikleri ve yay çelikleri de yapı çelikleri sınıfında sayılmaktadır (ztrk, 2023).

Yay elikleri Farklı kesitlere sahip yayların üretiminde yay çelikleri kullanılmaktadır. Yay eliklerinin karbon miktarı yapı eliklerindeki nazaran daha fazla, takım eliklerindeki nazaran daha azdır. Bu eliklerde akma/çekme mukavemet oranı yüksektir.

Hız elikleri geometrisi belli kesici uçlar ile kesme işlemlerinde kullanılır ve 50 m/dak. hızlı kesme işlemleri yapılabilir. Kesici u tavlama sıcaklığına kadar ulaşsa bile kesmeye devam eder. Hız eliklerine ısıl işlem yüksek sıcaklıklarda (1150 – 1350°C) yapılır. Parçalar nce 850 °C'ye ısıtılır, tane büyümesi ve oksitlenme engellenerek tavlama sıcaklığına ulaştırılırlar, ardından soğutma ve sertleştirme işlemleri yapılır. Soğutma havada ve yağda yapılır. Matrak, freze, diş açıcı uçlar ve metal testerelemelerde örnek olarak verilebilir (ASM Handbook, 1990).

Paslanmaz elikler, minimum yaklaşık %11 Cr içeren demir bazlı alaşımlardır. Bu, yüzeyde paslanmayı önlemek için pasifleştirici bir krom açısından zengin oksit tabakası oluşturmak için önemlidir. Dayanmaları beklenen belirli çevresel talepleri karşılamak için çeşitli paslanmaz elik kaliteleri üretilir. Bu amaçla çeliğe nikel, bakır, titanyum, alüminyum, silikon, molibden, niyobyum, nitrojen kükürt ve selenyum gibi başka elementler de eklenir.

Takım elikleri çelikler de dahil tüm malzeme işlemleri işlemede kullanılan aletlerin, yani takımların imalatında kullanılan çeliklerdir. Yüksek sertlik değerine ve yeterli sayılacak tokluk değerlerine sahiplerdir (Singh, 2012).

Sementasyon elikleri düşük karbonlu çeliklerdir. Yüzeyi sert, aşınmaya direnci yüksek, iç kısmı yumuşak ve tok olan darbe direnci yüksek parçaların üretiminde kullanılırlar. Sementasyon işlemi yapılarak küçük çaplı miller ve dişli çarklar gibi makine parçaları üretilir (Asi ve Can, 2001).

2.1.2. Çelik standartları

Adlandırma, çeliğin her sınıfının, tipinin veya sınıfının, belirli bir çeliğe özgü bir sayı, harf, sembol, ad veya bunların uygun kombinasyonu ile özel olarak tanımlanmasıdır. Derece, tip ve sınıf, çelik ürünleri sınıflandırmak için kullanılan terimlerdir. Çelik endüstrisinde çok özel kullanımları vardır: derece, kimyasal bileşimi belirtmek için kullanılır; tip, deoksidasyon uygulamasını belirtmek için kullanılır ve sınıf, mukavemet seviyesi gibi diğer bazı nitelikleri tanımlamak için kullanılır.

Kimyasal bileşim, çeliklerin sınıflandırılması ve/veya adlandırılması için açık ara en yaygın kullanılan temeldir. Tablo 2.1.'de standartların kısaltmaları ve açılımları gösterilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde kullanılan atama sistemi, Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE) ve Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü'nün (AISI) sistemidir. Birleşik Numaralandırma Sistemi (UNS) de artan sıklıkta kullanılmaktadır (ASM Handbook, 1990).

Tablo 2.1. Çeliklerin standartları (İçin, 2019).

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

Tablo 2.2. SAE ve AISI çelik standartları (İçin, 2019).

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)

Otomotiv Mühendisleri Birliği (SAE), çeliklerin standartlaştırılması konusunda ilk çalışmayı yapan birlik olmuştur. Amerikan Demir Çelik Enstitüsü (AISI), benzer bir standartlaştırma sistemini ortaya koymuştur.

SAE sistemi, karbon ve alaşımlı çeliklerin kimyasal bileşimini belirtmek için temel bir dört basamaklı sistem kullanır. Tablo 2.2.'de SAE ve AISI için simgeler gösterilmiştir. Bu atamanın ilk rakamı (1), bir karbon çeliğini belirtir; yani karbon çelikleri SAE-AISI sisteminde 1xxx grubu içerir ve aralarındaki bazı temel özelliklerin farklılığından dolayı dört kategoriye ayrılır. İlk 2 rakam çeliğin ait olduğu alaşım grubunu (XXXX) son iki rakam (XXXX) karbon miktarını % olarak verir.

Tablo 2.3. Çeliklerin kullanım alanlarına göre sınıflandırılması (İçin, 2019).

Simge	Açılımı	Örnek
S	Yapısal çelik mühendisliği için çelikler	S235JR; S355J0
P	Basınçlı kap yapımında kullanılan çelikler	P265GH; P355M
L	Boru hattı için çelikler	L360A; L360QB
E	Mühendislik çelikleri	E295; E360
B	Takviye çelikleri	E500A; B500B
Y	Öngerilmeli çelikler	Y1770C; Y1230H
R	Raylar için çelik	R350GHT
H	Daha yüksek mukavemetli çekme kalitesine sahip soğuk haddelenmiş yassı haddelenmiş çelikler	H400LA
D	Soğuk şekillendirme için yumuşak çelikten yapılmış yassı ürünler	DC04; DD14

DIN standartları, Federal Almanya Cumhuriyeti'ndeki Deutsches Institut für Normung tarafından geliştirilmiştir. Tüm Batı Almanya çelik spesifikasyonlarından önce büyük harflerle DIN ve ardından alfanümerik veya sayısal bir kod gelir. Werkstoff sayısı olarak bilinen ikinci yöntem, yalnızca ilk basamaktan sonra bir ondalık nokta bulunan sayıları kullanır. Alman çelik standartları ve spesifikasyonları, EN veya DIN harfleriyle ve ardından alfanümerik veya sayısal bir kodla temsil edilir (ASM Handbook, 1990).

EN kodu içinde çelik kalitesine ilişkin özel bilgiler yer alır ve aşağıdaki şekilde sınıflandırılır. Çeliklerin belirlenmiş kullanımlarına göre sınıflandırılmalarından bazıları Tablo 2.3.'de gösterilmektedir.

JIS standartları, Tokyo'daki Uluslararası Ticaret ve Sanayi Bakanlığı'nın bir parçası olan Japon Endüstriyel Standartlar Komitesi tarafından geliştirilmiştir. JIS çelik standartları, büyük JIS harfleriyle başlar ve standardın bölümünü belirten bir büyük harfle (karbon ve düşük alaşımlı çelikler söz konusu olduğunda G) gelir. Bu harfi, belirli çeliği gösteren bir dizi sayı ve harf takip eder. Örnek olarak JIS G3445 STKM11A, %0,12 C, %0,35 Si, %0,60 Mn, %0,04 P, %0,04 S içeren düşük karbonlu bir boru çeliğidir.

İngiliz standartları (BS), Londra, İngiltere'deki İngiliz Standartları Enstitüsü tarafından geliştirilmiştir. JIS standartlarına benzer şekilde, her İngiliz tanımı bir ürün formu ve bir alaşım kodu içerir. Örnek olarak BS 979 708A37, %0.35–0.40 C, %0.10–0.35 Si, %0.70–1.00 Mn, % 0.040 P, % 0.050 S, %0.90–1.20 Cr, %0.15–0.25 Mo içeren düşük karbonlu çeliktir.

AFNOR standartları, Fransa'nın Paris kentindeki Association Francaise de Normalization tarafından geliştirilmiştir. Sayısal kodun soluna büyük harfli bir NF yerleştirilir. Bu kod, bir büyük harfin ardından bir dizi rakamdan ve ardından alfanümerik bir diziden oluşur. Örnek olarak NF A35-562 35MF6, yeniden kükürtlenmiş (serbest kesim) bir çeliktir: %0.33–0.39 C, %0.10–0.40 Si, %1.10–1.70 Mn, % 0.040 P, % 0.09–0.13 S içerir.

UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione) tarafından Milano, İtalya'da geliştirilmiştir. İtalyan standartlarından önce büyük UNI harfleri ve ardından dört basamaklı bir ürün form kodu ve ardından alfanümerik bir alaşım tanımlaması gelir.

Örnek olarak UNI 5598 3CD5 düşük karbonlu bir çeliktir ve içeriği; %0,06 C, %0.25–0.50 Mn, %0.035 P, % 0.035 S, % 0.007 N içerir.

Tablo 2.4. Çelik standartları için çapraz referans gösterimi (ASM Handbook, 1990).

Amerika (SAE)	Almanya (DIN)	Japonya (JIS)	İngiltere (BS)	Fransa (AFNOR NF)	İtalya (UNI)	İsveç (SS14)
1005	1.0288, D5-2 1.0303, QSt32-2 1.0312, D5-1 1.0314, D6-2 1.0393, ED3 1.0394, ED4 1.1012, RFe120	...	970 015A03		5598 3CD5	1160
1006	1.0311, D7-1 1.0313, D8-2 1.0317, RSD4 1.0321, St23 1.0334, StW23 1.0335, StW24 1.0354, St14Cu3 1.0391, EK2 1.0392, EK4 1.1009, Ck7		970 030A04 970 040A04 970 050A04	A35-564 XC6FF	5598 3CD6 5771 C8	1147 1225
1008	1.0010, D9 1.0318, St28 1.0320, St22	G3445 ÅSTKM11 A	1449 3CR 1449 3CS 1449 3HR	A35-551 XC10 XC6 XC6FF	5598 3CD8	1142 1146

İsveç standartları (SS14) Stockholm'deki İsveç Standartları Enstitüsü tarafından geliştirilmiştir. Tanımlar SS harfleriyle başlar ve ardından 14 rakamı gelir (tüm İsveç karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler SS14 kapsamındadır). Ardından, Alman Werkstoff numarasına benzer dört basamaklı bir sayısal dizi gelir (ASM Handbook, 1990).

Tablo 2.4.'de standart SAE düşük karbonlu çeliklerinin, Federal Almanya Cumhuriyeti, Japonya, Birleşik Krallık, Fransa, İtalya ve İsveç'teki standart kuruluşları tarafından belirlenen gösterim şekli verilmiştir.

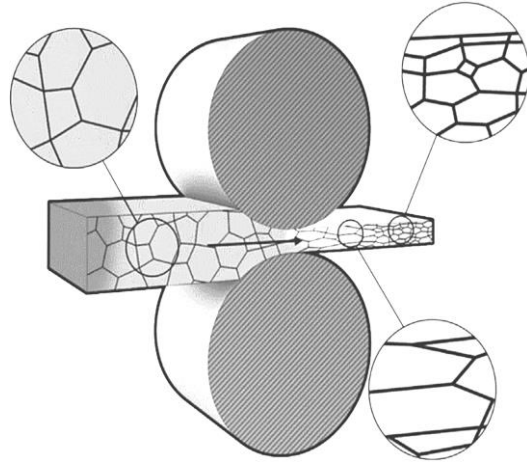
2.2. Plastik Şekil Verme Yöntemleri

Metalik malzemelerde plastik şekil verme işlemleri, katı halde bulunan malzemeyi şeklini değiştirmek amacıyla yapılan dövme, ekstrüzyon, çekme ve haddeleme gibi prosesleri kapsar. Plastik şekil değişimi metallere dış gerilemeler veya kuvvetler aracılığıyla akma dayanımının üzerinde olacak şekilde uygulanır. Metallerin çoğu bu yöntemde çatlayıp kırılmayacak derecede sünek davranış gösterirler.

Şekil değiştirme işlemi metalin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde yapılırsa sıcak şekil verme, ergime sıcaklığının %30'unun altında yapılırsa soğuk şekil verme olarak tanımlanmaktadır. Şekil verme işlemleri hem sıcak hem de soğuk olarak gerçekleştirilebilmektedir. Sıcak şekil verme işleminde işlenen parça sünektir ve daha kolay şekil değişimleri olur. Soğuk şekil vermede ise şekil değişimi için gerekli enerji daha fazladır. Sıcak şekil vermede parçanın yüzeyinde oksitlenme oluşur. Malzeme kaybı olur ve kötü bir yüzey görüntüsü oluşur. Soğuk şekil vermede malzemede pekleşme oluşur, süneklik azalır. Soğuk şekil vermede daha iyi mekanik özellikler, daha iyi bir yüzey görünümü, hassas boyut ve toleransların elde edilir. Bazen, toplam deformasyon, parçanın art arda az miktarda soğuk işlendiği ve yeniden kristalleştirme tavı uygulamalarıyla sağlanabilir. Bu tür işlemler, elverişsiz ve maliyetlidir (Callister ve Rethwisch, 2014).

2.2.1. Haddeleme ile şekillendirme

Haddeleme işlemi en çok kullanılan metal şekillendirme işlemidir. Şekil 2.3.'de gösterildiği gibi haddeleme işlemi parçaların kalınlıklarının düşürülerek daha düzgün duruma getirilmesi için tek ya da çoklu kademede gerçekleştirilen bir işlemdir. Bu işlem, yapılan işlem sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Yapılan işlem yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde ise sıcak haddeleme, altında ise soğuk haddeleme olarak tanımlanmaktadır. Sıcak haddeleme ile parlamayan bir yüzey ve esnek bir yapı oluşturulur. Soğuk haddelemede ise daha parlak bir yüzey ve mukavemet değeri yüksek özellikler elde edilir (Yelin ve Tatlıer, 2019).



Şekil 2.3. Haddemeleme işlemi (Ikumapayi ve ark., 2020).

Sac, levha veya folyo gibi yassı ürünlerin üretiminde daha çok soğuk haddemeleme, farklı kesitlere sahip ürünler sıcak haddemeleme ile üretilmektedir. Yuvarlak kesitli metaller, tren rayları ve I-profilleri üzerinde uygun şekilde oluklar işlenmiş merdaneler kullanılarak üretilir (Callister ve Rethwisch, 2014).

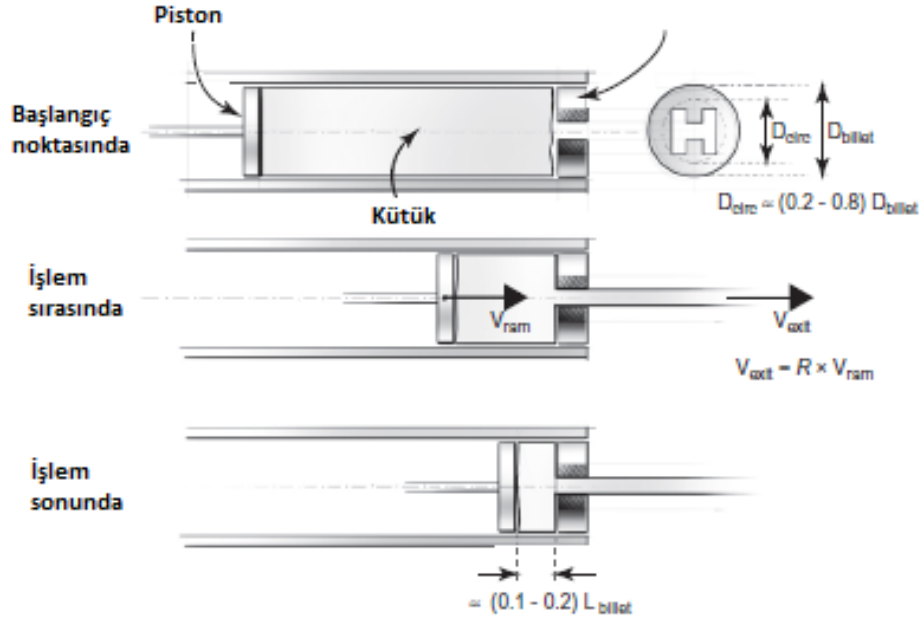
Haddemeleme işleminde malzemedeki tane yapısı yönlenmiş olarak görülmektedir. Kristaller kayma yönünde uzarlar. Soğuk haddemede işleminde taneler uzun hale gelirken, sıcak haddemede taneler deformasyon bölgesinden sonra yeni hal alarak biçimlenirler (Yelin ve Tatlıer, 2019).

2.2.2. Ekstrüzyon ile şekillendirme

Ekstrüzyon, kovan adı verilen bir kalıp içerisine konulan parçanın kalıp çıkışına doğru bir kuvvet uygulanarak üretilmesi istenilen şekle sahip bir noktadan geçirilmesi işlemidir ve Şekil 2.4.'de gösterilmiştir. Bu yöntem ile farklı geometrilere üretim yapılması mümkün olup genelde akma mukavemeti düşük olan alüminyum, magnezyum, bakır ve kurşun gibi metallerin şekil verilmesinde kullanılmaktadır. Bu plastik şekil verme işleminde kullanılan kalıpların uygun olup olmaması, yüksek ürün kalitesi ve düşük şekil verme kuvveti açısından önemlidir. Uygulanacak kuvvet miktarı, kalıp tasarımı ve presleme aşaması bu işlemlerin temel noktasıdır. Parçanın özellikleri, sıcaklık, sürtünme koşulları, kalıp açısı, kalıp giriş çapı ve kalıp kanal uzunluğu gibi faktörler, şekil verme sırasında uygulanacak kuvvete, elde edilecek ürünün kalitesine ve maliyetine büyük oranda etki etmektedir (Ayer, 2019).

Ekstrüzyon ile üretilen ürünlere örnek olarak dikişsiz borular, tüpler ve farklı geometriye sahip profiller verilebilir. Ekstrüzyon endüstrisi, üretilen profillerin

kolaylıkla bükülmesine ve işlenmesine izin verir ve profili montaj işlemine hazır bir parçaya dönüştürür. Bu işlemler genelde alüminyum için geçerli olup bakır, pirinç ve düşük karbonlu çelikler için sınırlıdır. Magnezyum, alüminyum gibi yumuşak bir metal olmasına rağmen ekstrüde edilebilirliği sınırlıdır.

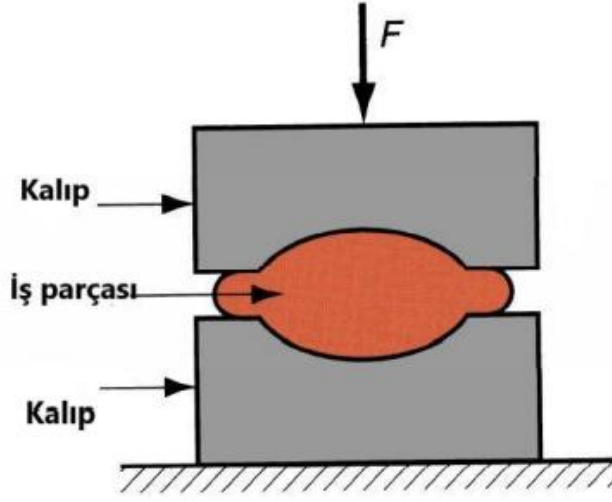


Şekil 2.4. Ekstrüzyon işlemi (Tempelman ve ark., 2014).

2.2.3. Dövme ile şekillendirme

Dövme iş parçasının, Şekil 2.5.'de gösterildiği gibi deforme etmek için darbe yükü veya hidrolik yük (veya kademeli yük) kullanılarak iki kalıp arasında sıkıştırıldığı bir deformasyon işlemidir. Otomotiv, havacılık ve diğer uygulamalar için çeşitli yüksek mukavemetli bileşenler yapmak için kullanılır. Bileşenler, motor krank millerini, bağlantı çubuklarını, dişlileri, uçak yapısal bileşenlerini, jet motoru türbin parçalarını vb. içerir (Narayanan, 2023).

Çelik ürünlerin yüksek mukavemetli ve ağırlığının azaltılarak üretilebilmesi için dövme ile üretilmesi önemlidir. Sıcak şekil vermede çelik iş parçası östenit sıcaklığının üzerine çıkarılır, soğuma olmadan kalıp içerisinde şekil verilir, martenzitik yapı elde etmek için hızlı soğuma işlemi gerçekleştirilir. Sıcak dövme işleminde düşük şekil verme kuvveti uygulanır. Bu durum firmaları sıcak dövme işlemine yöneltmiştir. Dövme işlemi enerjiye dayalı bir işlemdir (Bozkurt ve Ünver 2018).



Şekil 2.5. Dövme işlemi (Narayanan, 2023).

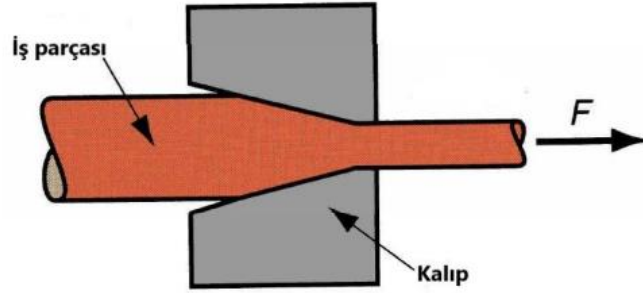
Açık kalıpta dövme, kapalı kalıpta dövme ve pres dövme işlemleri dövme işlemi türleridir. Bir kütüğün iki düz kalıp arasında sıkıştırılması açık kalıpta dövme işlemine bir örnektir. Kapalı dövme işlemi, iş parçasının şekil verilecek kalıbın şeklini aldığı yöntemdir. Pres dövme işlemi ise iş parçasının iki kalıp arasında bir hidrolik kullanılarak yapılan dövme ile şekil verme işlemidir. Üretilen üründe mikroyapı özellikleri kontrol edilebilmektedir (Narayanan, 2023; Raougui, 2021).

2.2.4. Çekme ile şekillendirme

Çekme işlemi, Şekil 2.6.'da gösterildiği gibi, bir iş parçasının şerit, yuvarlak çubuk veya borunun bir çekme kuvveti uygulanarak bir kalıptan çekilerek şekil değişikliğini veya enine kesit alanında azalmayı içeren bir soğuk işleme işlemidir. Malzemenin çekme kuvveti altında kalıp içinde plastik deformasyonu sağlayan, karşılıklı olarak iki dikey sıkıştırma kuvveti geliştirir. Çekme işlemi, çekme işlemindeki iş parçasının kalıbın çıkış ucunda uygulanan çekme kuvveti ile çekilmesi, ekstrüzyondaki iş parçasının kalıbın giriş tarafında uygulanan sıkıştırma kuvveti ile itilmesi dışında ekstrüzyon işlemine biraz benzer.

Arzu edilen bir şekil ve boyutu üretmek için, ham stok, giderek küçülen bir dizi kalıptan birkaç geçişle çekilerek art arda küçültülür. İş parçasının daha fazla soğuk işlenebilmesi için sünekliği eski haline getirmek için ara ısıl işlem veya tavlama gerekli olabilir. Çekme işlemi ile üretilen ürünler ya doğrudan kullanılır ya da bükme gibi ilave işlemlerle kullanılırlar. Ürüne istenilen şekil ve ebatı elde etmenin dışında soğuk çekmenin başlıca amaçları, hassas boyutsal toleranslar elde edilmesi, yüzey

kaplamalarını iyileştirilmesi ve oluşan gerilme sertleştirmesi ile mekanik özellikleri geliştirmektir (Bhaduri, 2018).



Şekil 2.6. Çekme işlemi (Narayanan, 2023).

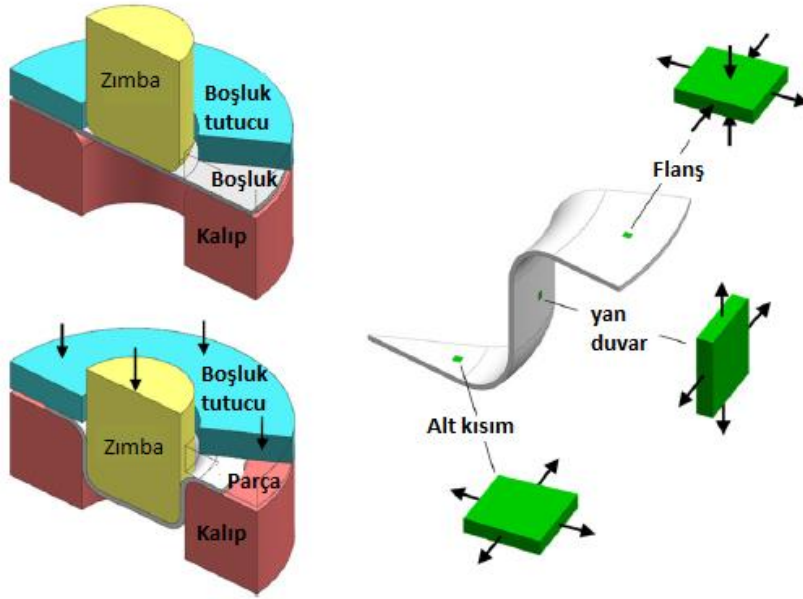
2.2.5. Derin çekme ile şekillendirme

Derin çekme işlemi düz, ince, dairesel bir sac levhanın soğuk çalışma sıcaklığında, şekil verilecek bir kalıbın üzerine yerleştirilmesi ve zımba adı verilen bir kuvvet uygulayıcı ile kalıbın içine bastırılarak yapılan bir şekil verme işlemidir. Sıcak ortamda derin çekme işleminde iş parçasında bükülme ve bozulmalar olabilir. Küvet, pişirme kapları, içecek kutuları, evyeler, basınçlı kaplar, otomobil gövde panelleri ve parçaları derin çekme ile üretilmektedir. Derin çekme işlemine sade karbon çelikleri, paslanmaz çelikler, alüminyum ve alaşımları, bakır ve alaşımları ve titanyumun uygun olduğu belirtilmiştir (Bhaduri, 2018).

Şekil 2.7.'de silindirik bir kabın derin çekilme işlemi ve deformasyonu süreci gösterilmektedir. Derin çekmede farklı bölgelerde farklı deformasyon oluşmaktadır. Flanş, yan duvar ve deformasyonların derin çekilen parçanın başarılı bir şekilde üretilip üretilmeyeceğini belirlediği tabandır (Shuhui, 2021).

Birçok derin çekme ürünü, hem çekme hem de gerdirme bölgeleri içermektedir. Gerilerek biçimlendirmede, hem çevre hem de çap artar ve kalınlıkta buna karşılık gelen bir azalma gerçekleşir. Bu ince kesit, şekillendirme işlemi sırasında parçaların yırtılmasına veya daha sonra kullanım sırasında aşındırıcı ortama maruz kaldığında erken hasara neden olabilir. Bu nedenle, çekme işlemi sırasında ne burkulma ne de incelmeye ile ilişkili esneme gibi sorunlara neden olmayan büyük miktarlarda çekme olmayan bölgeler tercih edilir ve genel olarak, kalınlığın ve yüzey alanının sabit kalması en istenen durumdur. Bir parçanın çizimi sırasında buruşmayı, yırtılmayı veya

istenmeyen kalınlık değişikliklerini önlemek için, metal akışının kontrolü genellikle bir tür baskı pedi veya halkası kullanılarak gerçekleştirilir (Bhaduri, 2018).



Şekil 2.7. Derin çekme işlemi (Shuhui, 2021).

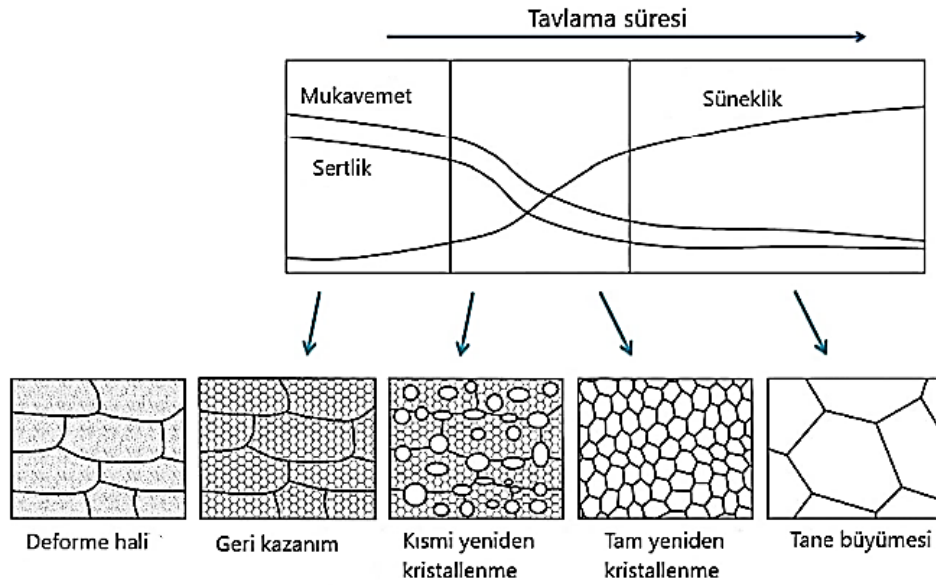
2.3. Yeniden Kristallenme Süreci

Çok kristalli bir metalin mutlak ergime sıcaklığına göre düşük sıcaklıklarda plastik olarak deforme edilmesi durumunda mikroyapısı ve mekanik özelliklerinde değişiklikler meydana gelmektedir. Bu değişimler tane şeklinin değişmesi, pekleşme görülmesi ve dislokasyon yoğunluğunda artmadır. Plastik deformasyon esnasında uygulanan enerjinin bir miktarı yeni oluşan dislokasyonların etrafındaki çekme, sıkışma ve kesme bölgeleriyle ilişkili olan gerinim enerjisi olarak metalde depolanır. Elektrik iletkenliği ve korozyon direnci gibi özellikler de plastik deformasyonun bir etkisi olarak değişmektedir (Callister ve Rethwisch, 2014).

Birçok metal ve alaşımda dislokasyon yoğunluğu değeri $10^{10} - 10^{11}/m^2$ değerinden, az bir deformasyon sonrasında $10^{12} - 10^{13}/m^2$ değerine, ağır bir deformasyon sonrasında da $10^{16}/m^2$ değerine kadar artmaktadır. Latis hataları, soğuk deformasyon miktarına bağlı olarak süneklik, tokluk, elektrik direnci, sertlik ve mukavemet gibi özellikleri değiştirir. Soğuk deformasyon sonrası mukavemet ve sertlik değerlerinin artması ve sünekliğin azalması nedeniyle ileri şekil değişimini sağlamak için malzemenin deformasyondan önceki haline gelmesi gerekmektedir (Raabe, 2014; Raougui, 2023).

Metallere uygulanacak uygun ısıl işlemler ile, soğuk şekil değişimi öncesi özellikleri ve yapısı geri kazandırılabilir. Bu tür yapı değişiklikleri, yüksek sıcaklıklarda meydana gelen iki farklı süreçten kaynaklanır; toparlanma ve yeniden kristalleşme ardından tane büyümesi gelmektedir (Callister ve Rethwisch, 2014).

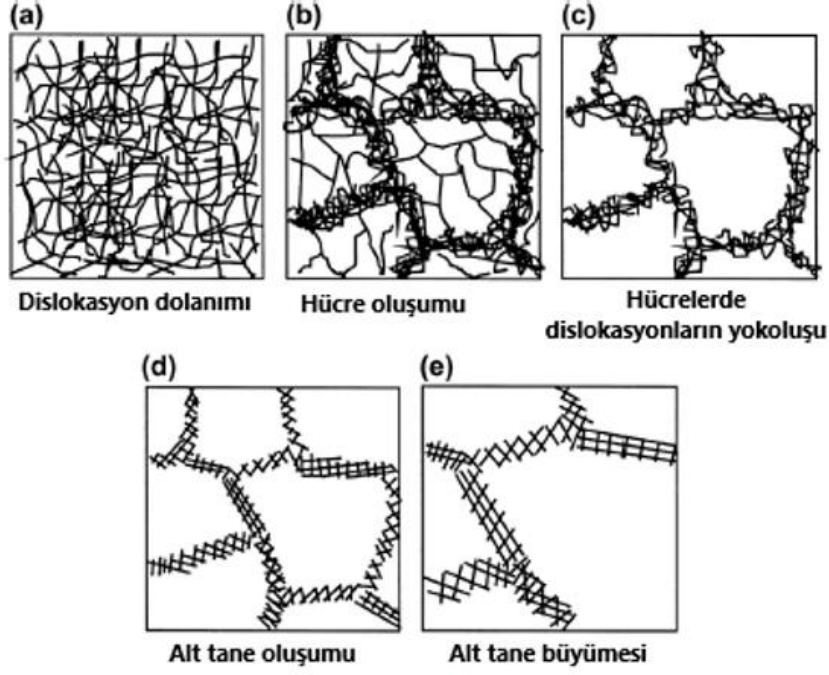
Soğuk şekil verilmiş malzeme yapısının, deformasyondan önceki yapısına getirilmesi amacıyla gerçekleştirilen yeniden kristallenme işlemi, Şekil 2.8.'de sunulduğu gibi, toparlanma, yeniden kristallenme ve tane büyümesi işlemleri içermektedir.



Şekil 2.8. Yeniden kristallenme kademelerindeki değişimler (Raabe, 2014).

Toparlanma sırasında yüksek sıcaklıkta artan atomsal yayınma sonucu (gerilme uygulanmaksızın) oluşan dislokasyon hareketi sayesinde depolanan şekil değişimi enerjisi bir miktar azalır. Dislokasyonların sayısında bir miktar azalma meydana gelir ve mevcut dislokasyonlar, çevrelerindeki şekil değişimi enerjilerini düşürmek üzere düşük enerjili bir düzene girer. Toparlanma neticesinde, metalin elektrik ve ısıl iletkenliği gibi fiziksel özellikleri, soğuk şekil değişimi öncesindeki durumlarına geri döner (Callister ve Rethwisch, 2014).

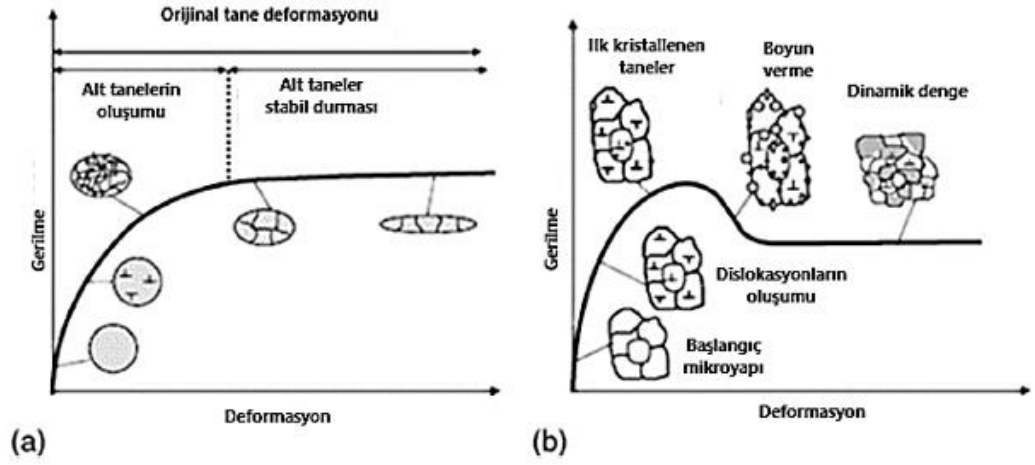
Düşük enerjiye sahip dislokasyonların yeniden düzene girmesine poligonizasyon denir. Poligonizasyon dislokasyonların küçük açılı sınırlar meydana getirmesini sağlar. Bu nedenle yapıda alt taneler meydana gelir (Alaneme ve Okotete, 2018; Humphreys ve ark., 2017; Raougui 2021; Smallman ve Bishop, 1999).



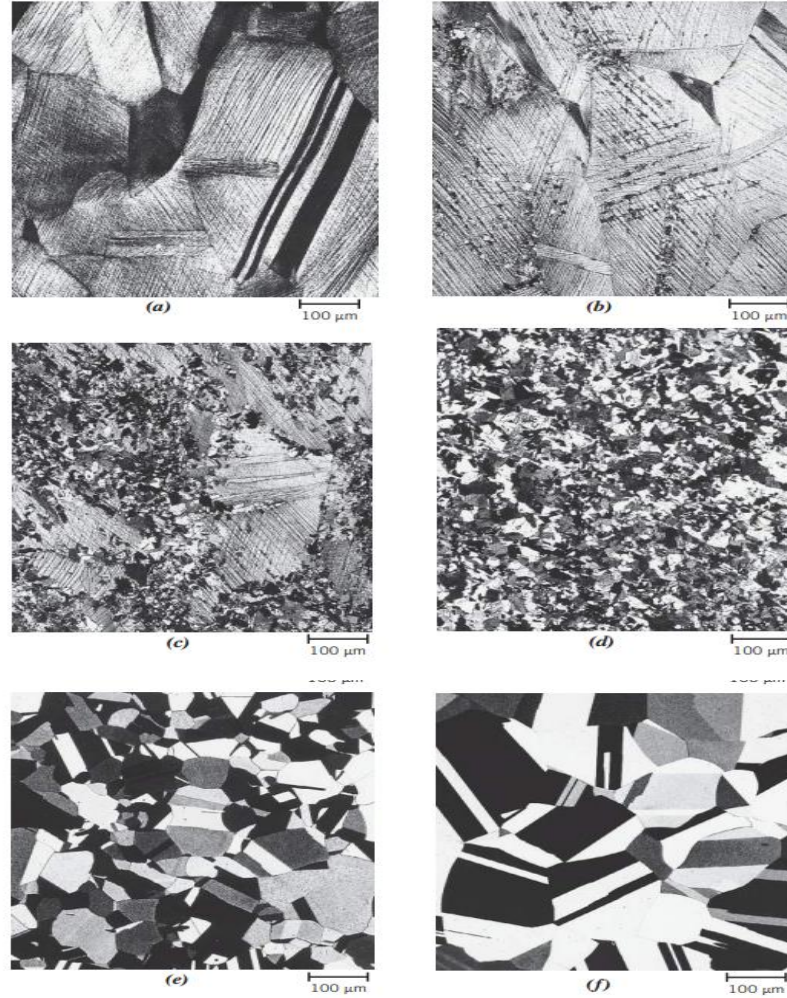
Şekil 2.9. Deformasyon sonrası yapıda toparlanma safhası (Humphreys ve ark., 2017). Toparlanma işlemi tamamlanmış olsa bile taneler sonrasında hala yüksek şekil değişimi enerjisi barındırırlar. Yeniden kristallenme sırasında, dislokasyon yoğunluğu düşük ve eş eksenli yani aynı boyutlara sahip yeni taneler oluşur. Böylelikle malzeme soğuk şekillendirme öncesindeki özelliklerini geri kazanır. Yeni tanelerin oluşmasındaki itici güç, malzemelerin şekil değiştirmiş ve değiştirmemiş hallerindeki iç enerjileri arasındaki farktır. Kısa mesafeli yayınma sonucu, yeni taneler çekirdeklenir ve çekirdeklenen bu yeni taneler deformasyona uğramış malzeme kalmayınca dek büyümektedir (Callister ve Rethwisch, 2014).

Yeniden kristalleşme sürecinin safhalarında yeni küçük taneler oluşmaktadır. Soğuk şekil değiştirmiş metallere yeniden kristalleştirilmesi tane yapısını inceltme amacıyla kullanılır. Ayrıca, yeniden kristalleşme sırasında soğuk şekil verme sonucunda değişmiş olan mekanik özellikler, şekil değiştirme öncesi değerlerine yeniden kavuşur, metalin dayanımı düşerken, daha yumuşak ve sünek hale gelir. Bazı ısı işlemler, beraberinde mekanik özelliklerde bu tür değişiklikler meydana getirmek üzere, yeniden kristalleşmenin gerçekleşmesine olanak verecek şekilde tasarlanır.

Toparlanma ve yeniden kristallenmenin aktive edilmiş olduğu durumlar için mikro yapının değişiminin şematini Şekil 2.10.'da gösterilmektedir.

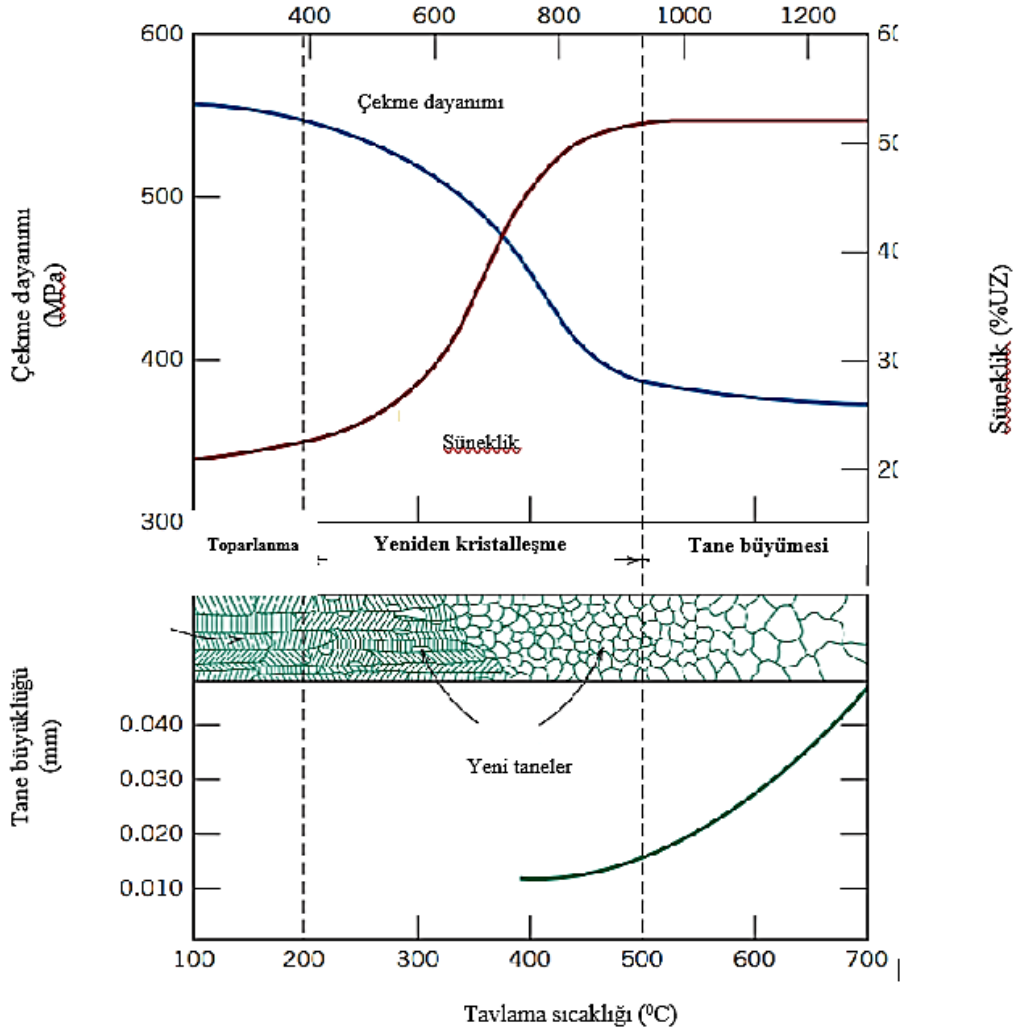


Şekil 2.10. Sıcak deformasyon sürecinde mikroyapıdaki değişimler (a) toparlanma (b) yeniden kristallenme (Alaneme ve Okotete, 2018).



Şekil 2.11. Pirinç alaşımında yeniden kristallenme ve tane büyümesi safhalarında mikroyapı değişimi (Callister ve Rethwisch, 2014).

Yeniden kristalleşme zamana ve sıcaklığa bağlı bir işlemdir. Şekil 2.11.'de resimlerde anlaşılacağı gibi, bu işlem sırasında yeniden kristalleşen malzeme oranı zamanla artar. Şekil 2.11(a).’da soğuk işlenmiş (%33 CW) tane yapısı, (b)’de 580⁰C’de 3 sn ısıtıldıktan sonra yeniden kristalleşmenin ilk aşaması çok küçük taneler yeniden kristallenmiş olanlardır. Plastik deformasyona uğramış yapının içinde yeniden kristalleşme sonucu oluşan çok küçük taneler görülmekte, (c)’de soğuk işlenmiş tanelerin bazı bölgelerinde yeniden kristalleşmiş taneler görülmekte (580⁰C’de 4 sn), (d)’de yeniden kristalleşmenin tamamlanması (580⁰C’de 8 sn), (e)’de 580⁰C’de 15 dakika sonra tane büyümesi ve (f)’de 700⁰C’de 10 dakika sonra tane büyümesi görülmektedir.



Şekil 2.12. Bir pirinç alaşımı için tavlama sıcaklığına göre yeniden kristallenme şeması (Callister ve Rethwisch, 2014).

Şekil 2.12.'de bir pirinç alaşımı için farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen 1 saatlik tavlama işlemlerinden sonra, tav sıcaklığının alaşımın sünekliği ve çekme dayanımı üzerine etkisi, tavlama sıcaklığına göre tane boyutu ve toparlanma, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi safhalarındaki tane yapısı grafiği gösterilmiştir. (Callister ve Rethwisch, 2014).

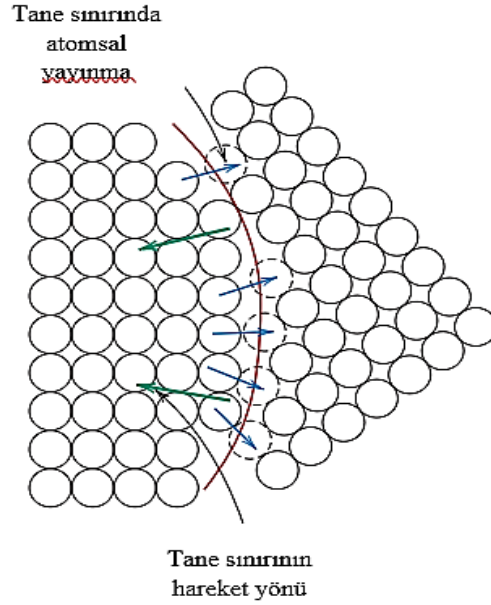
Belirli bir metal alaşımının yeniden kristalleşme davranışını bazen yeniden kristalleşmenin bir saatte tamamlandığı sıcaklık (yeniden kristalleşme sıcaklığı) olarak belirtilir. Buna göre, Şekil 2.12.'de verilen pirinç alaşımı için yeniden kristalleşme sıcaklığı yaklaşık olarak 450°C'dir. Bu sıcaklık, alaşımın saflığına öncesindeki soğuk işleme miktarı dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır, genellikle malzemenin mutlak ergime sıcaklığının üçte biri ile yarısı arasındadır. Soğuk şekillendirme miktarının artırılması yeniden kristalleşme hızını artırır, sonuç olarak yeniden kristalleşme sıcaklığı düşer ve yüksek deformasyonlarda sabit veya sınırlayıcı bir değere yaklaşır. Literatürde metaller için belirtilen yeniden kristalleşme sıcaklığı, genellikle bu sınır veya minimum sıcaklık değeridir.

Yeniden kristalleşme, saf metallerde alaşımlara göre daha hızlı gerçekleşir. Yeniden kristalleşme sırasında, yeni tanelerin çekirdeklenmesi ve büyümesi esnasında tane sınırı hareketi gerçekleşir. Tane büyüdükçe tane sınırları da genişleyerek radyal yönde ilerler. Safsızlık atomlarının yeniden kristalleşme sırasında tane sınırlarına yerleşir ve onlarla etkileşimleri sonucu, tane sınırının ilerlemesi yavaşlatır. Bu yeniden kristalleşme hızının yavaşlamasına ve sıcaklığının yükselmesine sebep olurlar. Saf metallerde yeniden kristalleşme sıcaklığı çoğunlukla $0,4 T_e$ iken bazı ticari alaşımlar için $0,7 T_e$ kadar çıkabilir. Burada T_e mutlak ergime sıcaklığıdır.

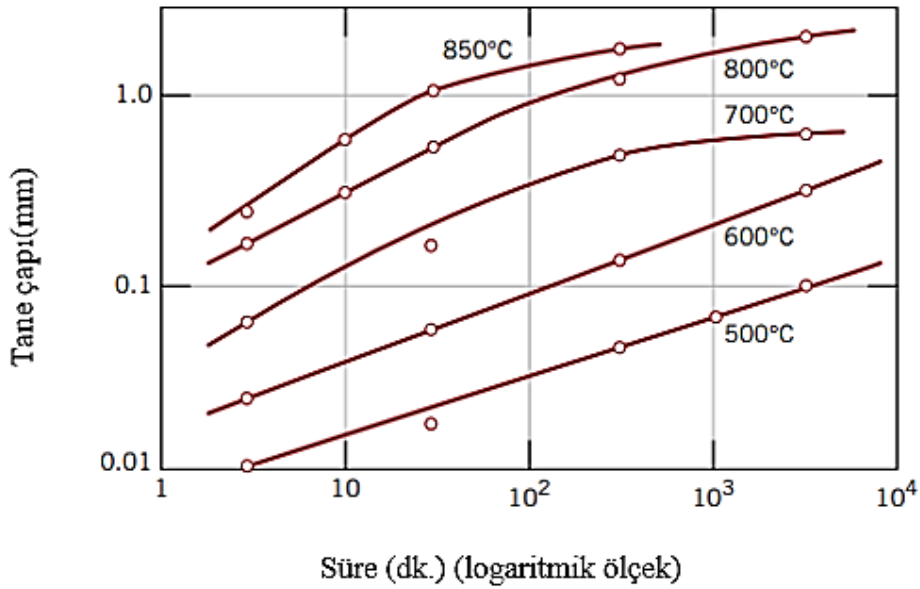
Yeniden kristalleşme tamamlandıktan sonra metal numune yüksek sıcaklıktaki bırakılırsa gerinimsiz taneler büyümeye eğilimini sürdürür. Bu olaya tane büyümesi denir. Tane büyümesinin öncesinde toparlanma ve yeniden kristalleşme olması gerekmez tüm polikristal malzemelerde metallerde ve seramikler oluşabilir.

Tane sınırlarının enerjileri daha yüksektir. Tane boyutu arttıkça, toplam tane sınırı alanı azalır ve bu da toplam enerjide azalmaya neden olur. Bu tane büyümesinin itici gücüdür. Tane büyümesi, tane sınırlarının hareketi ile meydana gelir. Açıkçası tane büyüme tanelerin hepsinde gerçekleşmez, büyük taneler büyürlerken küçük taneler onlara katılarak küçülür. Böylece tane boyutu artar ve bir anda bir dizi tane boyutu

oluşur. Tane büyümesi sırasında, tane sınırının bir tarafındaki atomlar kısa mesafeli difüzyon ile diğer tarafa hareket eder. Şekil 2.13.'de olduğu gibi, tane sınırları ve atomlar birbirlerine zıt yönde hareket ederler.



Şekil 2.13. Atomal yayımla oluşan tane büyümesi (Callister ve Rethwisch, 2014).



Şekil 2.14. Pirinç için farklı sıcaklıklardaki tane büyüme olayında, logaritma olarak tane çapının, işlem süresinin logaritmasıyla değişimi (Callister ve Rethwisch, 2014).

Tane boyutunun ve sıcaklığa göre değişkenliği çeşitli sıcaklıklarda pirinç alaşımı için zamanın logaritmasının bir fonksiyonu olarak tane boyutunun logaritmasının bir grafiği Şekil 2.14.'de gösterilmiştir. Daha düşük sıcaklıklarda eğriler doğrusaldır.

Sıcaklığın artmasıyla tane büyümesi daha hızlı gerçekleştiği için, eğriler dikey ekseninde daha büyük tane boyutu değerlerine ilerlemiştir. Yani sıcaklık arttıkça aynı tavlama süresi için, daha büyük tane boyutu elde edilmektedir. Bu artan sıcaklıkla difüzyon hızının artmasıyla açıklanır.

İnce taneli bir metalin oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri çoğunlukla kaba taneli haline göre daha üstündür. Tek fazlı alaşımın tane yapısı istenenden daha kaba ise plastik deformasyon sonrası uygulanacak yeniden kristalleştirme tavı ile malzemenin tane boyutu inceltilir (Callister ve Rethwisch, 2014).

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Malzeme

Karabük ilinde bulunan Pelenkoğlu firmasından temin edilen ve başlangıç çapı 6.74 mm olan SAE 1008 çelik tel soğuk çekme yöntemiyle 5.75 mm çapa, daha sonra da ısıl işlem uygulanmadan soğuk çekme ile 4.24 mm çapa getirilmiştir. Soğuk çekme işlemleri bahsi geçen firmada gerçekleştirilmiştir.

3.2. Yöntem

3.2.1. Metalografi çalışmaları

Pelenkoğlu firmasından alınan SAE 1008 çelik telin ve soğuk çekilmiş çeliğin metalografi çalışmaları için çekme yönündeki kesitlerden parçalar alınarak soğuk bakalite alma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Uygun zımparalama çalışmaları ve alumina çözeltisi ile parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Nital çözeltisi ile yapılan dağlama işlemleri sonrasında optik mikroskop görüntüleri alınmıştır.

3.2.2. Çekme testleri ve deformasyon hesaplamaları

SAE 1008 çelik tellerde soğuk deformasyon miktarını (ϵ) 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.

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

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

Bu denklemlere göre SAE 1008 çelik telde başlangıç çapı 6,74 mm ve ilk soğuk çekme sonrası çapı 5,75 mm'dir. İlk kademede gerçekleşen deformasyon oranı ($\epsilon=0,318$) %31,8 dir. İkinci kademede çap 4,24 mm'ye getirilmiştir. Bu kademede ise gerçekleşen deformasyon oranı ($\epsilon=0,927$) %92,7 olarak tespit edilmiştir.

Üç farklı çaptaki SAE 1008 çeliğin mekanik özelliklerindeki değişimleri ortaya koymak için çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri sonrasında kopmuş haldeki numuneler Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Çekme testi sonrası kopmuş SAE 1008 çelik tel numuneler.

3.2.3. Termal analiz ile yeniden kristallenme kinetiği

Dekompozisyon, dehidratasyon, yeniden kristallenme, çökeltme, homojenizasyon ve faz dönüşümleri gibi metalurjik süreçlerde gerçekleşen birçok olayın kinetik incelemesi termogravimetri (TG), diferansiyel termal analiz (DTA) ve diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) gibi temel termal analiz yöntemleri ile yapılabilmektedir. Bu tür yöntemlere izotermal olmayan kinetik inceleme denilmektedir. İzotermal yani statik kinetik incelemelerde, malzemenin ısıtılması esnasında zaman kavramı da devreye girmekte ve birden fazla reaksiyonun meydana gelmesi durumunda sıkıntı oluşmaktadır. İzotermal olmayan kinetik incelemelerde bu gibi sıkıntılar ortadan kaldırılmaktadır (Grecu, 2021; Raougui, 2023; Starink, 2004; Zhang, 2021).

Bu tez çalışmasında farklı oranlarda soğuk çekilmiş SAE 1008 çelik tellerde yeniden kristallenme kinetiği diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) kullanılarak incelenmiştir. Numunelerin farklı ısıtma hızlarında (5 – 10 – 15 – 20°C/dak) alınan DSC verileri yardımıyla Kissenger (Kissenger, 1957), Boswell (Boswell, 1980), Ozawa (Ozawa, 1992) ve Starink (Starink, 2004) gibi izotermal olmayan kinetik analiz modelleri ile incelenmiştir.

Kissenger kinetik modeli;

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

Boswell kinetik modeli;

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

Ozawa kinetik modeli;

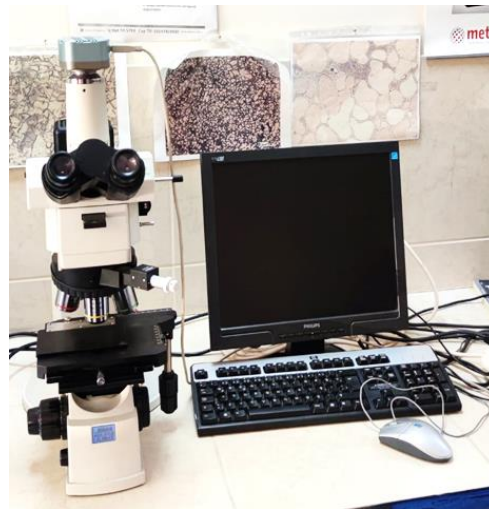
$$\ln(\beta) = k_3 - 1,051 \cdot \frac{E_a}{RT_p} \quad (3.5)$$

Starink kinetik modeli;

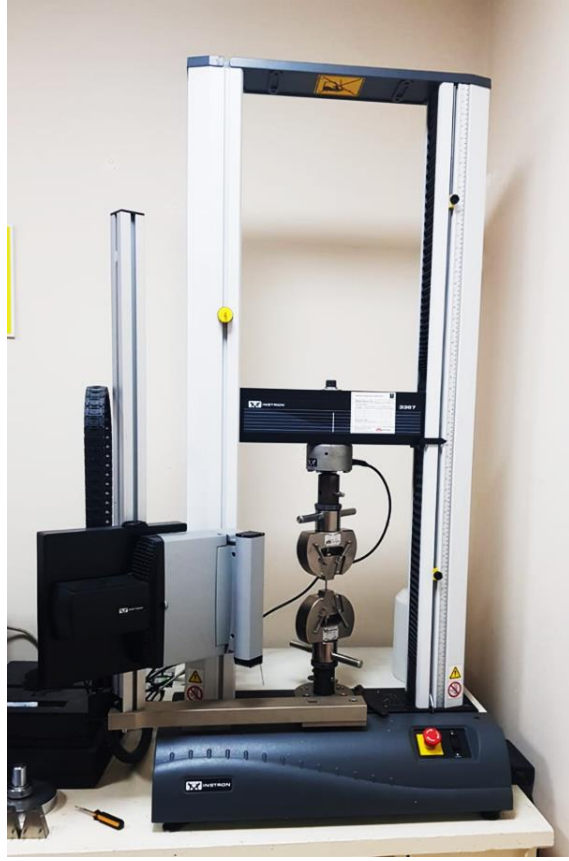
$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^{1,92}}\right) = -k_4 - 1,0008 \cdot \frac{E_a}{RT_p} \quad (3.6)$$

3.3. Kullanılan Cihazlar

SAE 1008 çelik numunelerin metalografik çalışmaları Şekil 3.2.'de gösterilen Nikon ECLIPSE L150 optik mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. Bu numunelerin çekme testleri ise Şekil 3.3.'de gösterilen Instron marka cihazla 3 ton yük altında çekme testleri gerçekleştirilmiştir. SAE 1008 çelik tel numunelerin DSC analizleri Şekil 3.4.'de gösterilen Hitachi STA 7300 cihazı kullanılarak, argon atmosferi altında yapılmıştır.



Şekil 3.2. Nikon ECLIPSE L150 optik mikroskobu.



Şekil 3.3. INSTRON marka çekme cihazı.

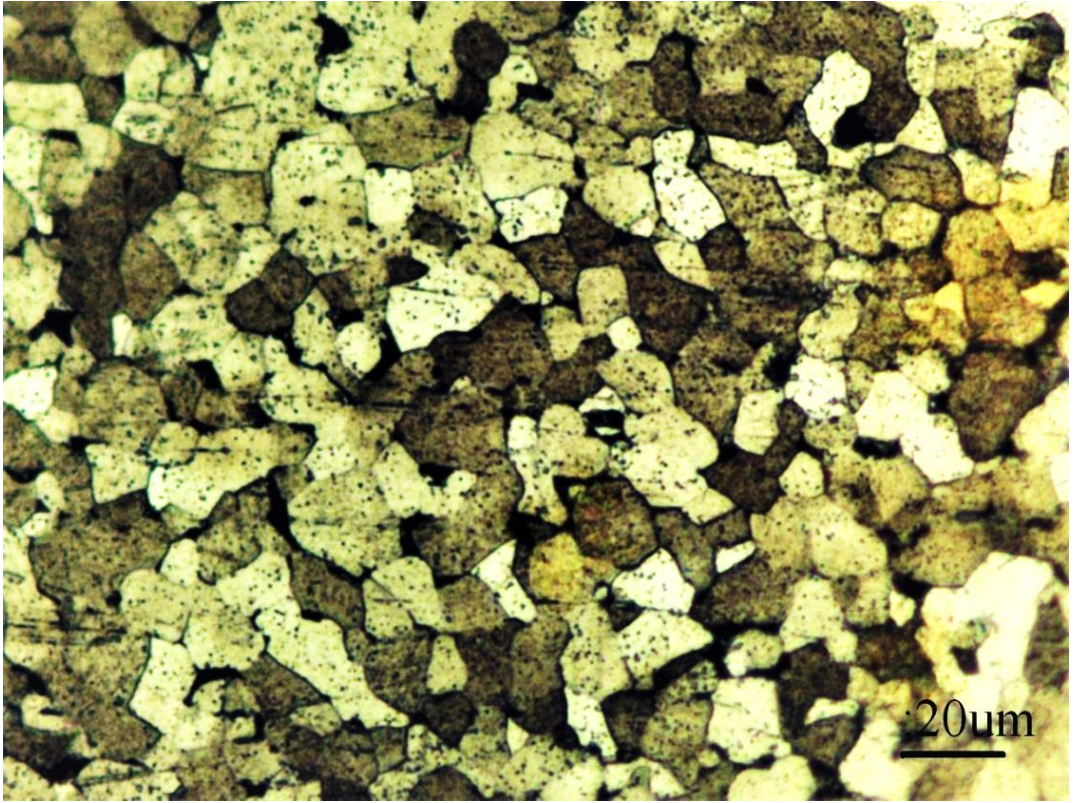


Şekil 3.4. HITACHI STA 7300 marka termal analiz cihazı.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

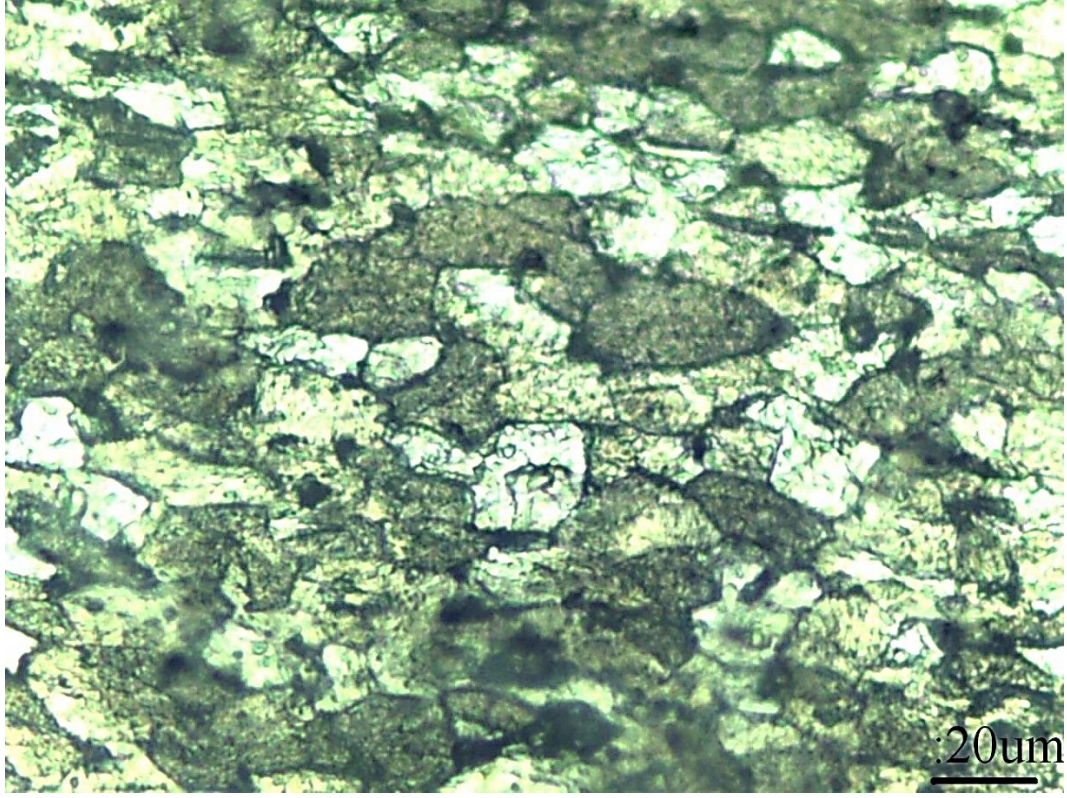
4.1. Soğuk Çekilmiş Tellerde Metalografik İncelemeler

Başlangıç çapı 6,74 mm olan başlangıç SAE1008 çelik telin, % 31,8 oranında soğuk çekme ile deformasyona uğratılmış ve çapı 5.75 mm olan SAE1008 çelik telin ve % 92.7 oranında soğuk çekme ile deformasyona uğratılmış ve çapı 4.24 mm olan SAE1008 çelik telin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.1., Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.'de verilmiştir.

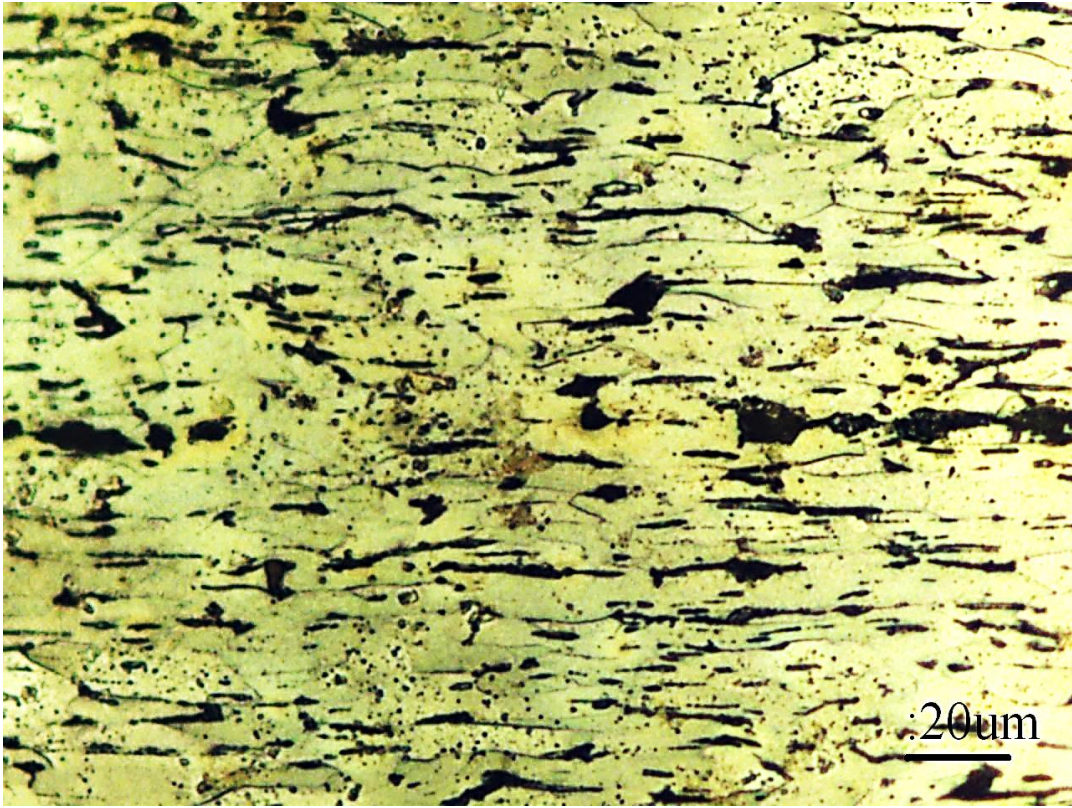


Şekil 4.1. Başlangıç SAE1008 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X200).

Şekil 4.1. - 4.3.'den görüldüğü gibi SAE1008 çelik telde bulunan taneler soğuk deformasyon sırasında çekme yönünde uzamışlardır. Tanelerin çekme yönünde uzaması ile birlikte malzemenin plastik şekil değişimini sağlayan dislokasyonlar yoğunlaşmakta, bunun sonucunda da mekanik özelliklerde değişimler olmaktadır.



Şekil 4.2. %31.8 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X200).

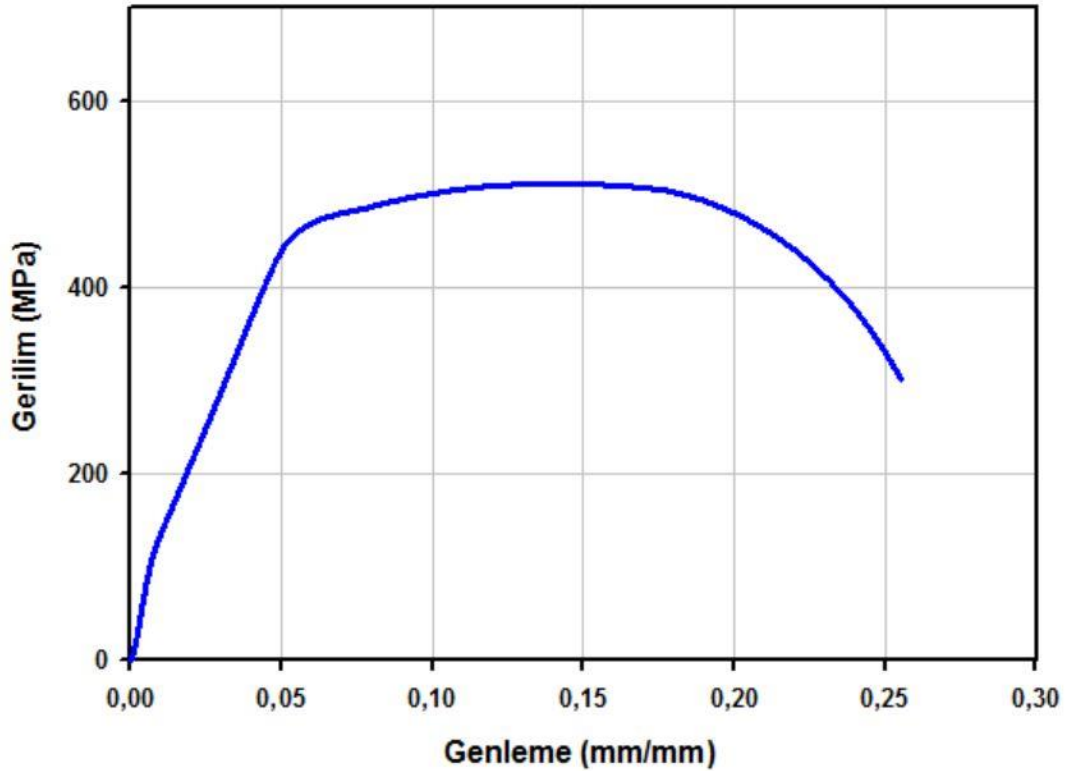


Şekil 4.3. %92.7 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik telin optik mikroskop görüntüsü (X200).

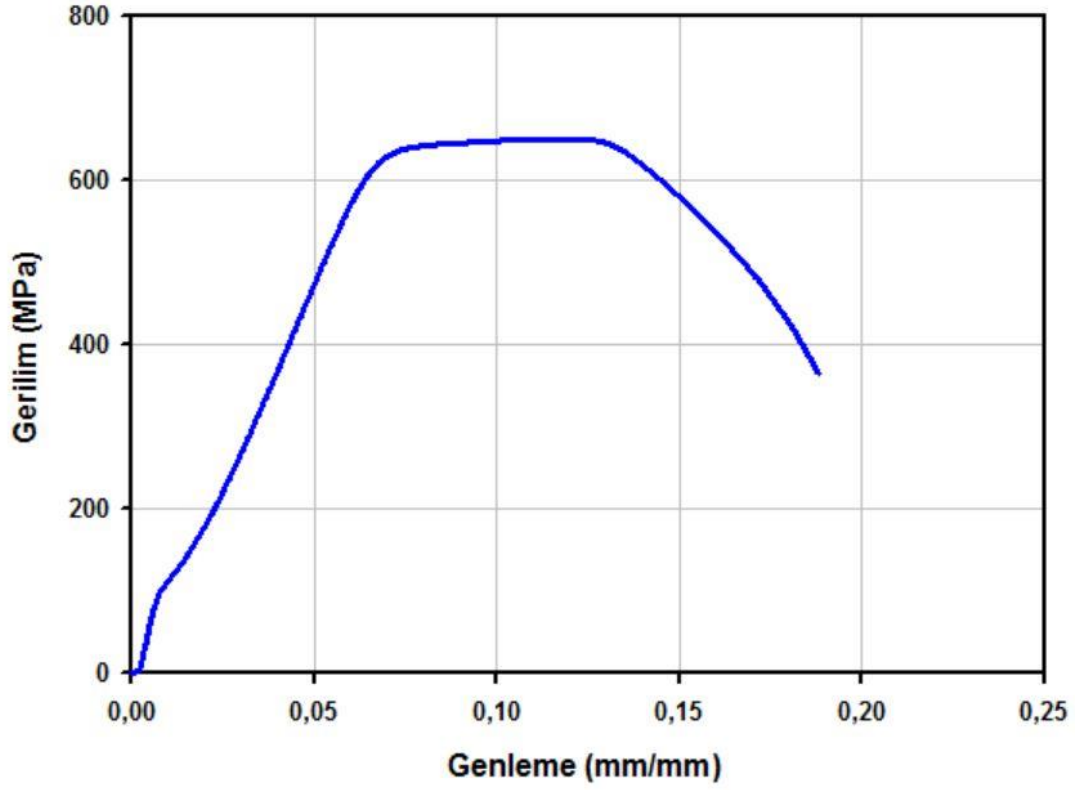
4.2. Mekanik Özelliklerdeki Değişimler

Başlangıç SAE1008 çelik telinin gerilme – genleme diyagramı Şekil 4.4.’de, %31,8 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik telinin gerilme – genleme diyagramı Şekil 4.5.’de, %92,7 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik telinin gerilme – genleme diyagramı Şekil 4.6.’da ve bu üç çelik telin karşılaştırmalı olarak genleme – genleme diyagramları Şekil 4.7.’de verilmiştir. Tablo 4.1.’de de başlangıç numunenin ve soğuk çekilmiş numunelerin çekme mukavemeti, % uzama ve sertlik değerleri verilmiştir.

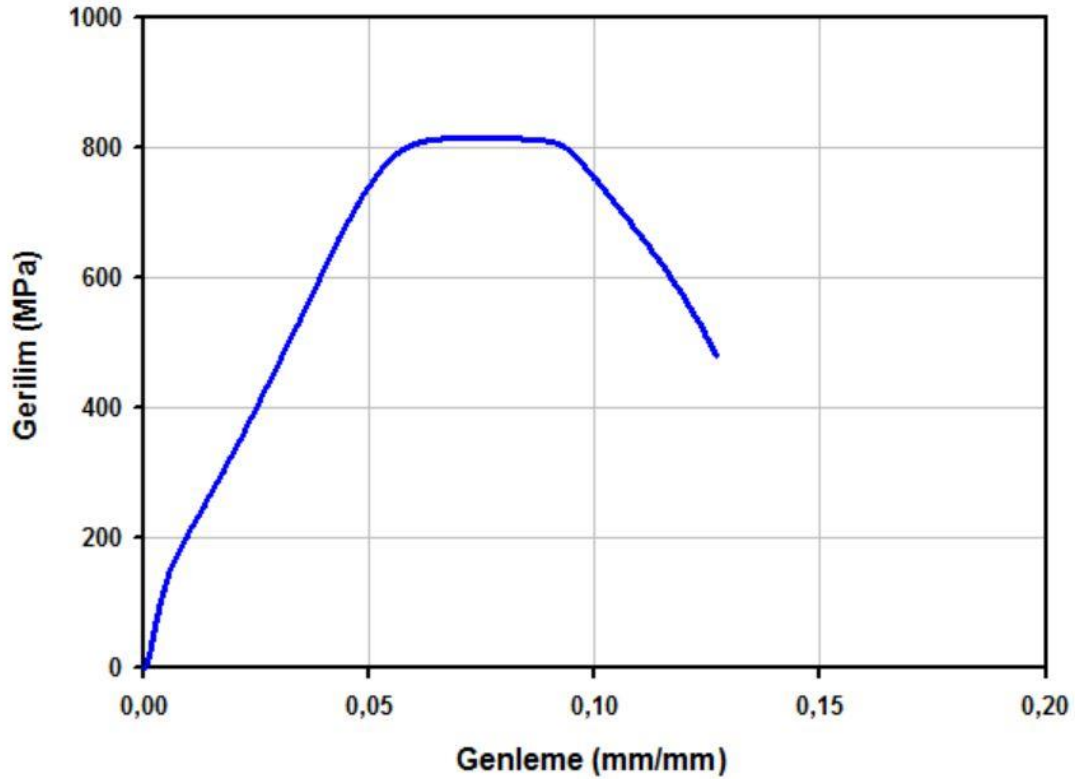
Şekil 4.4.’den görüleceği üzere başlangıç SAE1008 çelik telin soğuk çekme öncesi çekme mukavemeti yaklaşık 510 MPa olup uzama yüzdesi %25,6 olarak gerçekleşmiştir. Şekil 4.5.’deki %31,8 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik telde çekme mukavemeti yaklaşık 650 MPa ve uzama yüzdesi %18,7 olarak gerçekleşmiştir. Şekil 4.6.’daki %92,7 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik telde çekme mukavemeti değeri 810 MPa ve uzama yüzdesi %12,7 olduğu gözlenmektedir.



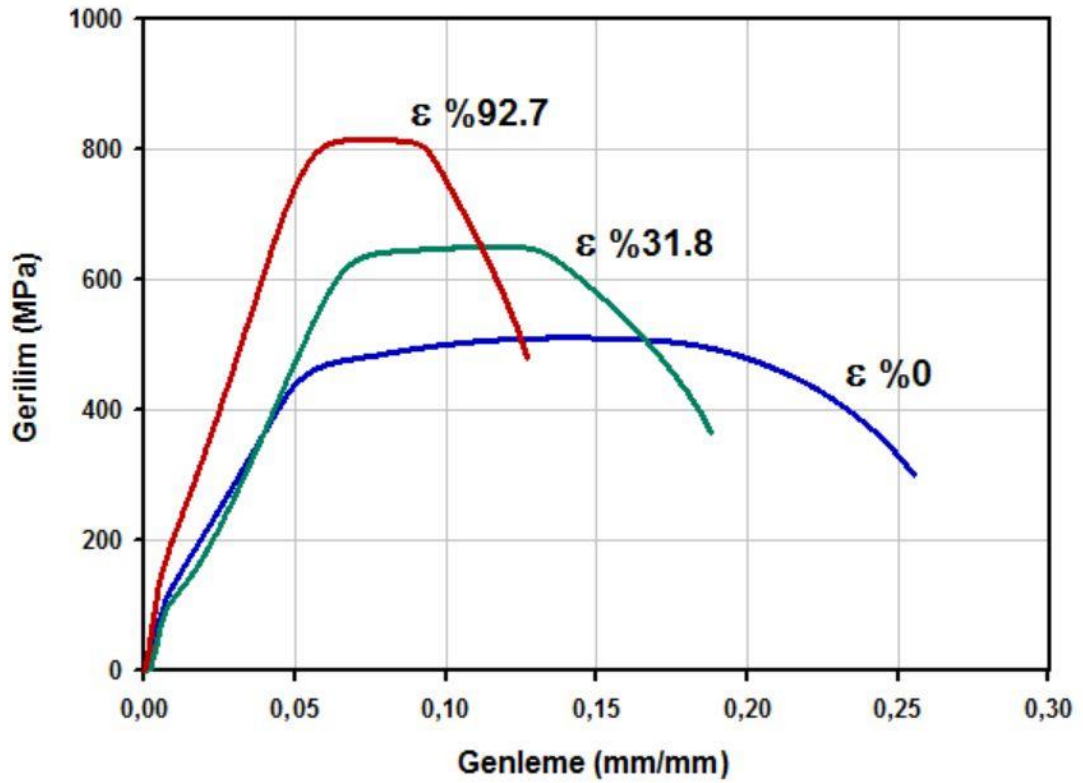
Şekil 4.4. Başlangıç SAE1008 çelik telin gerilme - genleme diyagramı.



Şekil 4.5. %31,8 oranında soğuk çekilmiş bakır telin gerilme - genleme diyagramı.



Şekil 4.6. %92,7 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik telin gerilme - genleme diyagramı.



Şekil 4.7. Başlangıç ve farklı oranda soğuk çekilmiş SAE1008 çelik tellerin gerilme - genleme diyagramları.

Tablo 4.1. Çelik tellerde soğuk çekme ile mekanik özelliklerdeki değişimler.

Deformasyon Miktarı	Çekme Mukavemeti (MPa)	Süneklik (%)	Sertlik (HV)
% 0	510	25,6	243
% 31,8	650	18,7	287
% 92,7	810	12,7	372

Bunların yanı sıra başlangıç SAE1008 çelik telinde mikro sertlik değeri 243 HV iken bu değer %31,8 deformasyon sonrasında 287 HV değerine ve %92,7 deformasyon sonrasında da 372 HV değerine arttığı tespit edilmiştir..

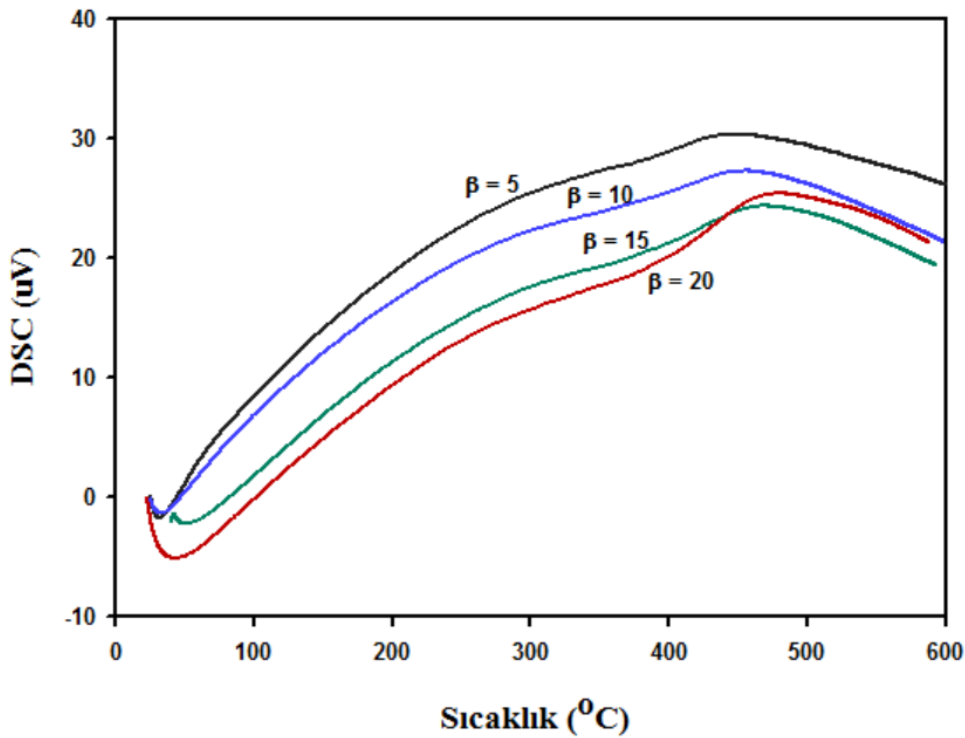
Mukavemet, bir malzemenin maruz kaldığı yükler altında tahrip olmadan kalabileceği gerilim değeridir. Metalik malzemelere uygulanan plastik deformasyon işlemleri hem malzemenin tane yapısına hem de mekanik özelliklerinde değişimlere sebep

olmaktadır. Plastik deformasyon oranının artması ile birlikte çekme mukavemeti değerleri artarken süneklik özellikleri düşmektedir. Plastik deformasyon miktarı arttıkça malzemenin akma ve çekme mukavemeti arasındaki fark azalmaktadır (Danchenko, 2007).

Bu tez çalışmasında tespit edilen sonuçlara göre soğuk deformasyon oranına bağlı olarak SAE 1008 çelik tellerde elde edilen mekanik özellik değerleri incelendiğinde, soğuk deformasyon oranının artması ile çekme mukavemet değerleri ve sertlik değerleri artmış, süneklik değeri ise azalmıştır.

4.3. Termal Analizle Yeniden Kristallenme Kinetiği

%31,8 oranında soğuk deformasyona uğramış SAE1008 çelik telin 5 – 10 – 15 ve 20 °C/dak ısıtma hızında alınan Diferansiyel Tarama Kalorimetri (DSC) termal analizleri Şekil 4.8.'de verilmiştir.



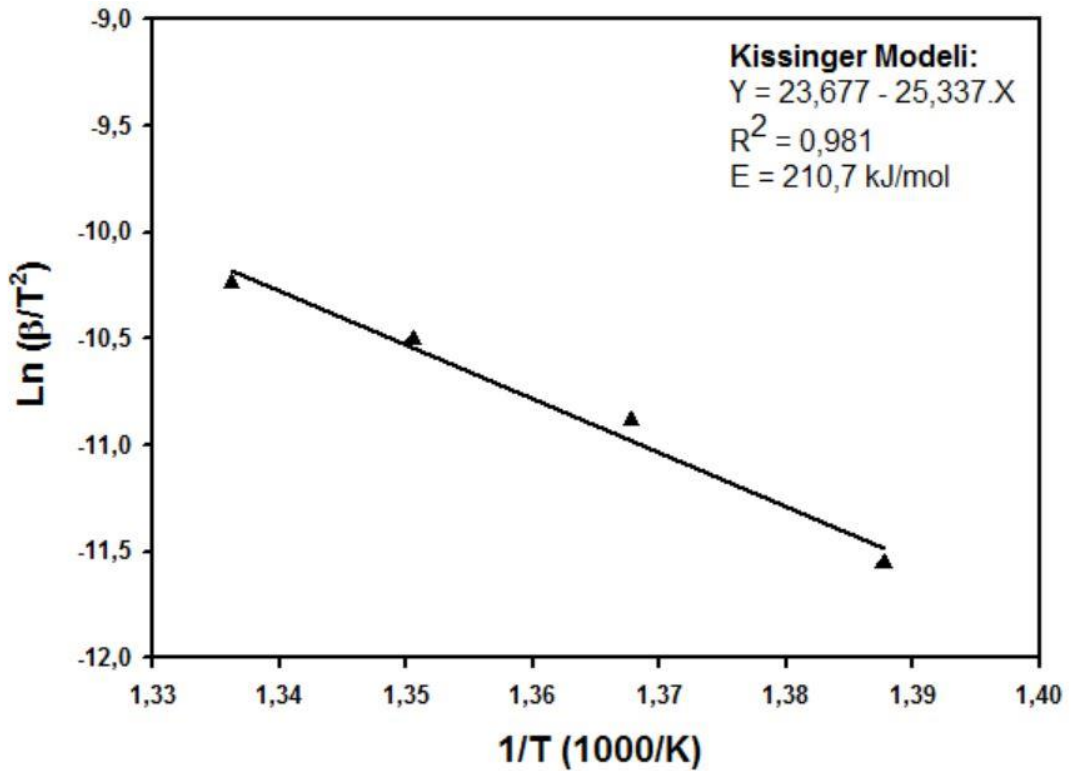
Şekil 4.8. %31,8 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik telin DSC analizleri.

Deformasyona uğramış yapıdaki yeniden kristallenme davranışı DSC analizlerinde ekzotermik pikler olarak gözlenmektedir. Farklı ısıtma hızlarına göre yeniden kristallenme sıcaklıkları, 5°C/dak ısıtma hızı için 447,6 °C (720,6 K), 10°C/dak ısıtma hızı için 458,1 °C (731,1 K), 15°C/dak ısıtma hızı için 467,5 °C (740,5 K) ve 20°C/dak ısıtma hızı için 475,4 °C (748,4 K) olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.8.'deki termal

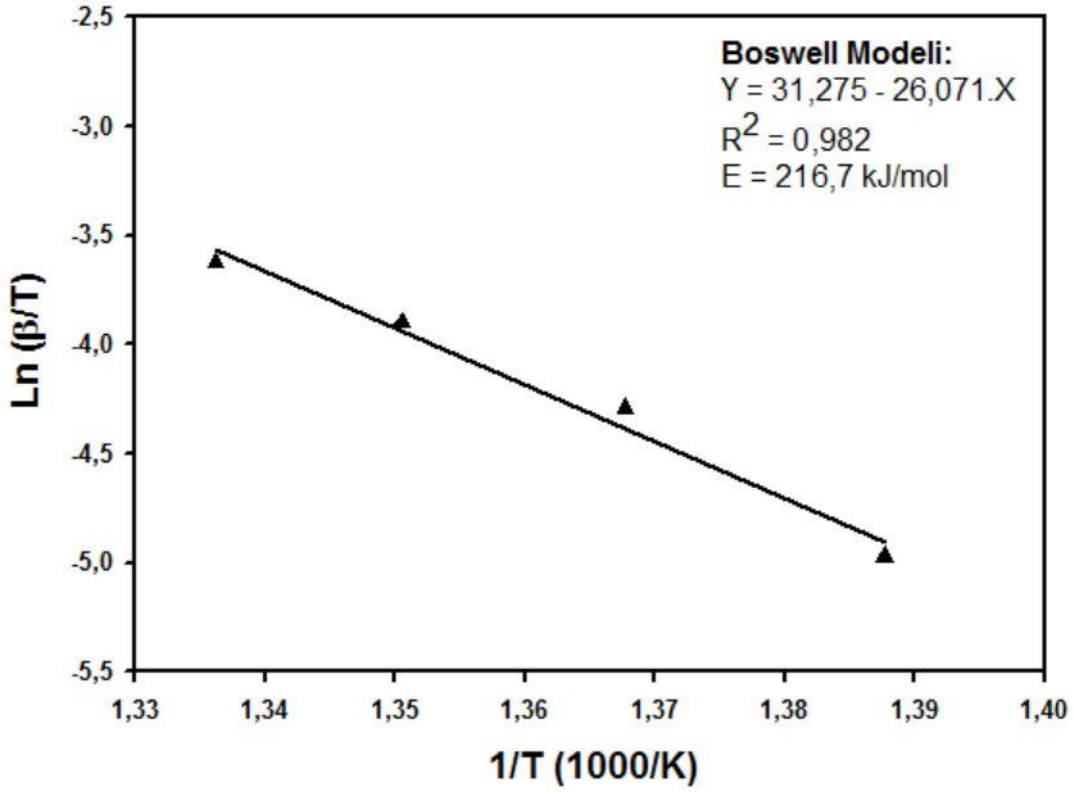
analizlerden farklı ısıtma hızlarında tespit edilen yeniden kristallenme pik sıcaklıkları ve bu pik sıcaklıklarına bağlı çeşitli kinetik modelin verileri Tablo 4.2.'de verilmiştir. Tablo 4.2.'de ki veriler kullanılarak Şekil 4.9'da Kissenger grafiği, Şekil 4.10.'da Boswell grafiği, Şekil 4.11.'de Ozawa grafiği ve Şekil 4.12.'de Starink grafiği çizilmiştir. Bu grafiklerin eğimlerinden elde edilen yeniden kristallenme aktivasyon enerji değerleri Tablo 4.3.'de sunulmuştur.

Tablo 4.2. %31,8 deforme olmuş SAE1008 çelik tel için kinetik veriler.

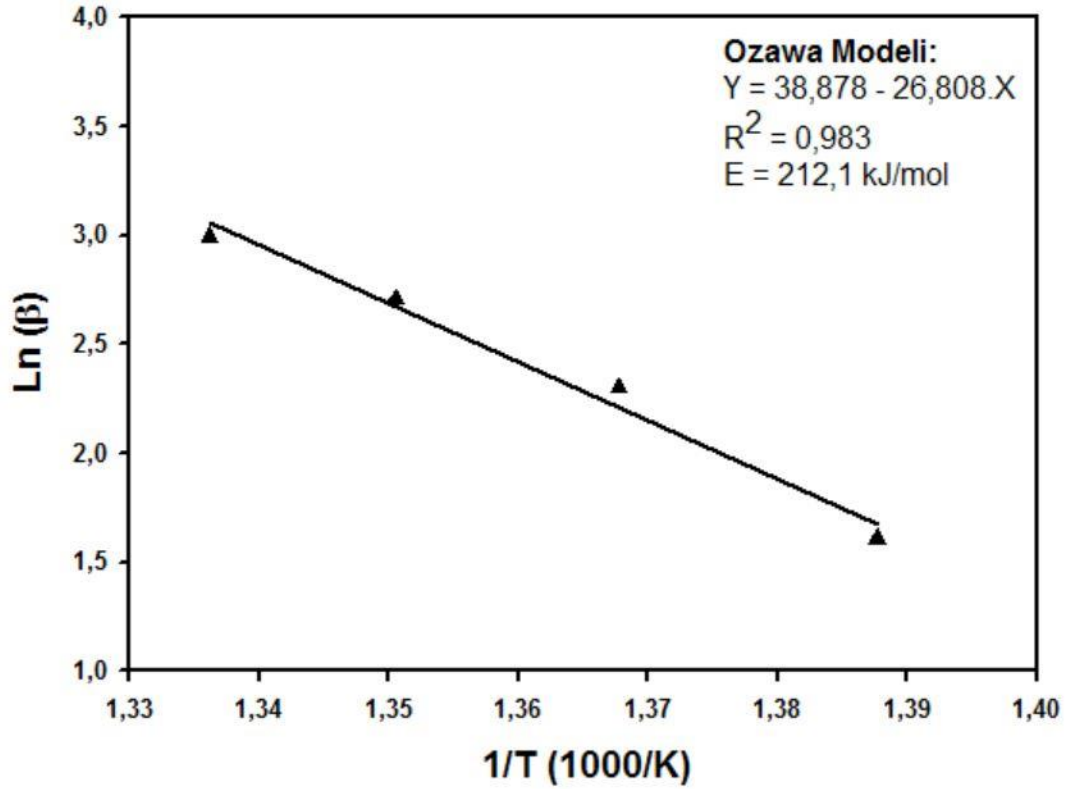
β	T (K)	1/T ($\times 10^3$)	Kissenger $\ln(\beta/T^2)$	Boswell $\ln(\beta/T)$	Ozawa $\ln(\beta)$	Starink $\ln(\beta/T^{1.92})$
5	720,6	1,3877	-11,5507	-4,9706	1,6094	-11,0243
10	731,1	1,3678	-10,8865	-4,2919	2,3026	-10,3589
15	740,5	1,3505	-10,5066	-3,8993	2,7081	-9,9777
20	748,4	1,3362	-10,2401	-3,6222	2,9957	-9,7107



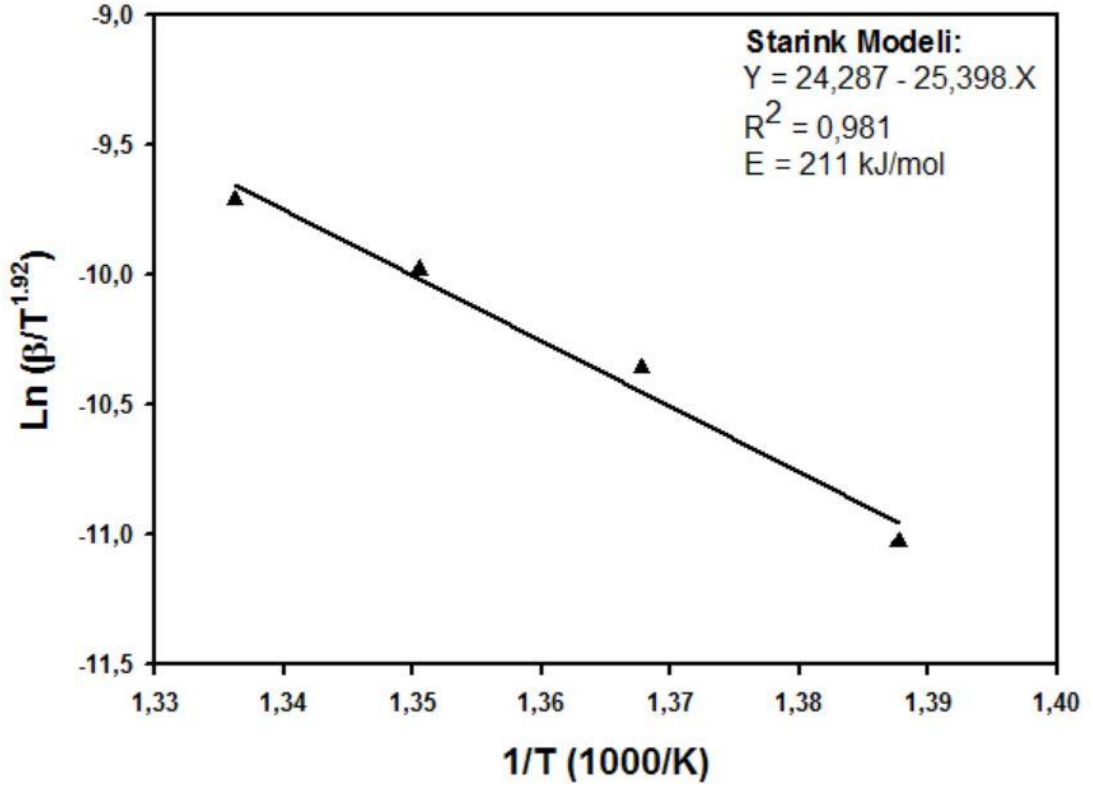
Şekil 4.9. %31,8 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik tel için Kissenger grafiği.



Şekil 4.10. %31,8 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik tel için Boswell grafiği.



Şekil 4.11. %31,8 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik tel için Ozawa grafiği.



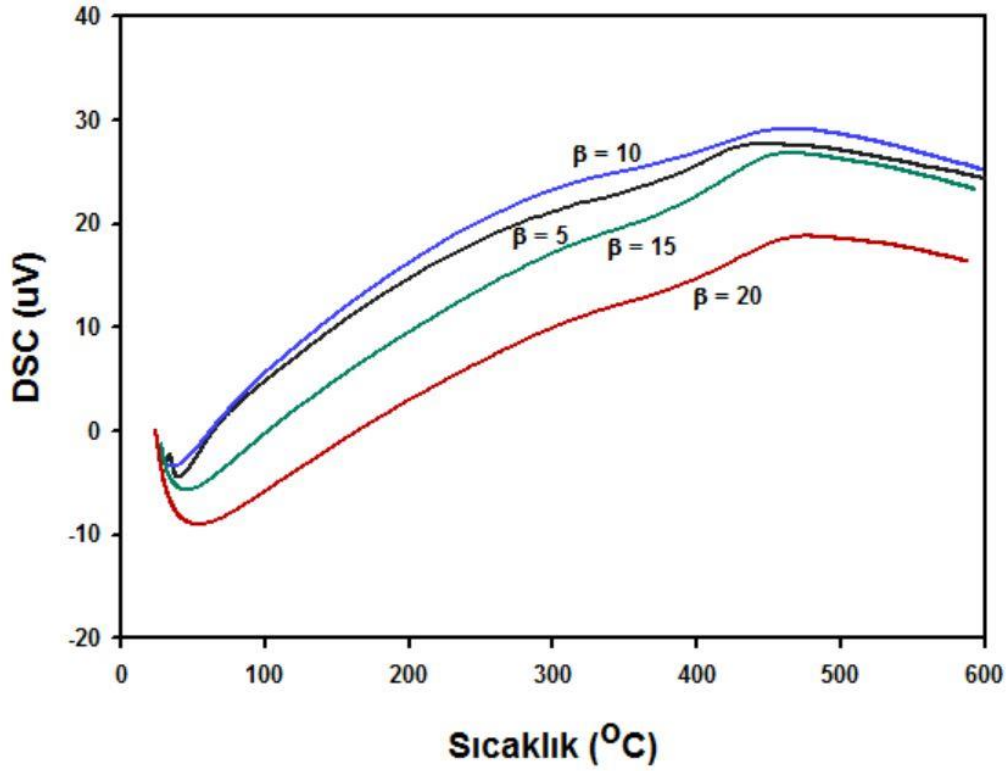
Şekil 4.12. %31,8 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik tel için Starink grafiği.

Tablo 4.3. %31,8 soğuk deformasyona uğramış SAE1008 çelik telde yeniden kristallenme aktivasyon enerji değerleri.

Kinetik Metot	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)
Kissenger	210,7
Boswell	216,7
Ozawa	212,1
Starink	211

Tablo 4.3.'de verilen yeniden kristallenme kinetiği sonuçlarına göre %31,8 oranında soğuk çekme işlemi yapılarak deformasyona uğratılmış SAE1008 çelik telde yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi Kissenger yöntemine göre 210,7 kJ/mol, Boswell yöntemine göre 216,7 kJ/mol, Ozawa yöntemine göre 212,1 kJ/mol ve Starink yöntemine göre 211 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. %31,8 oranında soğuk deformasyona uğramış SAE1008 çelik telde yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi $212,6 \pm 2 \text{ kJ/mol}$ olarak tespit edilmiştir.

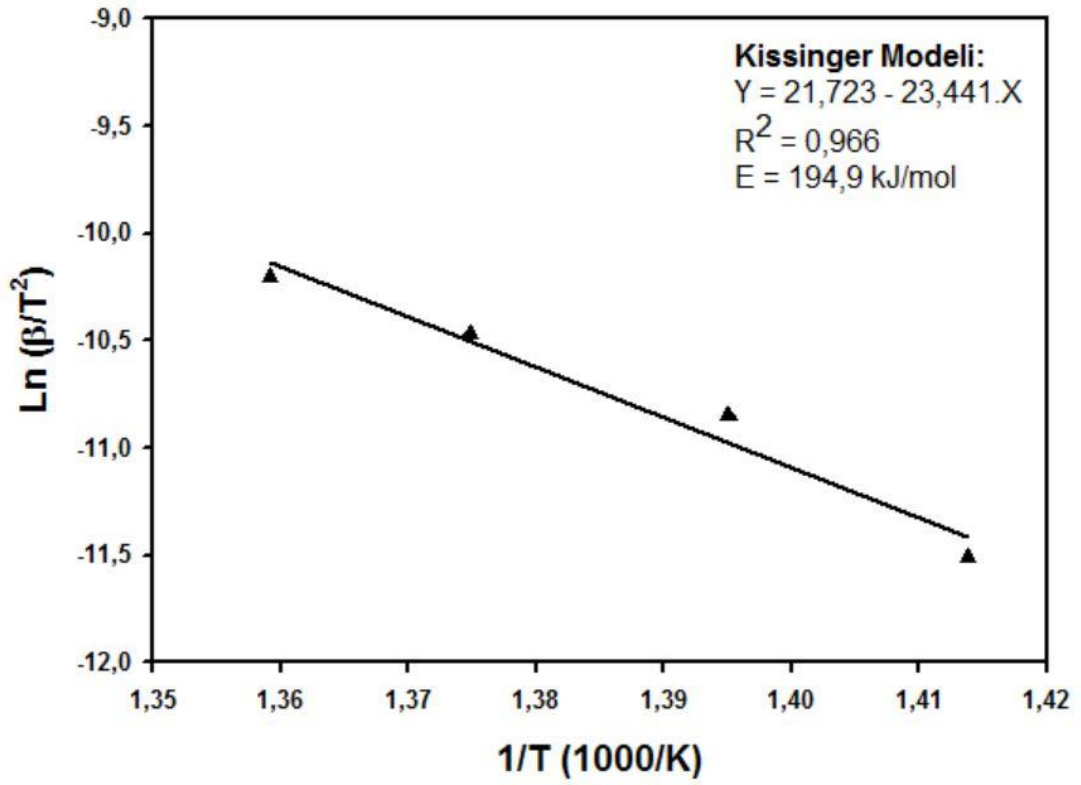
%92,7 oranında soğuk deformasyona uğramış SAE 1008 çelik telin 5 – 10 – 15 ve 20 °C/dak ısıtma hızında alınan Diferansiyel Tarama Kalorimetri (DSC) termal analizleri Şekil 4.13.'de verilmiştir. Farklı ısıtma hızlarına göre yeniden kristallenme sıcaklıkları, 5°C/dak ısıtma hızı için 434,3 °C (707,3 K), 10°C/dak ısıtma hızı için 443,8 °C (716,8 K), 15°C/dak ısıtma hızı için 454,4 °C (727,4 K) ve 20°C/dak ısıtma hızı için 462,7 °C (735,7 K) olarak tespit edilmiştir.



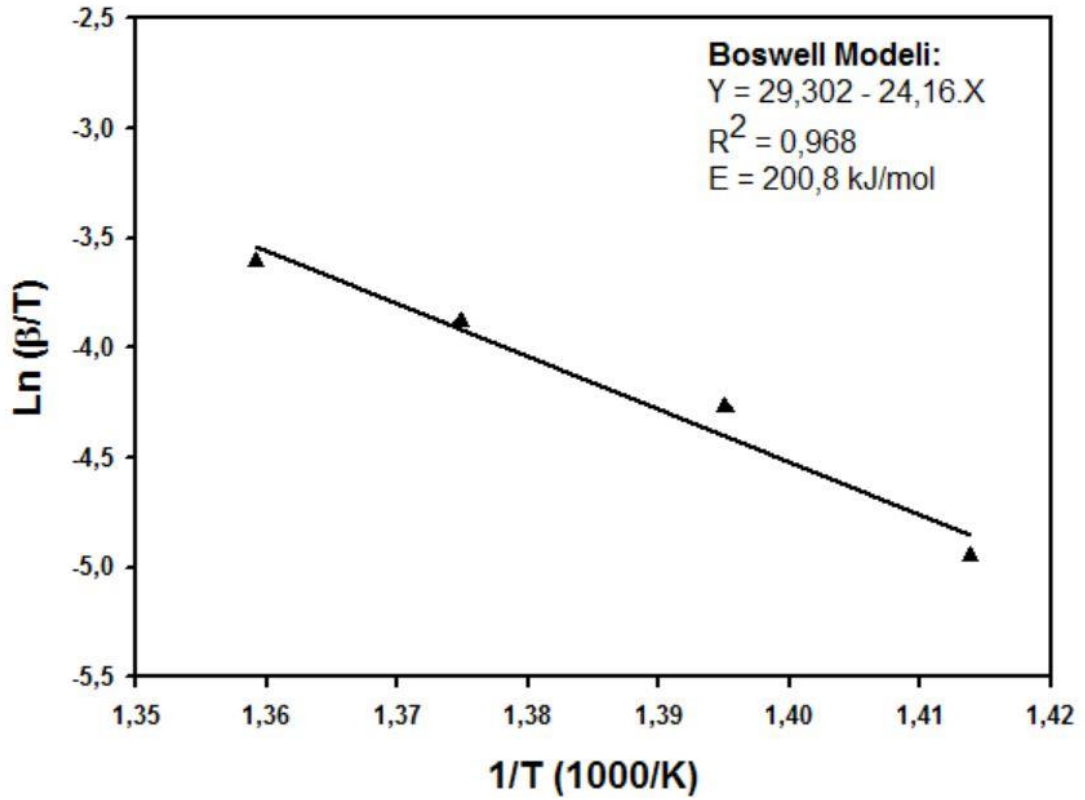
Şekil 4.13. %92,7 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik telin DSC analizleri.

Tablo 4.4. %92,7 deforme olmuş SAE1008 çelik tel için kinetik veriler.

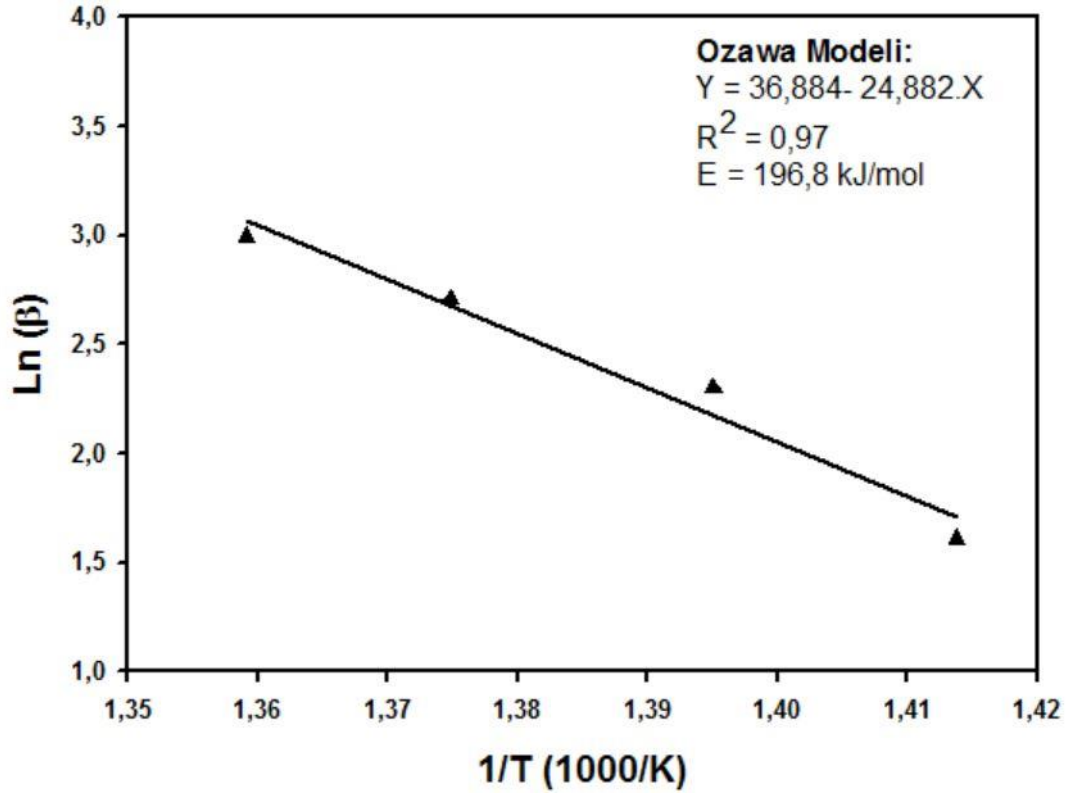
β	T (K)	$1/T$ ($\times 10^3$)	Kissenger $\ln(\beta/T^2)$	Boswell $\ln(\beta/T)$	Ozawa $\ln(\beta)$	Starink $\ln(\beta/T^{1.92})$
5	707,3	1,4138	-11,5135	-4,9520	1,6094	-10,9886
10	716,8	1,3951	-10,8470	-4,2722	2,3026	-10,3210
15	727,4	1,3748	-10,4709	-3,8814	2,7081	-9,9437
20	735,7	1,3592	-10,2059	-3,6051	2,9957	-9,6779



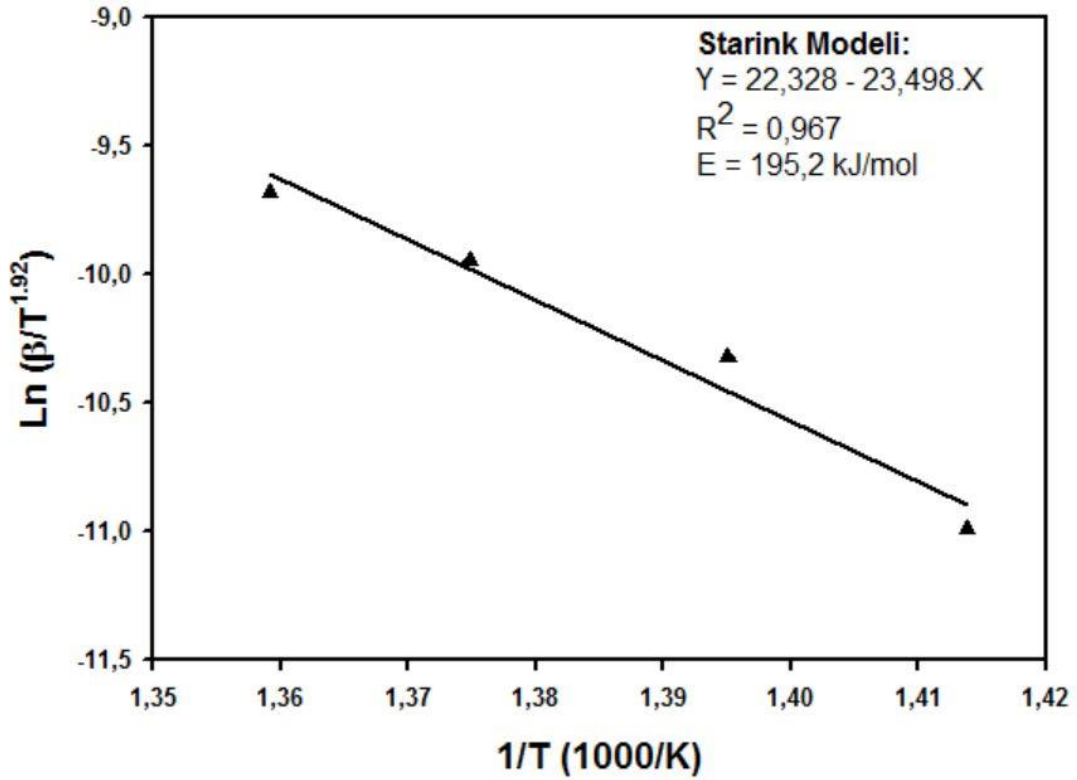
Şekil 4.14. %92,7 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik tel için Kissinger grafiği.



Şekil 4.15. %92,7 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik tel için Boswell grafiği.



Şekil 4.16. %92,7 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik tel için Ozawa grafiği.



Şekil 4.17. %92,7 oranında soğuk çekilmiş SAE1008 çelik tel için Starink grafiği.

Tablo 4.3. %92,7 soğuk deforme olmuş SAE1008 çelik telde yeniden kristallenme aktivasyon enerji değerleri.

Kinetik Metot	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)
Kissenger	194,9
Boswell	200,8
Ozawa	196,8
Starink	195,2

Şekil 4.13.'deki termal analizlerden farklı ısıtma hızlarında tespit edilen yeniden kristallenme pik sıcaklıkları ve bu pik sıcaklıklarına bağlı olarak dört farklı kinetik modelin verileri Tablo 4.4.'de verilmiştir. Tablo 4.4.'de ki veriler kullanılarak Şekil 4.14.'de Kissenger grafiği, Şekil 4.15.'de Boswell grafiği, Şekil 4.16.'da Ozawa grafiği ve Şekil 4.17.'de Starink grafiği çizilmiştir. Bu grafiklerin eğimlerinden elde edilen yeniden kristallenme aktivasyon enerji değerleri Tablo 4.5.'de sunulmuştur.

Tablo 4.5.'de verilen kinetik sonuçlara göre %92,7 oranında soğuk çekme işlemi yapılarak deformasyona uğratılmış SAE1008 çelik telde yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi Kissenger yöntemine göre 194,9 kJ/mol, Boswell yöntemine göre 200,8 kJ/mol, Ozawa yöntemine göre 196,8 kJ/mol ve Starink yöntemine göre 195,2 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. %92,7 oranında soğuk deformasyona uğramış SAE1008 çelik telde yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi $196,7 \pm 2$ kJ/mol olarak tespit edilmiştir.

Düşük alaşımlı bir çeliğe burulma işlemleri ile deformasyonu sağlanan bir çelikte yapılan yeniden kristallenme incelemesi çalışmalarında C, Mo, Mn ve Si gibi başlıca çelikte bulunan elementlerin ve Ti, V ve Nb gibi özel amaçlı katılan mikro alaşımlama elementlerinin etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisinin çeliğin kimyasal kompozisyonuna çok bağlı olduğu ve en hassas değişken olduğu belirtilmiştir. %20 ve %35 oranında deformasyona uğratılmış çelik üzerine yapılan çalışmalarda, yeniden kristallenme işlemlerini 900°C – 1100°C sıcaklık aralıklarında gerçekleştirmişler ve sıcaklığın artması ile yeniden kristallenme olayının daha kısa sürede gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Östenitik demir olan numunelerde yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 124,7 kJ/mol olduğu, bununla beraber herhangi bir alaşımlama elementinin etkisiyle aktivasyon enerjisi değerinin arttığı belirtilmiştir. Ancak karbon ve vanadyumun etkisinin çok az olduğu

ifade edilmiştir. Karbon ilavesi ile beraber yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 169 kJ/mol değerinde olduğu ve deformasyon miktarının artması ile yeniden kristallenme sıcaklığının düştüğü ifade edilmiştir (Medina ve Mancilla, 1996).

Kaba taneli ve heterojen yapıya sahip olan ve soğuk haddelenmiş düşük karbonlu bir çelikte yapılan yeniden kristallenme davranışının incelemesi yapılmış ve yeniden kristallenme çekirdeklenme ve ara yüzey – tane sınırı taşınım hızları incelenmiştir. Yeniden kristallenme olayının iki tavlama süresi tarafından yönetildiği, ilk kademedeki genellikle soğuk haddeleme ile oluşan, büyük miktarda depolanmış enerji bulunan bölgelerde yeniden kristallenmenin başladığı, ikinci kademedeki ise depolanmış enerjinin daha az olduğu bölgelerde yeniden kristallenme olayının ilerlediği ifade edilmiştir (Oyarzabal ve ark., 2008).

%70, %80 ve %90 oranlarında soğuk haddelenmiş ve arayer atomları içermeyen bir çelik üzerinde yapılan yeniden kristallenme kinetiği ile ilgili bir çalışmada, %70 oranında deformasyon sonrasında yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 237 ± 17 kJ/mol, %80 oranında deformasyon sonrasında yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 331 ± 23 kJ/mol ve %90 oranında deformasyon sonrasında da yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 365 ± 22 kJ/mol olduğu belirtilmiştir. Deformasyon miktarının artması ile yeniden kristallenme süresinin de azaldığı ifade edilmiştir (Ye ve ark., 2002).

5. SONUÇLAR

SAE1008 çelik telin %31,8 oranında ve %92,7 oranında soğuk çekme ile gerçekleştirilen deformasyon akabinde mekanik özelliklerindeki değişimler ve yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi değerleri dört farklı izotermal olmayan yöntemlerle tespit edilmiştir. Elde edilen genel sonuçlar;

- SAE1008 çelik telin başlangıç çapı 6,74 mm olup ilk soğuk çekme sonrası 5,75 mm çapa ve akabinde soğuk çekme ile 4,24 mm çapa indirilmiştir. Soğuk deformasyon oranı ilk kademede %31,8 ve ikinci kademede %92,7 olarak tespit edilmiştir.
- SAE1008 çelik telin çekme mukavemeti 510 MPa iken bu değer %31,8 oranında soğuk deformasyon sonrası 650 MPa değerine, %92,7 oranında soğuk deformasyon sonrası 810 MPa değerine çıkmıştır.
- SAE1008 çelik telin % uzama değeri %25,6 iken bu değer %31,8 oranında soğuk deformasyon sonrası %18,7 değerine, %92,7 oranında soğuk deformasyon sonrası %12,7 değerine düşmüştür.
- SAE1008 çelik telin mikrosertlik değeri 243 HV iken bu değer %31,8 oranında soğuk deformasyon sonrası 287 HV değerine, %92,7 oranında soğuk deformasyon sonrasında 372 HV değerine çıkmıştır.
- SAE1008 çelik tellerin metalografik incelemeler sonucunda yapıdaki tanelerin çekme kuvveti uzadığı tespit edilmiştir.
- Soğuk deformasyon sonrasında SAE1008 çelik tellerde yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi, DSC (Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi) kullanılarak, çekme işlemi uygulanmış çelik tel numunelerin 5 – 10 – 15 – 20 °C/dak ısıtma hızlarında alınan termal analiz grafikleri yardımıyla gerçekleştirilmiştir.
- Soğuk çekilmiş SAE1008 çelik tel numunelerde yeniden kristallenme kinetiği, izotermal olmayan kinetik yöntemler olan Kissenger, Boswell, Ozawa ve Starink yöntemleri kullanılarak yapılmıştır.

- Soğuk tel çekme yöntemiyle %31,8 oranında soğuk deformasyona uğramış SAE1008 çelik telde yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi, Kissenger denklemine göre 210,7 kJ/mol, Boswell denklemine göre 216,7 kJ/mol, Ozawa denklemine göre 212,1 kJ/mol ve Starink denklemine göre 211 kJ/mol olarak tespit edilmiştir. Soğuk tel çekme yöntemiyle %31,8 oranında soğuk deformasyona uğratılmış SAE1008 çelik telde yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi $212,6 \pm 2$ kJ/mol olarak bulunmuştur.
- Soğuk tel çekme yöntemiyle %92,7 oranında soğuk deformasyona uğramış SAE1008 çelik telde yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi, Kissenger denklemine göre 194,9 kJ/mol, Boswell denklemine göre 200,8 kJ/mol, Ozawa denklemine göre 196,8 kJ/mol ve Starink denklemine göre 195,2 kJ/mol olarak tespit edilmiştir. Soğuk tel çekme yöntemiyle %92,7 oranında soğuk deformasyona uğratılmış SAE1008 çelik telde yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjisi $196,7 \pm 2$ kJ/mol olarak bulunmuştur.
- SAE1008 çelik tellerin yeniden kristallenme kinetiği karşılaştırıldığında, soğuk deformasyon miktarı arttıkça yeniden kristallenme başlangıç sıcaklığının ve aktivasyon enerjisinin yapıda soğuk deformasyonla oluşan depolanmış enerji nedeniyle bir miktar azaldığı 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>
- Asi, O., Can A. (2001). Sementasyon çeliklerinde körsertleştirilmiş ve sementasyon yapılmış durumlarda meydana gelen artık gerilmelerin karşılaştırılması, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7 (2), 183-187. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/191357>.
- ASM Handbook. (1990). *Properties and Selection: Iron, Steels and High Performance Alloys*. Ed. R. Steiner, ASM International.
- Ayer, Ö. (2019). Kalıp parametrelerinin ekstrüzyon kuvveti üzerine etkisinin Taguchi yöntemiyle optimizasyonu, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 10(2), 633-640. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/738415>.
- 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>
- Bozkurt, Y., Ünver, İ. (2018) . Sıcak dövme sanayisinde çalışanların titreşimle ilgili risklerden korunma çalışmaları. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(2), 278-286. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/488252>.
- Callister, W.D., Rethwisch, D.G. (2014). *Materials Science and Engineering*. (2.Edition). Wiley & Sons.
- Çarboğa, C. (2010). *Düşük karbonlu çeliklere bor ilavesinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi* [Doktora tezi]. Gazi Üniversitesi.
- Danchenko, V. N. (2007). Metal forming. <https://metal-forming.org/images/for-books/Danchenko-omd-engl.pdf> adresinden 15 Nisan 2023 tarihinde alınmıştır.
- Ersundu, A.E. (2007). *Yerli demir cevherlerinin sünger demir üretimine uygunluğunun araştırılması* [Yüksek Lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Greco, I. (2021). *Soğuk haddelenmiş AA3105 saclarda termal analizle yeniden kristallenme kinetiğinin incelenmesi* [Yüksek Lisans tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- 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, Nisan 20). Çeliklerin sınıflandırılması Ders Notları <https://avesis.ktu.edu.tr/kursaticin/dokumanlar> adresinden 20 Nisan 2023 tarihinde alınmıştır.
- Kayır, Y.Z., (2001, Ekim 3). 1.Demir çelik sempozyumu ve sergisi açılış konuşması. <https://studylibtr.com/doc/1632627/1.-demir-çelik-sempozyumu-ve-sergisi-açılış-konuşması> adresinden 15 Mayıs 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.
- Küçükakarsu, F. (2022). *Laboratuvar ölçekli haddeme ünitesinde haddelenen alaşımlı çeliklerin mikroyapı ve mekanik özellik ilişkisinin araştırılması* [Yüksek Lisans tezi]. Karabük Üniversitesi.
- 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 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)
- Öztürk, S. (2023, Nisan 20). Faz Diyagramları Ders Notları. <https://avesis.ktu.edu.tr/resume/downloadfile/kursaticin?key=4176da18-249f-40b0-9969-6058a81a4ba2> adresinden 20 Nisan 2023 tarihinde alınmıştır.
- Raabe, D. (2014). *Recovery and Recrystallization: Phenomena, Physics, Models and Simulation, Physical Metallurgy*. Elsevier.
- Raougui, A. (2021). *AA5005 saclarda haddeme 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.
- Serfiçeli, Y. S. (2001). *Malzeme Bilgisi*. (2. Baskı). Ankara: Form Ofset Basımevi.
- Shuhui, L. (2021). Sheet metal deep drawing for making metallic parts and structures. *In Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier.
- Singh, R.P. (2016). *Applied Welding Engineering: Processes, Codes, and Standards* (2.Edition). Elsevier.

- 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>
- Tempelman, E., Shercliff, H., Van Eyben, B.N. (2014). *Forging of Metals. In Manufacturing and Design*. Elsevier.
- 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)
- Yelin, Ö., Tatlıer, M. (2019). Çelik şekillendirme yöntemlerinden soğuk haddeleme işleminin sonlu elemanlar analizlerinin değişik parametrelere göre araştırılması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(1), 61-67. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/911786>
- 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 : Pelin RAOUGUI

ÖĞRENİM DURUMU:

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

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2017-h.d.e LC WAIKIKI'de Planlama Uzmanı olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Kalınlı P., Yıldız K. (2022, 18-20, Mart). Soğuk Deformasyon Oranının SAE1008 Çeliğin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. *VIII. INSAC International Congress on Natural and Engineering Science*, Konya, Turkey.