



**METALOGRAFİK DENEYLER SONUCU OLUŞTURULAN ALGORİTMAYA
GÖRE ÇALIŞAN TAM OTOMASYONLU ISIL İŞLEM FIRINI
HESAPLAMALARI, PROTOTİP TASARIMI VE İMALATI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet YAVUZ

Danışman

Prof. Dr. Yılmaz YALÇIN

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Nisan 2020

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**METALOGRAFİK DENEYLER SONUCU OLUŞTURULAN
ALGORİTMAYA GÖRE ÇALIŞAN TAM OTOMASYONLU ISIL
İŞLEM FIRINI HESAPLAMALARI, PROTOTİP TASARIMI VE
İMALATI**

Mehmet YAVUZ

Danışman

Prof. Dr. Yılmaz YALÇIN

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Nisan 2020

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

04 / 03 / 2020



Mehmet YAVUZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

METALOGRAFİK DENEYLER SONUCU OLUŞTURULAN ALGORİTMAYA GÖRE ÇALIŞAN TAM OTOMASYONLU ISIL İŞLEM FIRINI HESAPLAMALARI, PROTOTİP TASARIMI VE İMALATI

Mehmet YAVUZ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yılmaz YALÇIN

Bu araştırmada, ısıtım işlemi sırasında meydana gelebilecek tüm işlem hatalarını minimize edecek, verimli ve homojen ısıtım dağılımı sağlayabilecek tam otomasyonlu bir atmosferik ısıtım işlemi fırını tasarımı, ısıtım, metalurjik hesaplamaları ve prototip fırın imalatını kapsamaktadır. Prototip fırın, malzemelerin ZSD (zaman-sıcaklık-dönüşüm) diyagramlarına göre yapılacak ısıtım işlemleri ve metalurjik deneyler (mikroskopik yapı, sertlik deneyi, çekme deneyi, spektrometre analizi vs.) sonucunda elde edilecek verilere göre oluşturulacak kontrol algoritmasına göre çalışacaktır. Projenin diğer ısıtım işlemi fırınlarından artıları ise şu şekilde planlanmıştır:

1. Isıtım homojenizasyon.
2. Prosesin tamamen otomatik olması ve kullanım kolaylığı (ısıtım işlemi tecrübesi ve bilgisi olmayanlar için bile kolay kullanım imkanı).
3. Isıtım verimliliği.

2020, xix + 182 sayfa

Anahtar Kelimeler: Isıtım İşlemi, Tasarım, Isıtım ve metalurjik hesaplamalar, Prototip imalatı.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

**FULLY AUTOMATED HEAT TREATMENT FURNACE CALCULATION,
DESING OF PROTOTYPE AND MANUFACTURING OF PROTOTYPE FURNACE,
WHICH IS WORKING WITH CONTROL ALGORITHM FROM
METALLOGRAPHIC EXPERIMENTS**

Mehmet YAVUZ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgy and Materials Engineering

Supervisor: Prof. Yılmaz YALÇIN

This thesis includes calculation, desing and manufacturing prototype of a fully automated, efficient atmospheric heat treatment furnace that could eliminate faults coming from heat treatment processes and provides homogeneous heat distribution. The prototype furnace, will work according to the control algorithm obtained from the heat treatment and the metallographic experiments (microscopic structure, hardness test, tensile test, spectrometer analysis, etc.) by TTT (time-temperature-conversion) diagrams of steels. The pros of the project from other heat treatment furnaces are planned as follows:

1. Thermal homogenization.
2. The process is completely automatic and easy to use (easy to use, even for those without heat treatment experience and knowledge).
3. Thermal efficiency.

.

2020, xix+ 182 pages

Keywords: Heat treatment, Thermal and metallurgical calculations, Design, Prototype manufacturing.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Yılmaz YALÇIN, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın İbrahim SAVRUKOĞLU, Ali ERCAN, Zahit KUZUCU her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Mehmet YAVUZ
Afyonkarahisar, 2020

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvi
RESİMLER DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	2
2.1 Isıl İşlemin Temelleri	2
2.1.1 Isı Transferi	2
2.2 Kristal Kafes Kusurları.....	12
2.3 Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (ZSD) ve Sürekli Soğutma Dönüşüm (SSD) Diyagramları.....	15
2.3.1 İzotermal Dönüşüm Diyagramı	16
2.3.2 Sürekli Soğutma Dönüşüm (S-S-D) Diyagramı	18
2.3.3 IT ve SSD Diyagramlarını Kullanılabileceği Isıl İşlem Prosesleri.....	22
2.3.4 İş Parçalarını Soğutma İşleminde Yapısal Bileşenleri ve Sertliği Tahmin Etmek İçin SSD Diyagramının Kullanımı.....	23
2.4 Tavlama İşlemleri.....	33
2.4.1 Gerilim Giderme Tavlaması	33
2.4.2 Normalizasyon	39
2.4.3 İzotermal Tavlama	46
2.4.4 Yumuşatma Tavlaması (Küreselleştirme Tavlaması).....	52
2.4.5 Rekristalizasyon (Yeniden Kristalleşme) Tavlaması.....	59
2.4.5.1 Toparlanma.....	62
2.4.5.2 Poliganizasyon (Dislokasyonların Yeniden Dizilmesi).....	62
2.4.5.3 Yeniden Kristalleşme ve Tane Büyümesi	64
2.5 Fırın Transfer Mekanizmaları	64
2.5.1 Yığın Fırınları	66
2.5.1.1 Kutu Fırınları	66

2.5.1.2 Atmosfer Kontrollü (Integral Quench) Isıl İşlem Fırını	67
2.5.1.3 Çukur Tipi Isıl İşlem Fırını.....	68
2.5.1.4 Araba Tabanlı Isıl İşlem Fırını	69
2.5.1.5 Kaldırmalı (Tip-Up) Isıl İşlem Fırını	70
2.5.2 Sürekli Isıl İşlem Fırını	70
2.5.2.1 Yürüyen Tabanlı Isıl İşlem Fırını	71
2.5.2.2 Makara Tabanlı Isıl İşlem Fırını	71
2.5.2.3 İtmeli (Pusher) Isıl İşlem Fırını	72
2.5.2.4 Örgü Bant Konveyörlü Isıl İşlem Fırını	72
2.5.2.5 Sallar Tabanlı Isıl İşlem Fırını.....	73
2.5.2.6 Vidalı Konveyör Isıl İşlem Fırını	73
2.5.2.7 Döner Tabanlı Isıl İşlem Fırını	74
2.5.3 Fırınlarda Isı Üretimi: Elektrik ve Gaz	75
2.5.3.1 Fırın Isıtma Ekonomisi	75
2.5.3.2 Elektrikli Isıtma Fırını	78
2.5.4 Gaz Yakıtlı Fırınlr	84
2.5.5 Isı Transferi.....	86
2.5.5.1 Konveksiyonla Isı Transferi	87
2.5.5.2 Radyasyonla Isı Transferi.....	92
2.5.5.3 İletimle Isı Transferi	93
2.5.6 Parçanın Isınma Süresi.....	95
2.6 Refrakter Malzemeler.....	97
2.6.1 Magnezyum Bileşimleri.....	98
2.6.2 Alüminyum Oksit İçeren Bileşimler.....	98
2.6.3 Şamot Bileşimleri	98
2.6.4 Silika Refrakterler.....	99
2.6.5 Monolitik Refrakterler	99
2.7 Benzer Literatür Çalışmaları	99
3. MATERYAL VE METOT	102
3.1 Tasarım.....	102
3.1.1 Tasarım Özellikleri	102
3.2 İmalat.....	104
3.2.1 Kullanılan Hammadde ve İmalat Türleri	105
3.2.2 Gövde İmalatı	106
3.2.3 Yürüyen Taban İmalatı	106

3.3 Mekaniksel Donanımlar	107
3.3.1 Profiller, Saclar, Lamalar ve Miller	107
3.3.2 Makaralı Ray Tekerleği	107
3.3.3 Terminal Seçimi.....	109
3.4 İzolasyon Ürünleri.....	109
3.4.1 Seramik Elyaf Plaka (Board)	109
3.4.2 Seramik Elyaf Battaniye (Blanket)	110
3.4.3 Ateş Tuğlası	111
3.4.4 Rezistans Askı Tuğla	112
3.4.5 Seramik Taşıyıcı Boru	113
3.4.6 Rezistans Teli.....	114
3.5 Tam Otomasyonlu Fırının Çalışmasında Oluşturulacak Algoritma İçin İmalat Çeliklerine Uygulanan Deneysel Çalışmalar.....	114
3.5.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler	115
3.5.1.1 Deneylerde Kullanılan Çelik Malzemeler	115
3.5.1.2 Isıl İşlem Soğutma Ortamları	117
3.5.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar.....	118
3.5.3 Deneylerin Yapılışı	122
3.5.3.1 Isıl İşlem Yapılacak Numunelerin Hazırlanması.....	122
3.5.3.2 Su Verme Ortamlarının Hazırlanması	122
3.5.3.3 Isıl İşlemler	122
3.5.3.4 Metalografik Çalışmalar	123
3.5.3.5 Sertlik Deneyleri.....	124
3.5.3.6 Çekme Deneyleri	124
4. BULGULAR	125
4.1 Nihai Tasarım.....	125
4.2 Deneysel Sonuçlar ve Değerlendirme	127
4.2.1 Mikroyapı İncelemesi	127
4.2.2 Sertlik Testi Sonuçları	152
4.2.3 Çekme Testi Sonuçları.....	154
4.3 Isı Transfer Hesaplamaları	158
4.3.1 Fırın Gücünün Tayini.....	158
4.3.2 Rezistans Seçimi	161
4.3.3 Yalıtım Hesabı	165
4.4 Otomasyon	166
4.5 Isıl İşlem Fırını İmalatı ve Montajı	170

5. TARTIşMA VE SONUÇ.....	177
6. KAYNAKLAR.....	180
ÖZGEÇMİş.....	182



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

α	Isı Yayınımı
λ	Isı iletkenliği
k	Isıl iletkenlik
T	Sıcaklık
Q	Isı akısı
F	Yüzey alanı
C _p	Isı kapasitesi
σ	Stefan-Boltzmann sabiti
ε	Emisyon ilişkisi katsayısı
C	Hollomon-Jaffe sabiti
P	Hollomon parametresi
Btu/h	Isı aktarım hızı
W	Yükleme ağırlığı
g	Yerçekimi sabiti
β	Hacimsel termal genleşme katsayısı
ν	Kinematik viskozite
HB	Brinell sertliği
HRC	Rockwell sertliği
MPa	Megapascal
kVA	Kilowatt-amper
kW	Kilowatt
μm	Mikrometre
cm^2 / Ω	Özdirenç
Ω/m	Birim yüzeydeki direnç
W/cm ²	Yüzey yükü

Kısaltmalar

CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
FEM	Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Metodu)
IQ	Integral Quench (Atmosfer Kontrollü)
IT	İzotermal dönüşüm
PID	Proportional Integral Derivative (oransal-integral-türevsel denetleyici kontrol döngüsü yöntemi)
PLC	Programmable Logic Controller (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici)
SSD	Sürekli Soğutma Dönüşüm
ZSD	Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm

ŞEKİLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Bir plakanın kesitinde ısıtma ve soğutma sırasındaki sıcaklık dağılımı.....	3
Şekil 2.2 Seçilen çelik grupları için ısı iletkenliğinin sıcaklık bağımlılığı λ . (a) saf demir; (b) alaşımsız çelikler; (c) düşük alaşımlı çelikler; (d) yüksek alaşımlı çelikler.....	5
Şekil 2.3 Ölçülen yüzey sıcaklığı - zaman geçmişinden hesaplanan 50 mm çapında 200 mm'lik bir paslanmaz çelik silindiri 20 °C'lik yağda söndürürken ısı transfer katsayısı ve yüzey sıcaklığı grafiği.....	10
Şekil 2.4 Sıcaklık dağılımının zamanla değişmesi ile birlikte bir plaka kalınlığında (s), farklı ısı transfer koşullarına bağlı olarak λ/α oranı.....	11
Şekil 2.5 Farklı ısı transfer koşulları $(\lambda/\alpha)_1$ ve $(\lambda/\alpha)_2$ olduğunda, şekil 6.4'te gösterilen plaka kesitinde x_1 ve x_2 noktalarındaki plaka sıcaklıklarının ve x_1 noktasındaki sıcaklık gradyanlarının değişimi.....	12
Şekil 2.6 Kafes kusurları. (a) kafes nokta kusurları; (B) doğrusal ve yüzeysel kafes kusurları; (C) yüzeysel kafes kusurları; (d) bölgesel kafes kusurları.....	14
Şekil 2.7 DIN 50CrV4 çelik izermal dönüşüm (IT) diyagramı.....	16
Şekil 2.8 Denklem 2.15'e göre, otIT diyagramlarında dönüştürülmüş yapı (M) miktarı ile zaman arasındaki ilişki.....	17
Şekil 2.9 DIN 41Cr4 çelik izotermal dönüşüm (IT) diyagramı.....	18
Şekil 2.10 DIN 50CrV4 çeliği sürekli soğutma dönüşüm (SSD) diyagramı.....	19
Şekil 2.11 DIN 16MnCr5 çelik 850 °C (a), 1050 °C (b) östenit sıcaklığında ZSD diyagramı.....	21
Şekil 2.12 DIN 41Cr4 çeliğin iki sıcaklık arasındaki bileşim farkının, ilgili SSD diyagramındaki dönüşüm eğrilerinin konumu üzerindeki etkisi.....	22
Şekil 2.13 Sadece IT diyagramlarının kullanılabildiği izotermal ısıl işlem süreçleri. (a) İzotermal tavlama; (b) östempereleme; (c) martemperleme.....	24
Şekil 2.14 Sadece SSD diyagramlarının kullanılabileceği sürekli soğutma ısıl işlem süreçleri. (a) Tam martenzitik yapı elde etmek için doğrudan söndürme; (b) gerekli sertlikte bir ferrit– perlit yapısı elde etmek için yavaş soğutma; (c) karışık bir yapının elde edildiği sürekli soğutma rejimi.....	25

Şekil 2.15 Yuvarlak çubuk kesitinde sertlik dağılımının tahmini. (a) Soğutma eğrileri, belirtildiği gibi yüzeyin altında farklı noktalarda ölçülür. (b) (a)'dan üst üste bindirilmiş soğutma eğrileri ile ilgili çeliğin SSD şeması. (c) Soğutma üzerine çubuk kesitindeki sertlik dağılımı, (b)'den sertlik değerleri okunarak elde edilir.....	26
Şekil 2.16 (a) AISI 3410 için SSD diyagramı ve Jominy sertleşebilirlik eğrisi. (b) Farklı Jominy mesafelerinde soğutma oranı ile 12,5–100 mm çapında yuvarlak çubukların orta derecede çalkalanmış yağda soğutma oranı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik.....	28
Şekil 2.17 860 °C'de östenitize edilmiş haddelenmiş çelik için SSD diyagramı.....	30
Şekil 2.18 SSD diyagramlarında tasvir edildiği gibi düşük (a) ve yüksek (b) sertleşebilirliğe sahip çelik örnekleri.....	32
Şekil 2.19 Düşük karbonlu alaşımsız çeliğin artan sıcaklıktaki bazı mekanik özelliklerinde değişiklik. A, uzama; R_m , nihai çekme mukavemeti; σ_{so} , üst akma dayanımı; σ_{su} , daha düşük akma mukavemeti.....	35
Şekil 2.20 Belirtilen her bir alaşım elementinin %0.5'i alaşımsız bir çeliğe eklendiğinde, yüksek sıcaklıklarda akma mukavemetinde gözlenen artış.....	35
Şekil 2.21 Sertleştirilmiş ve temperlenmiş çelikler için artık gerilmelerin azaltılması üzerine farklı sürelerde uygulanan gerilim giderme (farklı sıcaklıklarda) işleminin etkisi.....	37
Şekil 2.22 Sertleştirme ve temperleme için (%0,2 gerilme için) üç sınıf alaşımlı yapı çeliğinin Larson-Miller yöntemine göre hesaplanan yüksek sıcaklıklarda akma mukavemeti. (a) Hesaplanan değerler ve (b) deneysel olarak elde edilen değerler.....	38
Şekil 2.23 Soğutma hızına ve kesit çapına bağlı olarak bir CrMoNiV alaşımlı çelikte teğetsel artık gerilmeler.....	39
Şekil 2.24 Normalizasyonun zaman-sıcaklık rejimi. a, Isıtma; b, östenit sıcaklığında tutma; c, havada soğutma; d, hava veya fırında soğutma.....	40
Şekil 2.25 Karbon içeriğine bağlı olarak alaşımsız çeliklerin normalleştirilmesi için östenit sıcaklık aralığı (S–E hattının üzerindeki sıcaklık aralığı, ikincil karbürlerin çözünmesi için kullanılır). α , ferrit; γ , östenit; Fe_3C , sementit.....	41

Şekil 2.26 %0,5 C'lik bir karbon çeliğini normalleştirilmesinin tane küçülmesine etkisi. (a) Haddelenmiş veya dövme olarak, tane boyutu ASTM 3 ve (b) normalize, tane boyutu ASTM 6. Büyütme 500x.....	41
Şekil 2.27 Normalleştirilmeden önce çelik döküm (a) ve normalleştirilmeden sonra çelik döküm (b) yapısı.....	42
Şekil 2.28 DIN 20MnCr5 çeliğinin yapısı (a) sıcak haddelenmeden sonra ve (b) 880°C'de normalleştirildikten sonraki yapısı. Büyütme 100x.....	42
Şekil 2.29 Ötektoid bir çelik yapısının normalleştirme işleminden sonra tane büyüklüğü üzerinde östenitleştirici sıcaklığın etkisinin şematik sunumu.....	44
Şekil 2.30 Alaşımsız DIN C35 çeliğinin normalleştirilmesi sırasında hatalı sıcaklık kontrolünün bir sonucu olarak ferrit ve perlitin homojen olmayan dağılımı. Büyütme 100x.....	45
Şekil 2.31 Çok hızlı bir soğutma oranı nedeniyle alaşımsız çelik DIN C35'in normalleştirilmesinden sonra tane sınırlarında iğne benzeri ferrit oluşumu. Büyütme 500x.....	45
Şekil 2.32 Havada soğutulmuş farklı çaplarda ki yuvarlak çubukların çekirdeğinde ölçülen üst üste bindirilmiş soğutma eğrileri ile alaşımsız çelik DIN Ck45.....	46
Şekil 2.33 Havada soğutulmuş farklı çaplarda ki yuvarlak çubukların çekirdeğinde ölçülen üst üste bindirilmiş soğutma eğrileri ile alaşımsız çelik DIN 55NiCrMoV6 (östenit sıcaklığı 950 °C) SSD diyagramı.....	47
Şekil 2.34 Sementasyon için düşük karbonlu çelikten yapılmış bir dövme yapı (DIN 16MnCr5). (a) Normalleştirildikten sonra ve (b) izotermal tavlama sonrası. Büyütme 200x.....	48
Şekil 2.35 İzotermal tavlama prensibi. Sementasyon için DIN 15CrNi6 düşük alaşımlı çeliğin ZSD diyagramı.....	49
Şekil 2.36 İzotermal tavlamanın sıcaklık-zaman döngüsü.....	49
Şekil 2.37 Düşük alaşımlı çelik DIN 16MnCr5 (solda) izotermal tavlama sonrası farklı yapılar. İyi dağıtılmış ferrit-perlit; doğru tavlama (merkezi). Dokulu ferrit-perlit yapısı; östenitleşmeden dönüşüm sıcaklığına (sağda) çok yavaş soğutma. Ferrit-perlit+beynit; perlit dönüşümünden önce aşırı soğutma.....	50

Şekil 2.38 Alman şirketi Edelstahlwerke Buderus A.G.-Wetzlar'ın iç standardı izotermal tavlama sonrası yapının izin verilen tekstüre derecesinin tahmini. Büyütme 100x.....	51
Şekil 2.39 DIN 17CrNiMo6 çeliğinin izotermal dönüşüm (IT) diyagramı.....	52
Şekil 2.40 (a) 720-740 °C'de yumuşak tavlama sonrası orta karbonlu düşük alaşımlı çelik DIN 50CrMoV4 ve (b) 820 °C'de tavllanmış yüksek hızlı çelik yapıları. Büyütme 500x.....	53
Şekil 2.41 Alman şirketi Edelstahlwerke Buderus A.G.-Wetzlar'ın DIN 100Cr6 çeliğinin yumuşak tavlama sonrası küreselleşme derecesinin değerlendirilmesi için iç standardı. Büyütme 500x.....	55
Şekil 2.42 Yumuşak tavlama sırasında sementit lamelini sferoitlere dönüştürme sürecinin şematik sunumu.....	56
Şekil 2.43 Karbon içeriği %0,6–1,35 C olan alaşımsız çeliklerin yumuşak tavlama için 4 sıcaklık aralığı.....	56
Şekil 2.44 Yumuşak tavlama sıcaklık-zaman rejimleri. (a) Alaşımsız çelikler ve beynitik veya martenzitik başlangıç yapısına sahip alaşımlı çelikler için A_{C1} 'in altında 20 °C'de tavlama; (b) A_{C1} 'in üstünde 10 °C'de tavlama (başlangıç) ve alaşımlı çelikler için A_{C1} 'in altında 30 °C'ye düşürme; (c) hiper ötektoid çelikler için A_{C1} yaklaşık ± 5 °C tavlama.....	57
Şekil 2.45 Gerekli sferodizasyon derecesini elde etmek için alaşımsız çelik DIN C35'in yumuşak tavlama için zaman–sıcaklık diyagramı.....	57
Şekil 2.46 Nihai çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve alaşımsız DIN C75 ötektoid çeliğin artan karbürizasyonu ile uzama değişimi.....	58
Şekil 2.47 Karbürizasyon süresine ve sıcaklığına bağlı olarak yumuşak tavlama sonrası %0,89 C içeren alaşımsız bir çeliğin sertliği.....	59
Şekil 2.48 Sementasyon, sertleştirme ve temperleme için yapısal çeliklerin işlenebilirliği üzerine nihai çekme mukavemeti ve karbürizasyon derecesinin etkisi. (a) Karbürizasyon derecesi %30'dan az; (b) karbürizasyon derecesi %40 ila %60 arasında; (c) karbürizasyon derecesi %70'den büyük.....	60
Şekil 2.49 %0,05 düşük karbonlu çelik (a) soğuk çalışma ile %20 azalma (sertlik 130 HV) ve (b) 750 °C'de sonraki yeniden kristalleşme tavlama sonrası (sertlik 75 HV). Büyütme 200x.....	60

Şekil 2.50 Soğuk haddeleme işlemi ile düşük karbonlu bir çeliğin mukavemetinin artırılması.....	61
Şekil 2.51 Poliganizasyonun şematik gösterimi. Kenar dislokasyonunun ve kayma düzlemlerinin (a) poliganizasyondan önce ve (b) poliganizasyondan sonra düzenlenmesi. a, Kenar dislokasyonları; b, kayma düzlemleri.....	63
Şekil 2.52 Tavlama sıcaklığının bir fonksiyonu olarak, soğuk haddelenmiş %0,03 C, %0,54 Si ve %0,20 Mn'ye sahip bir çeliğin yeniden kristalleştirilmesi sırasında sertliğin azalması (Isıtma hızı 20 °C/sa.). a, Yeni tanelerin oluşumunun başlaması; b, yeni tanelerin oluşumunun son bulması.....	63
Şekil 2.53 Sürekli bir fırın içerisindeki mesafe ile sıcaklık değişimi.....	65
Şekil 2.54 Yürüyen tabanlı fırın mekanizması.....	71
Şekil 2.55 Isıtma-soğutma bölgeleri ve makara tabanlı fırında transfer mekanizması.....	71
Şekil 2.56 Sallar tabanlı ısıtma işlemi fırını şematik gösterimi.....	73
Şekil 2.57 Vidalı konveyör ısıtma işlemi fırını şematik gösterimi.....	73
Şekil 2.58 Holcroft çok bölmeli döner karbonlama sistemi.....	74
Şekil 2.59 Mevcut ısı enerjisinin yakıt yağı ve doğal gaz için egzoz sıcaklığına bağımlılığı.....	77
Şekil 2.60 900 °C fırın sıcaklığında olası yükleme.....	79
Şekil 2.61 Kanthal süper 1700 ve 1800'ün sıcaklığa göre direnç değerleri.....	80
Şekil 2.62 Küresel ısıtma elemanları için önerilen yükleme.....	81
Şekil 2.63 Global ısıtma elemanları için elektriksel direnç ve yüzey sıcaklığı grafiği.....	81
Şekil 2.64 Molibden disilis ısıtma elemanları için elektriksel direnç eğrisi.....	82
Şekil 2.65 Molibden disilis ısıtma elemanları için önerilen yükleme.....	83
Şekil 2.66 Egzoz gazı geri kazanımıyla birlikte potansiyel yakıt tasarrufu.....	85
Şekil 2.67 Yanma havasının ön ısıtılmasından beklenen yakıt tasarrufunu belirlemek için kullanılan grafik.....	86
Şekil 2.68 Sıcaklık artışı ve ısıtma oranlarının zamana göre ilişkisi.....	86
Şekil 2.69 Fırın ısı transfer süreci.....	87
Şekil 2.70 Isıl işlemde yaygın olarak karşılaşılan şekiller için ısı transfer denklemleri.....	88
Şekil 2.71 Isı iletkenliğinin sıcaklık ile değişimi.....	88

Şekil 2.72 Düz bir duvar için ısı akısının hesaplanması.....	89
Şekil 2.73 Bazı demir alaşımları ve inconel için termal iletkenlik ve sıcaklık diyagramı.....	89
Şekil 2.74 Çeşitli refrakter malzemelerin ısı iletkenliği.....	90
Şekil 2.75 Çeşitli fırın bileşenleri için ısı transfer süreçlerinin özeti.....	93
Şekil 2.76 Isıtma süresinin hesaplanmasında yararlanılan diyagram.....	96
Şekil 2.77 Çeşitli formda parçaların ısınma sürelerinin hesaplanmasında yararlanılan diyagram.....	97
Şekil 3.1 Mühendislikte tasarım süreçleri.....	103
Şekil 3.2 Değişik soğutma ortamlarında su verme esnasında elde edilen soğuma hızları.....	117
Şekil 3.3 Bazı soğutma ortamlarının değişik soğutma yöntemleri sonucunda elde edilen soğutma şiddetleri.....	118
Şekil 3.4 Isıl işlem yapılacak numunelerin teknik resmi.....	122
Şekil 4.1 Isıl işlem fırını render görüntüsü.....	126
Şekil 4.2 1040 malzeme için ısıl işlem proses bilgileri kullanılarak matematiksel fonksiyonlar sonucu oluşturulan ZSD diyagramı ve farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri. (a) Suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (b) Tuzlu suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (c) Yağda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri.....	129
Şekil 4.3 1045 malzeme için ısıl işlem proses bilgileri kullanılarak matematiksel fonksiyonlar sonucu oluşturulan ZSD diyagramı ve farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri. (a) Suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (b) Tuzlu suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (c) Yağda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri.....	134
Şekil 4.4 1050 malzeme için ısıl işlem proses bilgileri kullanılarak matematiksel fonksiyonlar sonucu oluşturulan ZSD diyagramı ve farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri. (a) Suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (b) Tuzlu suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (c) Yağda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri.....	139

Şekil 4.5 St 52 malzeme için ısıtma işlemi prosesi bilgileri kullanılarak matematiksel fonksiyonlar sonucu oluşturulan ZSD diyagramı ve farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri. (a) Suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (b) Tuzlu suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (c) Yağda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri.....	144
Şekil 4.6 St 60 malzeme için ısıtma işlemi prosesi bilgileri kullanılarak matematiksel fonksiyonlar sonucu oluşturulan ZSD diyagramı ve farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri. (a) Suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (b) Tuzlu suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (c) Yağda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri.....	150
Şekil 4.7 Deneyde kullanılan malzemelerin ham ve ısıtma işlemleri sonrası sertlik değerleri. (a) 1040 malzeme. (b) 1045 malzeme. (c) 1050 malzeme. (d) St 52 malzeme. (e) St 60 malzeme.....	153
Şekil 4.8 Deneyde kullanılan malzemelerin ham ve ısıtma işlemleri sonrası akma ve çekme gerilmesi değerleri. (a) 1040 malzeme. (b) 1045 malzeme. (c) 1050 malzeme. (d) St 52 malzeme. (e) St 60 malzeme.....	155
Şekil 4.9 Fırın gücünün tayini.....	159
Şekil 4.10 Endüstriyel fırınlar uygulamalarında Kanthal A-1 için yüzey yükleri.....	162
Şekil 5.1 Isıtma sonrası sıcaklık dağılımı.....	179

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Sıvı veya gazlı ortamda soğutma veya söndürme için ısı transfer katsayısının ortalama değerleri.....	9
Çizelge 3.1 St 52 çelik mekanik özellikleri.....	107
Çizelge 3.2 Makaralı tekerlek ölçü değerleri.....	108
Çizelge 3.3 Deneylerde kullanılan çelik malzemelerin kimyasal bileşimleri.....	116
Çizelge 3.4 Deneylerde kullanılan çelik malzemelerin ısıtılma işlem bilgileri.....	116
Çizelge 4.1 1040 malzeme ham hali ve uygulanan ısıtılma işlemler sonrası faz sayısı ve faz oranları.....	129
Çizelge 4.2 1045 malzeme ham hali ve uygulanan ısıtılma işlemler sonrası faz sayısı ve faz oranları.....	134
Çizelge 4.3 1050 malzeme ham hali ve uygulanan ısıtılma işlemler sonrası faz sayısı ve faz oranları.....	139
Çizelge 4.4 St 52 malzeme ham hali ve uygulanan ısıtılma işlemler sonrası faz sayısı ve faz oranları.....	144
Çizelge 4.5 St 60 malzeme ham hali ve uygulanan ısıtılma işlemler sonrası faz sayısı ve faz oranları.....	149
Çizelge 4.6 Isıtılma işlem fırını tasarım denklemleri.....	160
Çizelge 4.7 Isıtılma işlem fırını elektriksel değerler.....	160
Çizelge 4.8 Kanthal A-1 için C_t katsayısı.....	163
Çizelge 4.9 Kanthal A-1 rezistans teli için 20 °C’de özellikleri.....	164
Çizelge 4.10 Hesaplamalar sonrası kullanılacak rezistans teli özellikleri.....	164
Çizelge 4.11 Fırın dış yüzeyinde meydana gelen ısıtılma geçirgenlik değerleri ve ısı kayıpları.....	166
Çizelge 4.12 Ladder diyagram fonksiyonları.....	167
Çizelge 5.1 Isıtılma işlem fırını verim hesabı.....	178

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 2.1 (a) Elektrikle ısıtılan kutu fırını. (b) Küçük parçaları ısıtmak için kullanılan küçük ‘yüksek hızlı’ laboratuvar fırını ve aynı zamanda üretim ölçekli sürekli gerilim giderici fırınlar için gerilim giderici ve temperleme süreçleri geliştirmek için ısıtma ve soğutma döngülerini modellemek için kontrol edilebilir.....	66
Resim 2.2 (a) Kapalı atmosfer kontrollü fırın. (b) Kompakt yığın entegre su verme fırını.....	67
Resim 2.3 Çukur tipi ısıtma işlem fırını.....	68
Resim 2.4 Döküm ve dövme ısıtma işlem için araba tabanlı fırınlar.....	69
Resim 2.5 Sürekli fırın örnekleri.....	70
Resim 2.6 Makara tabanlı ısıtma işlem fırını.....	72
Resim 2.7 Örgü bant konveyörlü ısıtma işlem fırını.....	72
Resim 2.8 Döner tabanlı ısıtma işlem fırını.....	74
Resim 3.1 Makaralı ray tekerleği.....	108
Resim 3.2 Paslanmaz çelik 310 terminal.....	109
Resim 3.3 Seramik elyaf plaka (Board).....	110
Resim 3.4 Seramik elyaf battaniye (Blanket).....	111
Resim 3.5 Ateş tuğlası.....	112
Resim 3.6 Rezistans askı tuğlası.....	113
Resim 3.7 Seramik taşıyıcı boru.....	113
Resim 3.8 Kanthal A1 rezistans teli.....	114
Resim 3.9 Sertleştirme işlemi için numunelerin ısıtılmasında kullanılan İzomsa marka indüksiyon makinası.....	118
Resim 3.10 Numunelerin kesilmesinde kullanılan Onalkon Model Q-2 metalografi numune kesme cihazı.....	119
Resim 3.11 Numune zımparalama ve yüzey parlatma işlemlerinde kullanılan Metkon Forcopol marka parlatma cihazı.....	119
Resim 3.12 Mikroyapı incelemelerinde kullanılan Metkon İMM 901 marka optik mikroskop.....	120

Resim 3.13 Sertlik ölçümlerinde kullanılan Bms Digirock-Rbov marka sertlik ölçüm cihazı.....	120
Resim 3.14 Çekme testi deneylerinin yapıldığı Utest marka çekme cihazı.....	121
Resim 3.15 Temperleme ısıtıl işleminin yapıldığı numune fırını.....	121
Resim 3.16 Isıl işleme tabi tutulan çelik numuneler.....	123
Resim 3.17 Zımparalama ve yüzey parlatma işlemi için hazırlanan çelik numuneler..	123
Resim 4.1 1040 çelik mikroyapı ve faz analizi fotoğrafları. (a) Ham hali. (b) Suda soğutma sonrası. (c) Suda soğutma ve temperleme sonrası. (d) Tuzlu suda soğutma sonrası. (e) Tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası. (f) Yağda soğutma sonrası. (g) Yağda soğutma ve temperleme sonrası. Büyütme 400x.....	127
Resim 4.2 1045 çelik mikroyapı ve faz analizi fotoğrafları. (a) Ham hali. (b) Suda soğutma sonrası. (c) Suda soğutma ve temperleme sonrası. (d) Tuzlu suda soğutma sonrası. (e) Tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası. (f) Yağda soğutma sonrası. (g) Yağda soğutma ve temperleme sonrası. Büyütme 200x ve 400x.....	132
Resim 4.3 1050 çelik mikroyapı ve faz analizi fotoğrafları. (a) Ham hali. (b) Suda soğutma sonrası. (c) Suda soğutma ve temperleme sonrası. (d) Tuzlu suda soğutma sonrası. (e) Tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası. (f) Yağda soğutma sonrası. (g) Yağda soğutma ve temperleme sonrası. Büyütme 200x ve 400x.....	137
Resim 4.4 St 52 çelik mikroyapı ve faz analizi fotoğrafları. (a) Ham hali. (b) Suda soğutma sonrası. (c) Suda soğutma ve temperleme sonrası. (d) Tuzlu suda soğutma sonrası. (e) Tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası. (f) Yağda soğutma sonrası. (g) Yağda soğutma ve temperleme sonrası. Büyütme 400x.....	142
Resim 4.5 St 60 çelik mikroyapı ve faz analizi fotoğrafları. (a) Ham hali. (b) Suda soğutma sonrası. (c) Suda soğutma ve temperleme sonrası. (d) Tuzlu suda soğutma sonrası. (e) Tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası. (f) Yağda soğutma sonrası. (g) Yağda soğutma ve temperleme sonrası. Büyütme 400x.....	147
Resim 4.6 Çekme testi sonrası hasara uğrayan örnek numune.....	155

Resim 4.7 Isıl işlem fırını elektrik kumanda panosu.....	166
Resim 4.8 Isıl işlem fırını güç paneli iç donanım resmi.....	167
Resim 4.9 Isıl işlem fırını alt tabanı montaj resmi.....	171
Resim 4.10 Isıl işlem fırını yan duvarı montaj resmi.....	171
Resim 4.11 Isıl işlem fırını tavanı montaj resmi.....	171
Resim 4.12 Isıl işlem fırını yürüyen tabanı montaj resmi-1.....	172
Resim 4.13 Isıl işlem fırını yürüyen taban montaj resmi-2.....	172
Resim 4.14 Isıl işlem fırını yalıtımı montaj resmi-1.....	172
Resim 4.15 Isıl işlem fırını yalıtımı montaj resmi-2.....	173
Resim 4.16 Isıl işlem fırını yalıtımı montaj resmi-3.....	173
Resim 4.17 Isıl işlem fırını ateş tuğlası montaj resmi.....	173
Resim 4.18 Isıl işlem fırını rezistans teli, rezistans borusu ve rezistans askı tuğlası montaj resmi.....	174
Resim 4.19 Isıl işlem fırını montaj resmi-1.....	174
Resim 4.20 Isıl işlem fırını montaj resmi-2.....	174
Resim 4.21 Isıl işlem fırını montaj resmi-3.....	175
Resim 4.22 Isıl işlem fırını montaj resmi-4.....	175
Resim 4.23 Isıl işlem fırını montaj resmi-5.....	175
Resim 4.24 Isıl işlem fırını montaj resmi-6.....	176
Resim 4.25 Isıl işlem fırını montaj resmi-7.....	176
Resim 4.26 Isıl işlem fırını montaj resmi-8.....	176

1. GİRİŞ

Isıl işlem; malzemelerin ısıl prosesleriyle kristal yapı dönüşümleri neticesinde malzemelere istenilen mekanik özelliklerin kazandırılması işlemidir. Makina parçalarını kullanım alanlarına göre farklı kesit ve boyutlarda tasarlanabilir. Tasarım kriterlerinden biri de malzemelerin mekanik özellikleridir. Yani dayanımı düşük A malzemesiyle, yüksek dayanımlı B malzemesi aynı amaç için kullanılabilir. Fakat kesit ve boyutlarda değişiklik yapmak gereklidir. Ya da aynı malzemeye ısıl işlem uygulayarak da mekanik özellikler artırılabilir (Callister 2008).

Prosesin doğru uygulanması hayati öneme sahiptir. Isıl işlem prosesinde etkili çok sayıda parametre vardır. Bunlardan bazıları; ısıl homojenizasyon, süre, kristal yapı dönüşümleridir. Bu parametlerin bir ya da bir kaçının yanlış ayarlanması ısıl işlemin hatalı olmasına neden olabilmektedir. Ve parçaların kullanım yerlerinde ön görülemeyen kırılmalara ve deformasyonlara neden olabilmektedir (Hibbert 1968).

Bu sebeple pilot 5 farklı malzeme üzerinden metalurjik deneyler yapılacak ve bu deneyler sonucunda kontrol algoritması oluşturulacaktır. Böylece prosesin kontrolü kullanıcı hatalarından arındırılacak ve proses tamamen kolay kullanımlı bir programla PLC üzerinden kontrol edilecektir.

Bunun haricinde birim işlem maliyetlerini azaltmak için prosesin verimliliği artırılacaktır. Bu verimlilik, fırın ön tasarımının ısıl hesaplamaları neticesinde hesaplanarak nihai tasarımda kullanılacaktır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Isıl İşlemin Temelleri

2.1.1 Isı Transferi

Isıl işlem operasyonları, uygulanacak iş parçasına doğrudan ve dolaylı bir şekilde uygulanan enerji sonrası parçanın ısıtılması ve soğutulması işlemlerini içerir. Örnek olarak Şekil 2.1’de bir plakanın enine kesitinde ısıtma ve soğutma sırasında meydana gelen sıcaklık dağılımı gösterilmektedir (Spur ve Stöferle 1987).

Isıl işlem operasyonlarında, işlem görmüş iş parçalarını ısıtırken veya soğuturken, zaman içinde sıcaklık dağılımının değiştiği sabit olmayan sıcaklık alanları gelişir. Kalınlığı s olan plaka F yüzeyi boyunca (Şekil 2.1), ısı akısı Q verilir (ısıtma sırasında) veya uzaklaştırılır (soğutma sırasında). Isı akısı denklemi 2.1’de verilmiştir.

$$Q = \frac{dQ}{dt} = -\lambda F \frac{dT}{dx}, \quad x = 0, \dots, s/2 \quad (2.1)$$

Yukarıdaki denklemde,

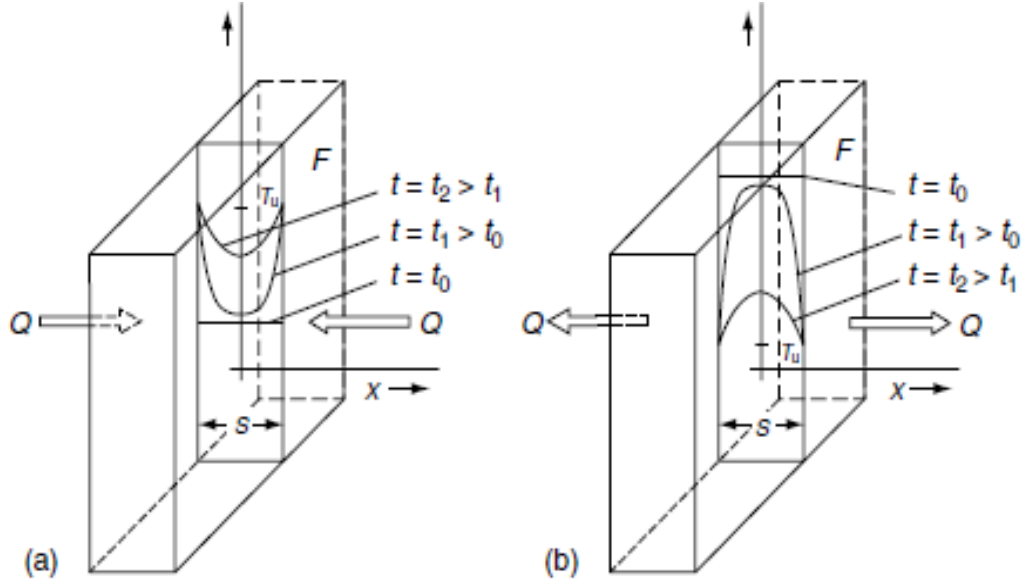
T = Sıcaklık (°C)

t = Zaman (s)

λ = Isı iletkenliği (W/(m K))

F = Yüzey alanı (m²)

dT/dx = Sıcaklık gradyanı (K/m)



Şekil 2.1 Bir plakanın kesitinde ısıtma (a) ve soğutma (b) sırasındaki sıcaklık dağılımı (Spur ve Stöferle 1987).

Termodinamiğin ilk yasasına göre sıcaklık dağılımı denklem 2.2’de gösterilmiştir.

$$dQ = p dx F C_p z dT \quad (2.2)$$

Yukarıdaki denklemde,

p = İş parçasının yoğunluğu (kg/m^3)

C_p = Sabit basınçtaki iş parçasının özgül ısı kapasitesi ($\text{J}/(\text{kg K})$)

Tek boyutlu ısı akısı için, iş parçası içinde zamana bağlı sıcaklık dağılımı denklem 2.3’te gösterilmiştir.

$$\frac{dT}{dx} = \frac{\lambda}{p C_p} \frac{d^2 T}{dx^2} = a \frac{d^2 T}{dx^2} \quad (2.3)$$

Yukarıdaki denklemde,

$a = \lambda / p C_p (\text{m}^2 / \text{s})$ = Sıcaklık yayılımı

Üç boyutlu durumda ısı akısı denklem 2.4 ve denklem 2.5’de verilmiştir.

$$\frac{dT}{dx} = a \left(\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} \right) = a \nabla^2 T \quad (2.4)$$

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2} \quad (2.5)$$

Denklem 2.3 ve denklem 2.4 sıcaklık difüzyonunun sabit olmayan ısı iletimi nedeniyle bir iş parçasının zamana bağlı sıcaklık değişimini temsil ettiği sıcaklık iletim denklemleridir.

F alanının bir yüzeyinden akan bir ısı akısı dQ , Fourier'in ısı iletim yasasına göre, ilgili konumdaki sıcaklık gradyanına orantılı iletim yasası denklem 2.6’da verilmiştir.

$$dQ = -\lambda \frac{dT}{dx} F dt \quad (2.6)$$

veya birim zaman (s) ve birim yüzey (m^2) başına ısı akısı yoğunluğu olarak ifade edilir.

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} = -\lambda \text{ grad } T [W/m^2] \quad (2.7)$$

Denklem 2.7 sıcaklık gradyanının ısı akısının itici gücü olduğunu açıkça göstermektedir. Isı iletkenliği (λ), bu ısı iletim denkleminde orantılı bir faktör olarak ısı taşıma üzerinde malzemenin özelliklerinin etkisini temsil eder.

Yukarıdaki denklemlerde, ısı iletkenliği (λ) sabit bir değer olarak kabul edilir, ama gerçekte sıcaklığa bağlıdır. Şekil 2.2, çelik grupları için ısı iletkenliğinin sıcaklığa bağımlılığını göstermektedir. Görüldüğü gibi, farklı çelik kaliteleri arasında ısı iletkenliğindeki en büyük fark oda sıcaklığındadır. Alaşımsız çelikler için ısı iletkenliği artan sıcaklıkla azalır, yüksek alaşımlı çelikler için artan sıcaklıkla birlikte hafifçe artar. Yaklaşık 900 °C’de, λ değeri hemen hemen tüm çelik kaliteleri için aynıdır. Özel ısı kapasitesi C_p sıcaklığa bağlıdır (Samuels 2003).

Isı iletim denklemi (denklem 2.7) ile tanımlanan katı bir cisim üzerinden termal enerjinin taşınması, doğal olarak yüzeyin ötesine uzanır; yani ısı transferi parça yüzeyi ve çevresi arasında gerçekleşir. Bu ısı transferi, birim yüzey alanı ve birim zaman başına parça ve çevresi arasında değiş tokuş edilen ısı miktarı olarak ifade edilir. Newton'un soğutma yasasına göre, parça ile çevresi arasında değiş tokuş edilen ısı miktarı parça yüzeyi ile ortamının sıcaklığı arasındaki farka bağlıdır. İlgili ısı akı yoğunluğu denklem 2.8'de verilmiştir (Spur ve Stöferle 1987).

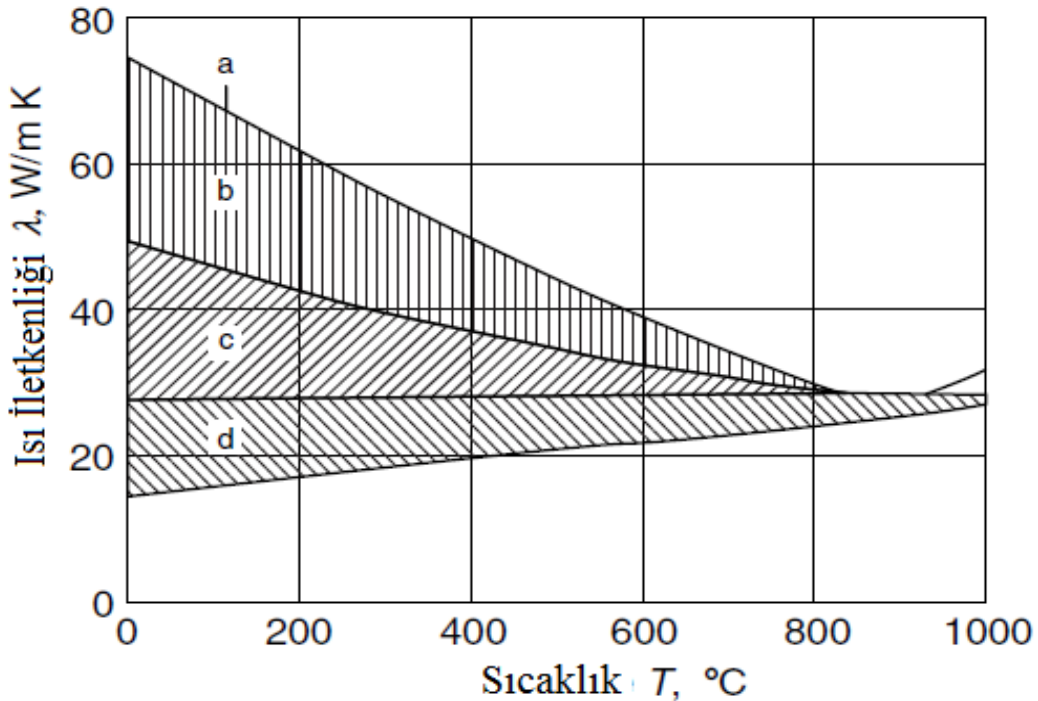
$$q = \frac{dQ}{dFdt} = \alpha(T_K - T_U) \text{ for } T_K > T_U \quad (2.8)$$

Yukarıdaki denklemde,

T_K = Yüzey sıcaklığı (°C)

T_U = Ortam sıcaklığı (°C)

α = Isı transfer katsayısı W/(m² K)



Şekil 2.2 Seçilen çelik grupları için ısı iletkenliğinin sıcaklık bağımlılığı λ . (a) saf demir; (b) alaşımsız çelikler; (c) düşük alaşımlı çelikler; (d) yüksek alaşımlı çelikler (Spur ve Stöferle 1987).

Isı transferinin gerçek koşulları, ilgili ısı transfer katsayısı α ile temsil edilir ve aşağıdaki koşullara bağlıdır:

1. Parçanın şekli ve kesit alanı
2. Parçanın konumu
3. Parçanın yüzey durumu
4. Malzemenin fiziksel özellikleri
5. Parçayı çevreleyen sıvının fiziksel özellikleri (yoğunluk, özgül ısı kapasitesi, dinamik viskozite)
6. Parçayı çevreleyen sıvının akış hızı

Her ısıtma veya soğutma işlemi sırasında, parça yüzeyi ve çevresi arasındaki sıcaklık farkı zamanla küçülür yani değiştirilen ısı miktarı azalır. Bu nedenle ısı transfer katsayısı α sabit değildir ancak parçanın yüzey sıcaklığına göre değişir.

Gazlar, sıvılar ve vakumlar ısı işlem prosesleri sırasında ısı transferinin gerçekleştiği ortamlardır. Isı üç farklı ısı transfer mekanizmaları ile transfer edilebilir: Isı iletimi, ısı konveksiyonu ve ısı radyasyonu (Callister 2008).

Isı iletimi (sıvılarda) bir sıcaklık gradiesi nedeniyle doğrudan bitişik parçacıklar arasında bir çalkalamasız sıvı veya gazlı ortamda meydana gelen ısı transferidir.

Isı konveksiyonu, sıvı parçacıklarının bir yerden diğerine hareketi ile gerçekleştiği için ısı taşıyan sıvının hareketine (akış veya ajitasyon) doğrudan bağlıdır. Bu nedenle ısı konveksiyonu sadece sıvı ve gazlarda mümkündür. Bir gaz ısı konveksiyonu aktarılan ısı miktarıda gaz parçacıklarının sayısına bağlıdır (Geels 2007).

Parçacık hareketinin tek nedeni sıcaklık farkının neden olduğu yoğunluk farkı ise hareket serbest veya doğal konveksiyon olarak adlandırılır. Genellikle, serbest ve zorunlu konveksiyonlar aynı anda gerçekleşir. Isı transferine katkıda bulunan serbest konveksiyon miktarı sıvı içindeki sıcaklık gradyanına bağlıdır ve zorunlu konveksiyonun katkısı akış hızına yani ajitasyon oranına bağlıdır.

Bir hava akımı silindire doğru geçtiğinde, konvektif ısı transfer katsayısı α_K , Eckstein (1987) e göre denklem 2.9 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\alpha_K = (4.64 + 3.49 \times 10^{-3} \Delta T) \frac{\nu^{0.61}}{D^{0.39}} [W/(m^2 K)] \quad (2.9)$$

Yukarıdaki denklemde,

D = Çap (m)

ΔT = Hava ve silindir yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı (°C)

ν = Hava hızı (m/s)

Üçüncü ısı transfer mekanizması ısı radyasyonudur. Katı cisimler, sıvılar ve gazlar ısıyı radyasyon şeklinde aktarabilir. Isı transferi herhangi bir ısı transferi taşıyıcısına bağlı değildir, bu nedenle vakum ortamında gerçekleşebilir. Isı radyasyonu uzunluğu 0,3-500 μm aralığında olan elektromanyetik dalgalar şeklindedir. Radyasyon bir cismin yüzeyine çarptığında bir kısmı emilir, bir kısmı yansır ve geri kalanı cisimden geçebilir. Her cisim kendi sıcaklığına karşılık gelen radyasyon yayar. Belli bir sıcaklıkta en yüksek miktarda radyasyon yayan ya da absorbe eden cisme kara cisim denir. Diğer tüm cisimler siyah gövdeden daha az radyasyon yayar veya emer. Bir cismin radyasyonunun kara cismin radyasyonuna oranı emisyon-ilişki katsayısı ε olarak adlandırılır (Eckstein 1987).

Bir cisimden yayılan toplam ısı akısı yoğunluğu Stefan-Boltzmann yasasına göre denklem 2.10 kullanılarak hesaplanabilir.

$$q = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.10)$$

Yukarıdaki denklemde,

ε = Emisyon ilişkisi katsayısı ($\varepsilon < 1.0$)

σ = Stefan-Boltzmann sabiti ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$)

T = Mutlak sıcaklık (K)

Eğer iki cisim karşılıklı olarak ısıyı değiştirirse, o zaman sıcak olan cisim daha soğuk olana ısı verir, ancak daha soğuk olan cisim aynı zamanda daha sıcak olan cisme ısı yayar. Transfer edilen ısı, ikisi tarafından emilen ısı miktarının farkından oluşur. F_1 yüzey alanına sahip bir cisimden herhangi bir yüzey alanının başka bir katı cismine radyasyon ile aktarılan toplam ısı denklem 2.11’de gösterilmiştir.

$$Q = \varepsilon_{1,2} \sigma F_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.11)$$

Yukarıdaki denklemde,

$\varepsilon_{1,2}$ = Her iki cismin emisyon-ilişki katsayısı

T_1 = Isı yayan cismin mutlak sıcaklığı (°C)

T_2 = Emici cismin mutlak sıcaklığı (°C)

Endüstriyel fırınlarda, ısı önemli ölçüde eşzamanlı ısı konveksiyon ve ısı radyasyonu ile aktarılır. Isı iletimi (sıvılarda) tarafından aktarılan ısı konveksiyon ve radyasyon tarafından aktarılan ısı ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir. Her iki mekanizma tarafından aktarılan toplam ısı hesaplanırken, radyasyon tarafından aktarılan ısıyı Newton yasasına benzer bir formülle ifade etmek uygundur. Bu formül denklem 2.12’de gösterilmiştir.

$$q = \alpha_\varepsilon (T_1 - T_2) \quad (2.12)$$

Radyasyon α_ε için ısı transfer katsayısı denklem 2.11 ve denklem 2.12 birleştirilerek aşağıda verilen denklem 2.13 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\alpha_\varepsilon = \varepsilon_{1,2} \sigma \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2} \quad (2.13)$$

Toplam ısı transfer katsayısı denklem 2.14 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_\varepsilon \quad (2.14)$$

Yukarıdaki denklemde,

α_k = Konveksiyon için ısı transfer katsayısı

Çizelge 2.1, Eckstein (1987) e göre, sıvı veya gazlı ortamda soğutma veya söndürme için ısı transfer katsayısının ortalama değerlerini vermektedir. Bu karmaşık ısı transfer katsayısı, her durumda daha önce tartışılan birçok özel faktöre bağlıdır ancak aynı zamanda iş parçasının yüzey sıcaklığına da bağlıdır. Cismin yüzey sıcaklığı çevrenin sıcaklığına eşit olduğu için ısı transferi sırasında değişen ısıya ve konuma bağlı bir değerdir. Eckstein (1987) e göre, karmaşık ısı transfer katsayısı 50 ve 1500 °C arasında 30 ile 50 kat artabilir. 300 °C altındaki sıcaklıklarda konveksiyon ile ısı transferi baskındır. Artan sıcaklıkla, radyasyonla ısı transferi daha önemli hale gelir ve yaklaşık 800 °C'de toplam ısı transferinin %80'ine ulaşır.

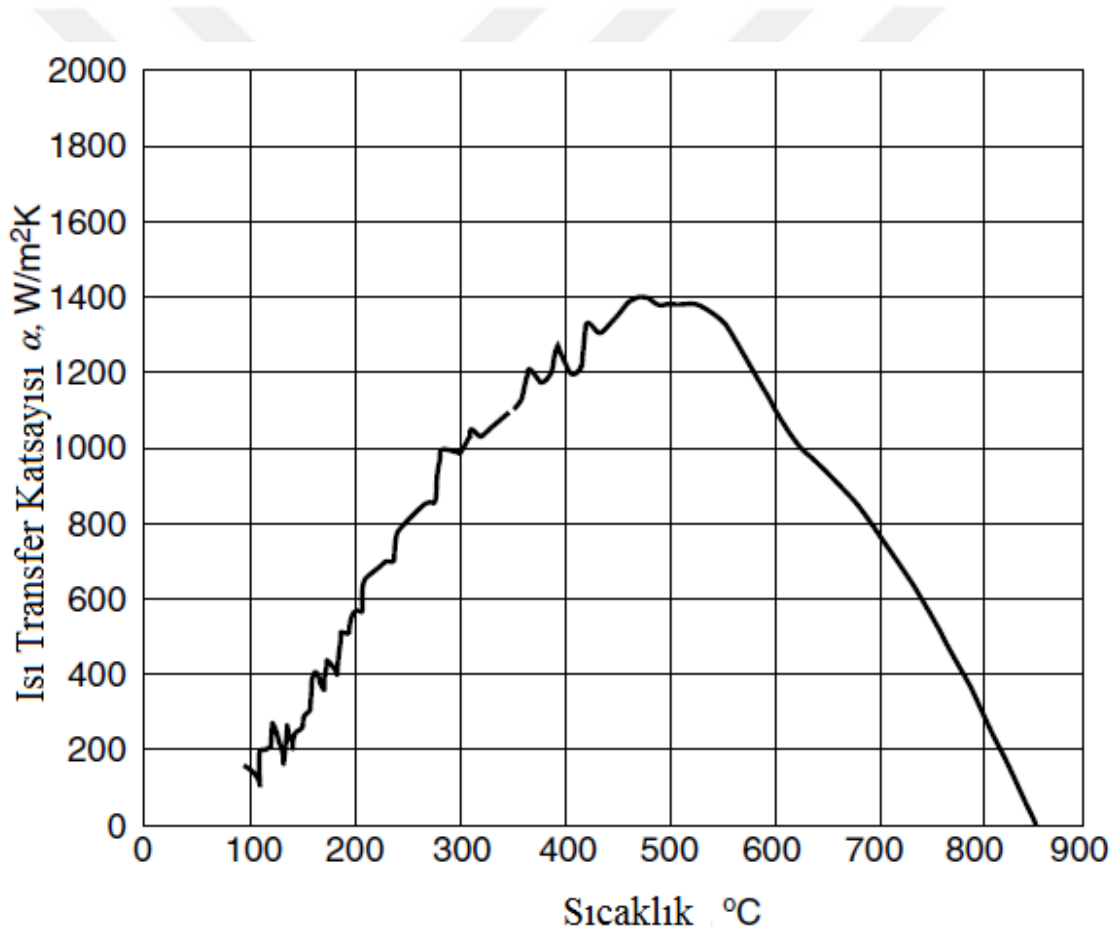
Çizelge 2.1 Sıvı veya gazlı ortamda soğutma veya söndürme için ısı transfer katsayısının ortalama değerleri (Eckstein 1987).

Ortam	Isı transfer Katsayısı, α (W/(m ² K))
Fırın	15
Durgun Hava	30
Hareketli Hava	40
Basınçlı hava	70
Hava-su karışımı	520
Sertleştirme yağı	580
Sıvı kurşun	1200
Su	3500

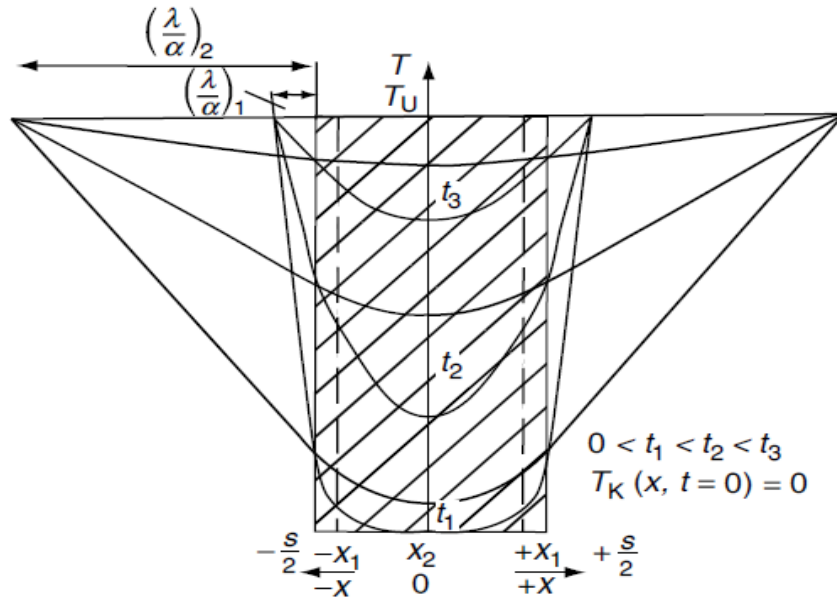
Özellikle iki fazlı ısı transferinin yüksek ısı akı yoğunluğu ile sabit olmayan koşullarda gerçekleştiği sıvılarda daldırma söndürme işleminde, ısı transfer katsayısı çok fazla değişir. Bu nedenle günümüzde ısı transferi hesaplamaları bilgisayar tarafından yapıldığında ortalama değer yerine ısı transfer katsayısının ısıya bağlı bir fonksiyonu kullanılmalıdır.

Her gerçek durumda bu işlevi elde etmenin pratik bir yolu, söndürme tankına uygun şekilde yerleştirilen yeterli şekilde işletilmiş bir probun (silindir veya plaka) yüzey sıcaklığını ölçmektir ve ölçülen yüzey sıcaklığından zaman geçmişi, karşılık gelen ısı akı yoğunluğu ve ısı transfer katsayısı sıcaklık fonksiyonları hesaplamaktır.

Şekil 2.3, 20 °C durağan yağda 50 mm çapında 200 mm paslanmaz çelik silindirin söndürülmesi için ısı transfer katsayısı ve yüzey sıcaklığını göstermektedir (Filetin vd. 1992). Probun yüzey sıcaklığını ölçmek için yeterli termokupl yoksa, sıcaklık yüzeye yakın ölçülebilir ve ters ısı iletim yöntemi ve yeterli matematiksel işlem sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak yüzey probun sıcaklığı hesaplanabilir.

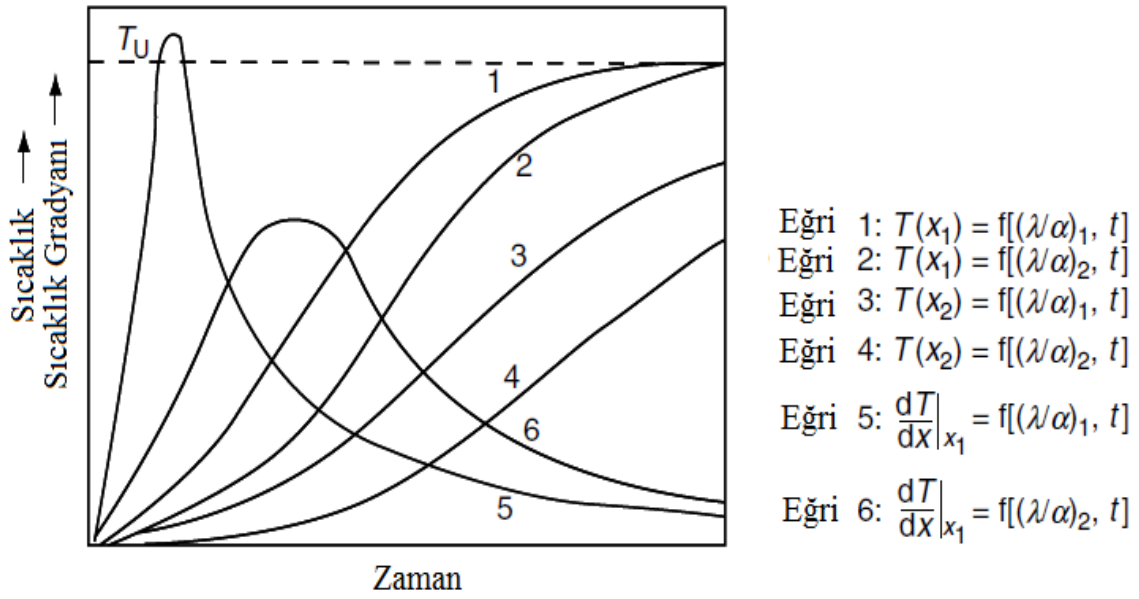


Şekil 2.3 Ölçülen yüzey sıcaklığı - zaman geçişinden hesaplanan 50 mm çapında 200 mm'lik bir paslanmaz çelik silindiri 20 °C'lik yağda söndürürken ısı transfer katsayısı ve yüzey sıcaklığı grafiği (Filetin vd. 1992).



Şekil 2.4 Sıcaklık dağılımının zamanla değişmesi ile birlikte bir plaka kalınlığında (s), farklı ısı transfer koşullarına bağlı olarak λ/α oranı (Eckstein 1987).

Katı cisimlerdeki ısı transfer koşulları ile sıcaklık alanları arasındaki bağımlılığı açıklamak için, bir levhanın ısıtmasını ele alalım (Şekil 2.4). Isıtmanın başlangıcında ($t=0$), plaka $T_K=0$ sıcaklığına sahiptir ve aniden başlangıç pozisyonunda çevre sıcaklığının T_U olduğu bir fırına aktarılır. Plakanın her iki tarafından eşit miktarda ısı aktarılır. Üçüncü türün sınır koşulları mevcut olduğundan, ısı iletkenliği ile ısı transfer katsayısı (λ/α) arasındaki oran plakanın dışındaki T_U sıcaklığında bir nokta verir. Bu noktayı ve ilgili yüzey sıcaklığını bağlayan düz çizgi, parça yüzeyindeki sıcaklık dağılım eğrisi üzerinde teğettir. Zaman ilerledikçe hem yüzey sıcaklığı hem de plakanın ortasındaki sıcaklık artar. Parçanın içindeki sıcaklık gradyanı farklı λ/α oranları ve zaman içinde değişimler için farklıdır. Parça materyalinin ısı iletkenliği (λ) küçükse veya çevre ile parça yüzeyi arasındaki ısı transferi büyükse, λ/α oranı küçüktür ve ısı yüzey bölgesinde birikir çünkü aktarılan ısı miktarı iletim yoluyla parçanın iç kısmına taşınan ısı miktarından fazladır. λ/α oranı ne kadar küçükse, yüzey sıcaklığı ortam sıcaklığına o kadar hızlı ulaşır. x_1 ve x_2 noktalarındaki ilgili sıcaklık değişimleri ve zaman içinde sıcaklık gradyanındaki değer ve değişimde daha büyüktür. Bu $(\lambda/\alpha)_1$ ile $(\lambda/\alpha)_2$ eğrileri karşılaştırmaları Şekil 2.5'te görülebilir. Isı iletkenliği (λ) büyükse veya ısı transfer katsayısı küçükse, yani ısı yüzeyden cismin çekirdeğine çevreden cismin yüzeyine aktarılandan daha hızlı taşınırsa, λ/α oranı büyük olur ve cismin iç sıcaklığı yüzey sıcaklığından nispeten daha hızlı artar (Eckstein 1987).



Şekil 2.5 Farklı ısı transfer koşulları $(\lambda/\alpha)_1$ ve $(\lambda/\alpha)_2$ olduğunda, şekil 6.4'te gösterilen plaka kesitinde x_1 ve x_2 noktalarındaki plaka sıcaklıklarının ve x_1 noktasındaki sıcaklık gradyanlarının değişimi (Eckstein 1987).

Bu tür ısı transferi problemlerini analiz ederken dikkate alınması gereken diğer faktörler cismin şekli ve kesit boyutudur. İş parçalarının farklı şekillerinin etkisine gelince, sürekli ısı transfer koşulları ve malzemenin sabit termal özellikleri ve çevrenin eşit sıcaklığında, sıcaklık değişimi cismin yüzey-hacim oranına bağlıdır. Oran ne kadar büyükse, zaman içinde sıcaklık değişimi de o kadar büyük olur (Filetin vd. 1992).

2.2 Kristal Kafes Kusurları

Genellikle metal bir kristalin kafes kusurları, mükemmel bir atomik düzenlemeden sapmalar içerir. Bu kusurlar geometrik açıdan aşağıdaki kategorilere ayrılabilir.

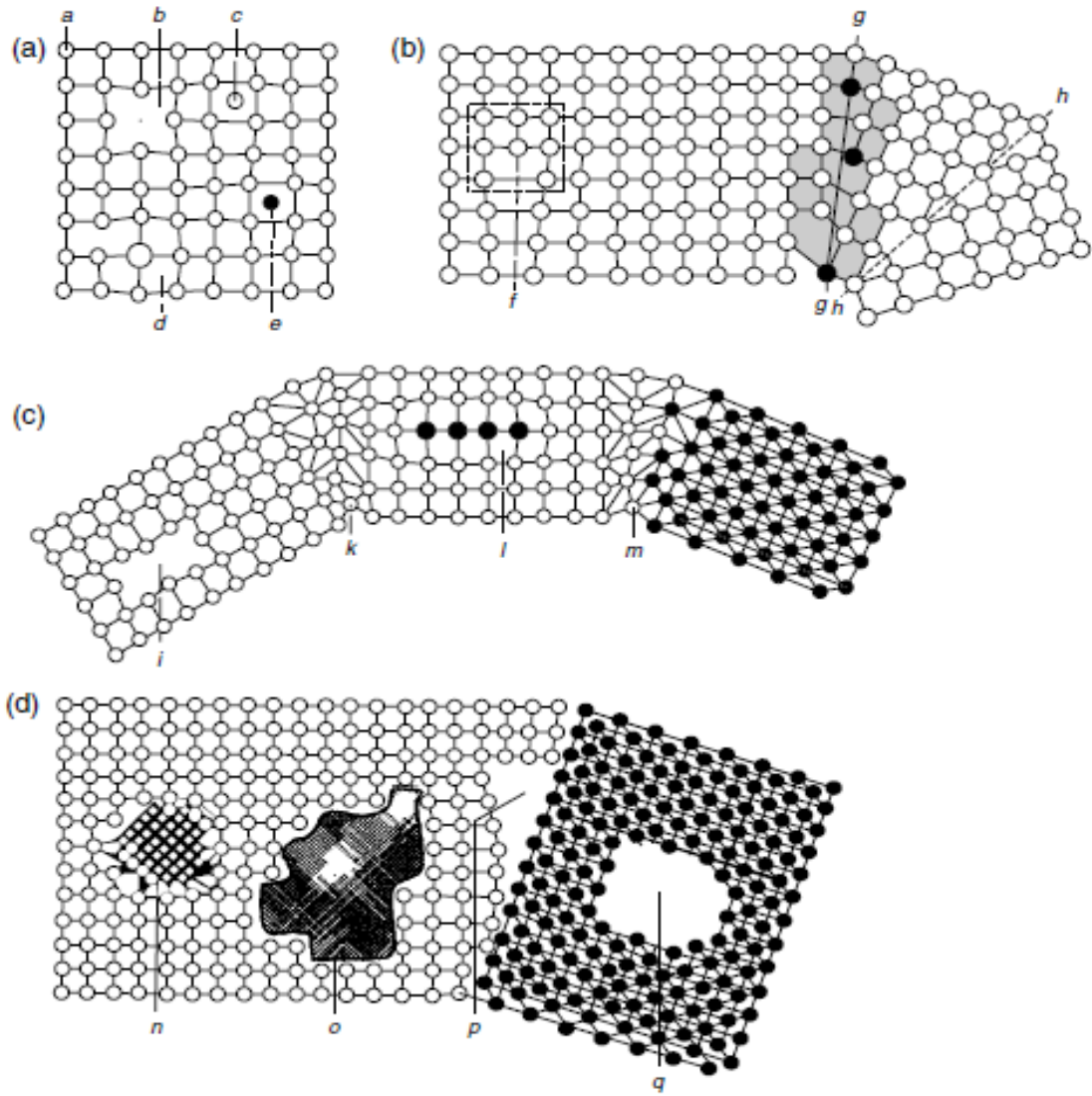
- Sıfır boyutlu veya nokta kusurları
- Tek boyutlu veya doğrusal
- İki boyutlu veya yüzeysel
- Üç boyutlu veya uzaysal

Metallerde meydana gelen en önemli kafes kusurları Şekil 2.6'da şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 2.6a, dört farklı kafes noktası kusuruna sahip bir mekansal kafesin inşa edildiği eşit atomlardan oluşan bir düzlem gösterir. Şekilde b bir atom pozisyonunda eksik atom kusuru boş yer olarak adlandırılır. Atom c kafesteki normal yerler arasında bir yer kaplar ve buna düzlem içi atom denir. Bu durumda c normal atomlarla aynı tür atomdur. Şekilde d pozisyonunda, daha büyük çaplı yabancı bir atom (alaşım elementi) normal bir atomun yerini almıştır; bu nedenle bir yeralan atom denir. Bunun pratik bir örneği demirde çözünmüş bir manganez atomudur. Şekilde e pozisyonunda, kafesin normal atomlarından çok daha küçük bir çapa sahip yabancı bir atom, normal atomlar tarafından işgal edilmemiş bir pozisyonda normal atomlar arasına yerleştirilir. Buna arayer atom denir. Bunun pratik bir örneği demirde çözünmüş bir karbon atomudur. Hem yeralan hem de arayer atomlar kristal kafesin lokal deformasyonlarına ve mikrostresslerine neden olur (Spur ve Stöferle 1987).

Şekil 2.6b, f lineer bir kafes kusurunu gösterir. Seviyelendirilmiş atom düzleminde bir atom dizisi bu noktada sona erer. Özetlenen atomik düzlemi bir kristalin bir kesiti olarak düşünürsek gösterilen düzleme dik olarak uzanır, daha sonra f'de sonlanan atomlar dizisi normal atom düzlemleri arasına yerleştirilmiş atomların yarım düzlemine dönüşür ve kristalin içinde biter. Eklenen atomların yarım düzleminin sınır çizgisi gerilir, gösterilen düzleme dik olarak kenar dislokasyonu adı verilen doğrusal bir kafes hatasıdır. Her kenar dislokasyonu karakteristik deformasyonlar ve kafes mikrostressleri ile bağlantılıdır.

Şekilde g ve h harfleri ile gösterilen kafes kusurları kenar dislokasyonlarıdır. Şekilde g-g çizgisi şematik olarak, biri diğerinin altında düzenli olarak düzenlenmiş kenar dislokasyonları içeren düşük açılı bir tane sınırını temsil eder. Her kenar dislokasyonunun eklenen yarım düzlemi, ilişkili atomda sonlanır ve siyah ile gösterilir. Kesikli alan birbirlerine düşük bir açıyla eğimli kristal kafes komşu parçaları arasında düşük açılı tane sınırı ile bir bölümdür. Şekilde h-h çizgisi eşleştirme sınırını temsil eder. Sınırın her iki tarafında ki atomların simetrik olarak dağılması ve bu nedenle kristal kafesin komşu kısımlarının tamamen eşit olması ve aynadaki yansıması gibi görünmesi ile karakterizedir (Spur ve Stöferle 1987).

Şekil 2.6c, bir grup atomun eksik olduğu yüzeysel bir kusuru (ana hatlı düzlemde) gösterir. Kayıp atomların bu bölgesi boş bir birikim ile gelişmiş olabilir. Ana hatlarıyla dik atomların diğer düzlemlerine kadar uzatılabilir. Şekilde k harfi ile gösterilen kusur, kristal kafesin iki komşu parçası arasında oryantasyonda büyük farklılıklar olan ve kafesin sürekliliğini kesintiye uğratan atomların az ya da çok düzensiz dağılımıdır. Bu durum yüksek açılı tane sınırı veya yalnızca bir tane sınırı olarak adlandırılır. Şekilde l ile belirtilen yüzeysel kusur, gösterilen düzleme dik iki boyutta uzanan garip atomların olduğu bir bölgedir. Şekilde m ile gösterilen bölge iki farklı kafes arasındaki sınır düzlemidir. Bu bölge ise iki boyutlu bir kafes kusurudur (Spur ve Stöferle 1987).



Şekil 2.6 Kafes kusurları. (a) kafes nokta kusurları; (B) doğrusal ve yüzeysel kafes kusurları; (C) yüzeysel kafes kusurları; (d) bölgesel kafes kusurları (Spur ve Stöferle 1987).

Şekil 2.6d şematik olarak karakteristik üç boyutlu kafes kusurlarını gösterir. Birçok metal alaşımlarında, belirli termodinamik koşullar altında taneciklerin kafesi içinde, yapısı değişmiş yeni kafes bölgeleri oluşur. Şekilde n ile gösterilen kafes kusuru çökelti olarak adlandırılır. Şekilde o bölgesinde alaşımların üretimi sırasında yetersiz bir şekilde gelişen bu tür eklemeler metalik olmayan veya intermetalik bileşiklerdir. Şekilde n bölgesinde olduğu gibi o bölgesinin de kendi yapısı ve fazı vardır ve kusuru çevreleyen kafesten bir faz sınırı ile ayrılır. Mikro çatlaklar p bölgesinde gösterilmektedir. Faz sınırına gelen üç kenar çizgisi ile oluşan kusur kafesin düzlemleri arasında oluşturulan bir bölgesel kusurdur. İçi boş, dik veya gösterilen düzleme doğru bir eğimde uzanır. Şekilde q ile gösterilen kristalin kafesi içerisindeki küre benzeri oyuklar mikro gözeneklerdir. Bu tür kusurlar boş pozisyonların veya gazların birikmesinden kaynaklanabilir (Spur ve Stöferle 1987).

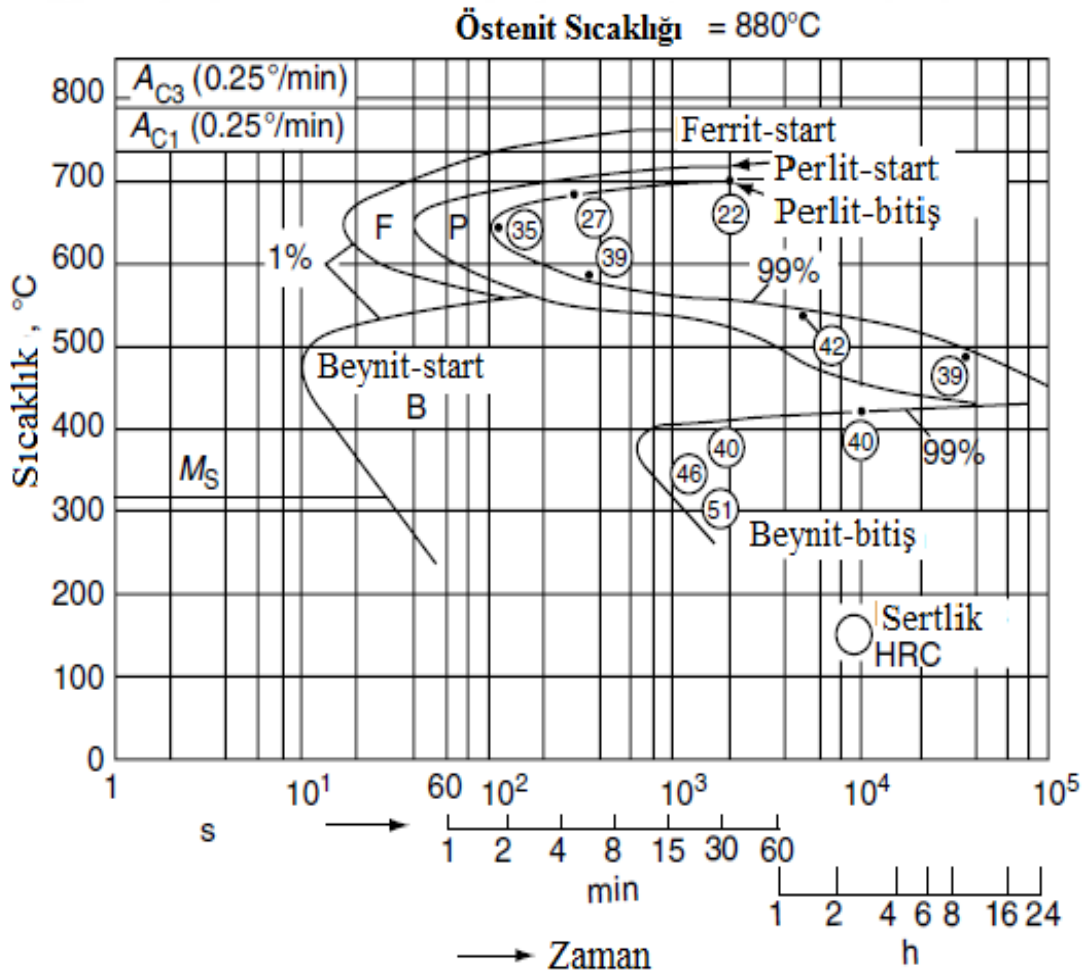
Yukarıda tartışılan tüm kafes kusurları arasında boş yer ve kenar dislokasyonları özellikle metallerin ısıtılmasında önemlidir. Boş yerler, komşu atomları veya alaşım elementlerinin yer alan atomlarını konumlarını değiştirerek difüzyon işlemlerine olanak sağlar. Boş yerler, komşu atomları veya alaşım elementlerinin yer alan atomlarını konumlarını değiştirerek difüzyon işlemlerine olanak sağlar. Kayma kuvvetini düşürerek (atomların aralıklı hareketinin bir sonucu olarak), mükemmel bir demir kristali durumunda karşılaştırıldığında, dislokasyonlar malzemenin plastik deformasyonunu kolaylaştırır.

2.3 Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (ZSD) ve Sürekli Soğutma Dönüşüm (SSD) Diyagramları

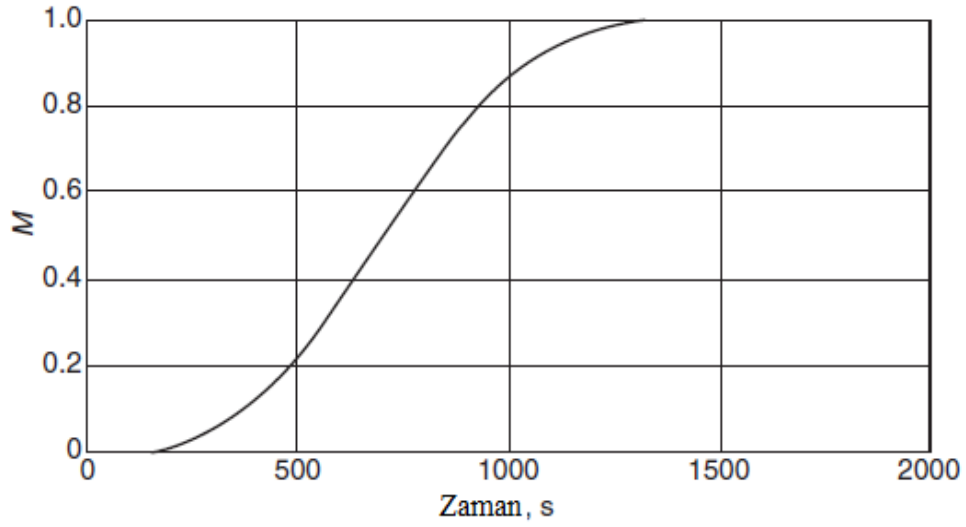
İzotermal dönüşüm (IT diyagram) ve sürekli soğutma dönüşümü (SSD diyagram) için ısıtılma sürecinden sonra mikroyapıyı ve sertliği tahmin etmek veya uygulanacak ısıtılma işlemi belirlemek için zaman-sıcaklık-dönüşüm (ZSD) diyagramları kullanılır. Bunlar istenilen mikroyapı ve sertliği sağlayacak bir süreçtir. Her iki diyagram türünün de kullanımı, kullanıcının belirli özellikleri, olasılıkları ve sınırlamaları hakkında bilgi sahibi olmasını gerektirir.

2.3.1 İzotermal Dönüşüm Diyagramı

Şekil 2.7’de düşük alaşımlı DIN 50CrV4 çeliğinin izotermal dönüşüm diyagramını gösterilmektedir. Zaman-sıcaklık diyagramında konumlandırılmış yapısal fazların ferrit (F), perlit (P) ve beynit (B) dönüşüm bölgeleri, yalnızca östenitleştirici sıcaklıktan seçilen dönüşüme hızlı soğutma ve bu sıcaklıkta tutma koşullarında geçerlidir. Diyagram bu mantık çerçevesinde geliştirilmiştir. Bu nedenle izotermal diyagram yalnızca izotermal eğriler boyunca okunabilir. Ferrit, perlit ve beynit dönüşümlerinin başlangıcı ve bitişi izotermal fonksiyonlara göre gerçekleşir (Rose ve Strassburg 1953).



Şekil 2.7 DIN 50CrV4 çelik izotermal dönüşüm (IT) diyagramı (Rose ve Strassburg 1953).



Şekil 2.8 Denklem 2.15'e göre, IT diyagramlarında dönüştürülmüş yapı (M) miktarı ile zaman arasındaki ilişki (Hougardy 1978).

$$M = 1 - \exp(-bt^n) \quad (2.15)$$

Yukarıdaki denklemde,

M = Dönüştürülmüş yapı

t = Zaman (s)

$b = 2 \times 10^{-9}$

$n = 3$

Şekil 2.8'de gösterildiği gibi, bu fonksiyon çok düz olarak başlar ve biter. Dönüşümün gerçek başlangıcını ve sonunu tam olarak belirlemek zordur. Bu nedenle, dönüşümün başlangıcını işaretleyen eğrinin ilgili fazın %1'ini ve dönüşümün sonunu işaret eden eğrinin dönüştürülmüş östenitin %99'unu işaret ettiği anlaşılır.

Sadece martenzit oluşumu, M_s noktasının altındaki sıcaklığa bağlı olarak anında soğutma ile difüzyon olmadan gerçekleşir. Hougardy (1978) bu dönüşüm için verdiği formül (sertleşme ve temperleme işlemi uygulanmış yapısal çelikler için geçerli) denklem 2.16'da gösterilmiştir:

$$M_a = 1 - 0.929 \exp[-0.976 \times 10^{-2} (M_s - T)^{1.07}] \quad (2.16)$$

Yukarıdaki denklemde,

M_a = Martenzit miktarı (%)

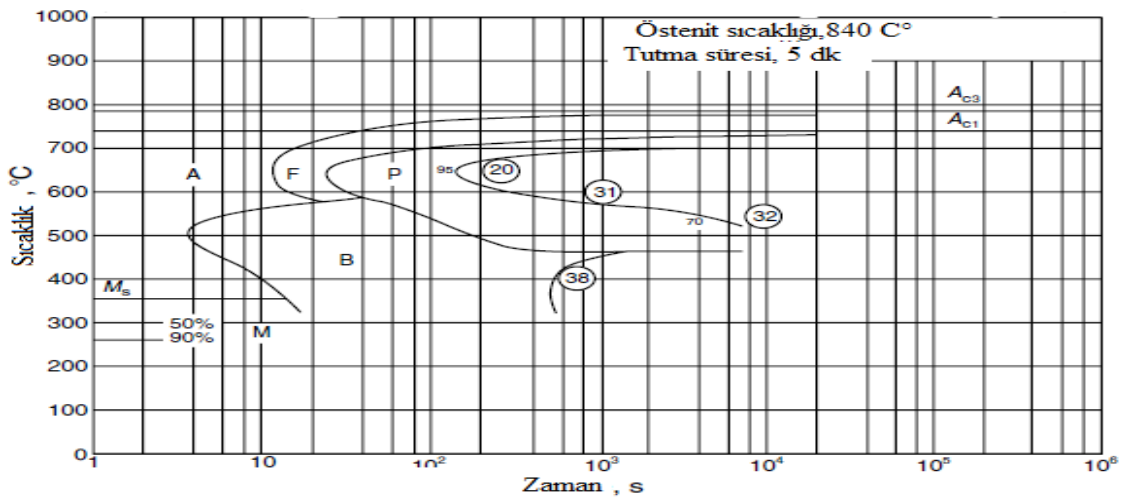
M_s = Martenzit başlangıç sıcaklığı (°C)

T = Martenzit başlangıç sıcaklığı altındaki bir sıcaklık (°C)

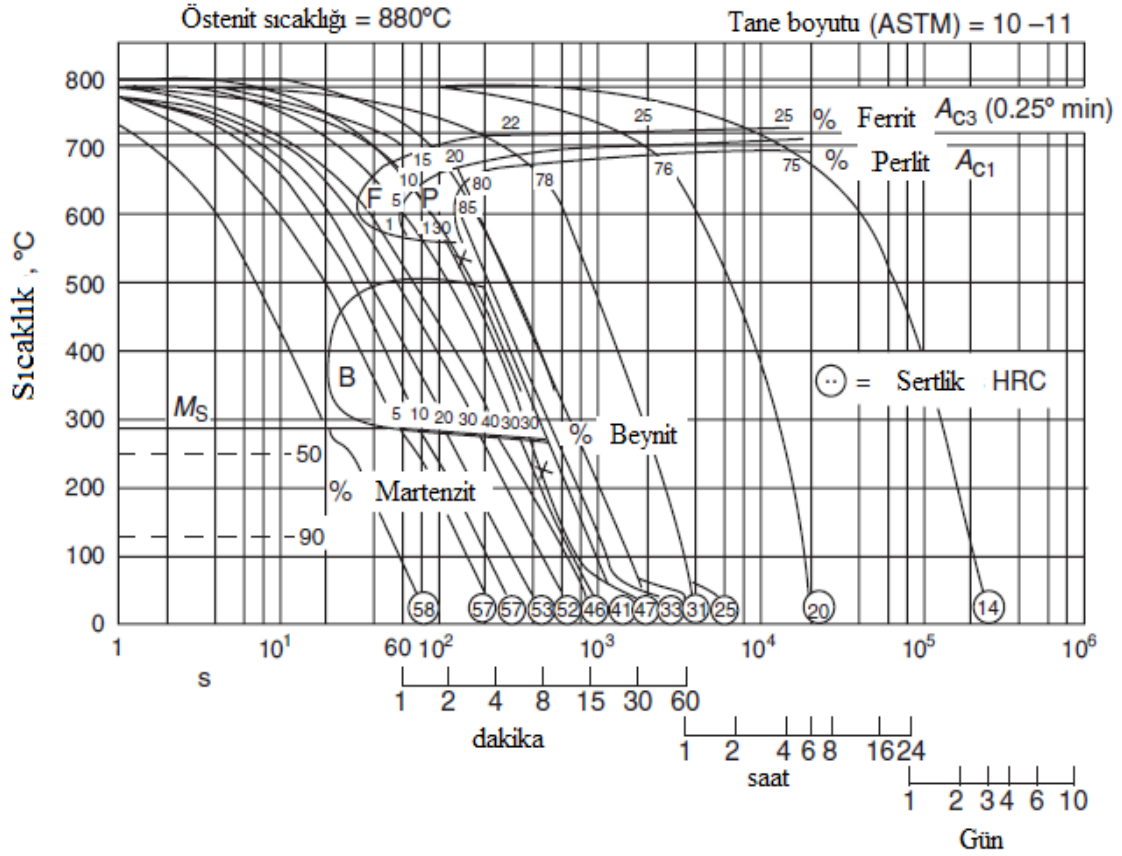
Bazı IT diyagramları, izoterm eğriler boyunca okunduğunda, kullanıcının dönüştürülmüş fazların yüzdelerini ve elde edilen sertliği belirlemesini sağlar. Örneğin Şekil 2.9'da, DIN 41Cr4 çeliğinin 840 °C'de 5 dakika bekletme ile östenitleştirildiği zaman hızlı bir şekilde 650 °C'ye soğutulup 12 sn bu sıcaklıkta bekletilmesi sonucu ferrit oluşumu başlamıştır. 30 sn sonra ise perlit oluşumu başlar. 160 sn sonunda dönüşüm %5 ferrit ve %95 perlit biçiminde oluşmaktadır. Elde edilen sertlik değeri yaklaşık 20 HRC'dir. Aynı çelikten başka bir numune 300 °C'ye ani olarak soğutulursa, %50 martenzit oluşacaktır.

2.3.2 Sürekli Soğutma Dönüşüm (S-S-D) Diyagramı

Şekil 2.9, düşük alaşımlı DIN 50CrV4 çeliğinin aynı sıcaklıkta SSD diyagramını göstermektedir.



Şekil 2.9 DIN 41Cr4 çelik izotermal dönüşüm (IT) diyagramı (Hougardy 1978).



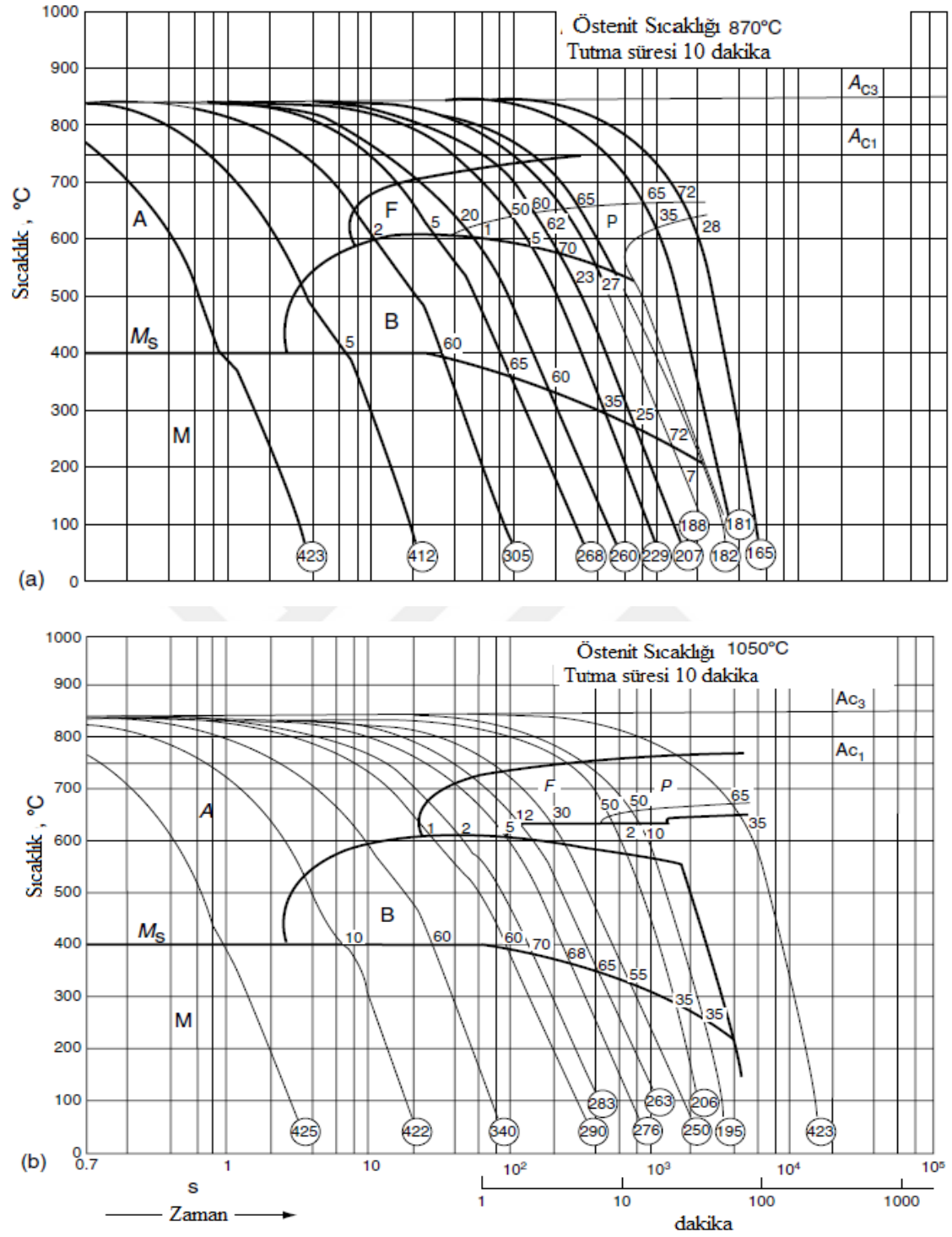
Şekil 2.10 DIN 50CrV4 çeliği sürekli soğutma dönüşüm (SSD) diyagramı (Rose 1953).

SSD ve IT diyagramlarında dönüşümün başlangıcı için eğrileri karşılaştırırken aynı sıcaklık ve çelik kalitesinde (Şekil 2.7 ve Şekil 2.10), SSD diyagramında eğrilerin biraz daha uzun ve daha düşük sıcaklıklara kaydığı görülmektedir. Örneğin, Şekil 2.7'nin IT diyagramında, ferritin dönüşümüne başlamak için en kısa süre 650 °C'de 16 sn ve beynit için karşılık gelen süre 480 °C'de 9 sn'dir. Şekil 2.10'daki SSD diyagramında ise ferrit için en kısa dönüşüm başlangıç süresi 620 °C'de 32 sn, beynit için karşılık gelen süre 380 °C'de 20 sn'dir. Bu durum, SSD işlemlerinde dönüşümün IT süreçlerinden daha geç başladığını gösterir. Bu olgunun temeli bekletme süresi ile ilgilidir (Rose ve Strassburg 1953).

Ayrıca, daha yüksek östenitleştirici sıcaklık ile belirli bir fazın dönüşümün başlangıcını gösteren eğrilerin daha uzun sürelerle kaydırılabildiği de unutulmamalıdır. Şekil 2.11'de 870 °C'de (a) ve 1050 °C'de (b) östenite edildikten sonra DIN 16MnCr5 çeliğinin SSD diyagramı gösterilmektedir. İkinci durumda, ferrit ve perlit bölgelerinin diyagramın sağına doğru yönlendiği görülmektedir (Wever ve Rose 1954, 1956, 1958).

Bir SSD diyagramı aşağıdaki şekilde geliştirilmiştir (Şekil 2.11). Birçok küçük numune (örneğin, 4 mm çap x 2 mm yüksek soğutma hızları için, 4,5 mm çap x 15 mm orta ve düşük soğutma hızları için) östenitlenir. Her soğutma eğrisi ile ilgili fazların dönüşümünün başlangıcı ve bitişi kaydedilmiş ve bu noktalar, ilgili aşamalar için dönüşüm bölgelerini elde etmek için kullanılır (Şekil 2.10). Bu nedenle, bir SSD diyagramı yalnızca geliştirildiği şekilde yani soğutma eğrileri boyunca okunabilir. Şekil 2.10'da da görüleceği gibi, tek fazlı bir yapı sadece çok yüksek soğutma hızı (martenzit) ve çok yavaş soğutma hızı (perlit) durumlarında ortaya çıkar. Diğer tüm soğutma işlemlerinde daha yapısal fazların karışımı meydana gelir. Oluşan bu farklı yapılar içerisinde ki fazların yüzde oranları soğutma eğrileri boyunca belirlenebilir (genellikle Alman menşeli SSD diyagramlarında belirtilmiştir). Her soğutma eğrisinin sonunda ki sayılar, soğutma sonrası elde edilen sertliği gösterir (genellikle HRC (iki basamaklı sayılar) veya HV (üç basamaklı sayılar)). Örneğin, Şekil 2.10'da gösterildiği gibi DIN 50CrV4 kalite çelik, eğer soğutma x ile işaretlenmiş oranda ilerlerse, oda sıcaklığına soğutulması sonucunda yapıda %10 ferrit, %30 perlit, %30 beynit ve %30 martenzit karışımı oluşur. Su verme sonrası sertlik 47 HRC olacaktır.

Bazen bir SSD diyagramı, soğutma işleminden sonra her yapısal fazın bölümlerini ve sertliği gösteren bir diyagramla desteklenebilir. Soğutma sonrası yapısal fazların ve sertliğin bölümlerini belirlemek, 500 °C izoterm ile kesişme noktasına kadar ilgili soğutma eğrisini takip etmeli ve bu noktadan aşağıya dikey çizgi boyunca faz kısımları ve sertlik okunmalıdır. Örneğin, 500 °C izoterm 135 sn ile kesişen soğutma eğrisi için oluşan fazlar %4 ferrit, %7 perlit, %78 beynit ve %11 martenzit ve sertlik değeri ise 34 HRC'dir. Hazırlanan her SSD diyagramının kullanılan bir çeliğin sıcaklığının geçerli olduğu unutulmamalıdır. Örnek olarak, aynı kalitedeki çeliğin farklı sıcaklıklarıyla (farklı bileşimlere sahip) ilgili SSD diyagramındaki dönüşüm eğrilerinin konumu üzerindeki etkisi Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



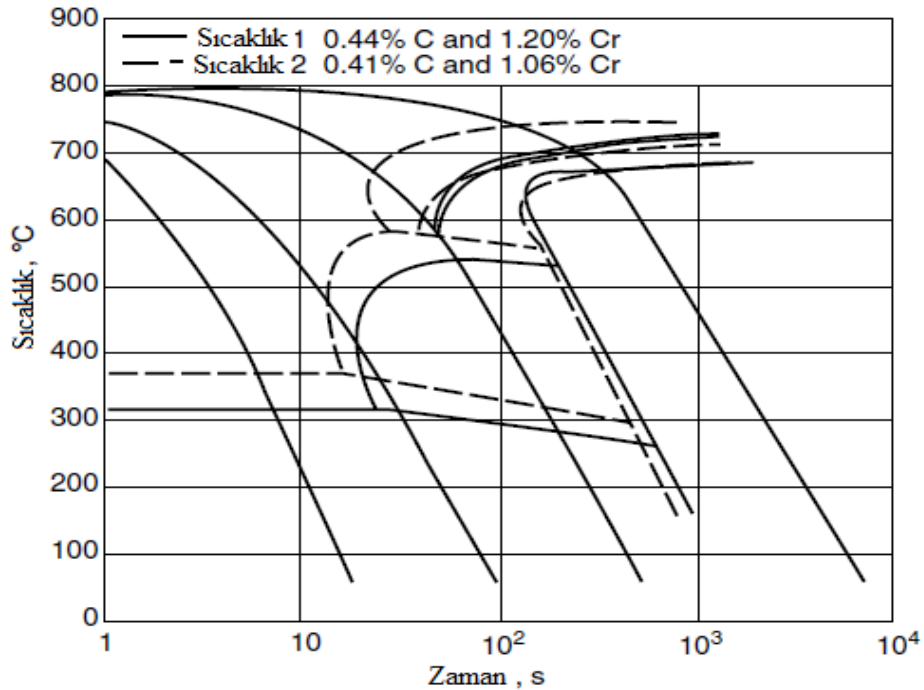
Şekil 2.11 DIN 16MnCr5 çelik 850 °C (a), 1050 °C (b) östenit sıcaklığında ZSD diyagramı (Wever ve Rose 1954, 1956, 1958).

IT diyagramları için, Hougardy (1978) e göre bir SDD diyagramının doğruluğu, izotermelerin pozisyonuna göre ± 10 °C ve zaman koordinatlarına göre ilgili zamanın $\pm \%10$ 'u kadardır.

2.3.3 IT ve SSD Diyagramlarını Kullanılabileceği Isıl İşlem Prosesleri

IT ve SSD diyagramlarının nasıl okunabileceği hakkında önceki bölümde açıklanan bilgiler dikkate alınarak, Şekil 2.13 sadece IT diyagramlarının kullanılabileceği izotermal ısıtım süreçlerini göstermektedir. Bunlardan ilki, daha iyi işlenebilirlik açısından kaba bir ferritik-perlitik yapı elde etmek için izotermal tavlama (Şekil 2.13a). Bu durumda IT şeması, dönüşümü tam olarak sağlamak için tavlamanın gerçekleştirilmesi gereken optimum sıcaklığın mümkün olan en kısa sürede gerçekleştirilmesi için önemli bilgiler verir (Thelning 1984).

İkinci proses ise, izotermal bir dönüşüm olan beynit yani östempereleme işlemidir (Şekil 2.13b). Bu durumda, IT diyagramı her şeyden önce söz konusu çeliğin bu işlem için geçerli olduğunu tespit etmek adına, yani yeterli sertleşebilirliğe sahip olduğunu belirlemek için kullanılır (bu da dönüşüm eğrilerinin başlangıcının düşey eksene çok yakın olmadığı anlamına gelir). Bu durum yerine getirildiği takdirde, diyagram ısıtım işlemcinin istenilen sertliğe göre uygun sıcaklığı seçmesini ve beynit tam dönüşüm elde etmek için bu sıcaklıkta gereken minimum süreyi okumasını sağlar.

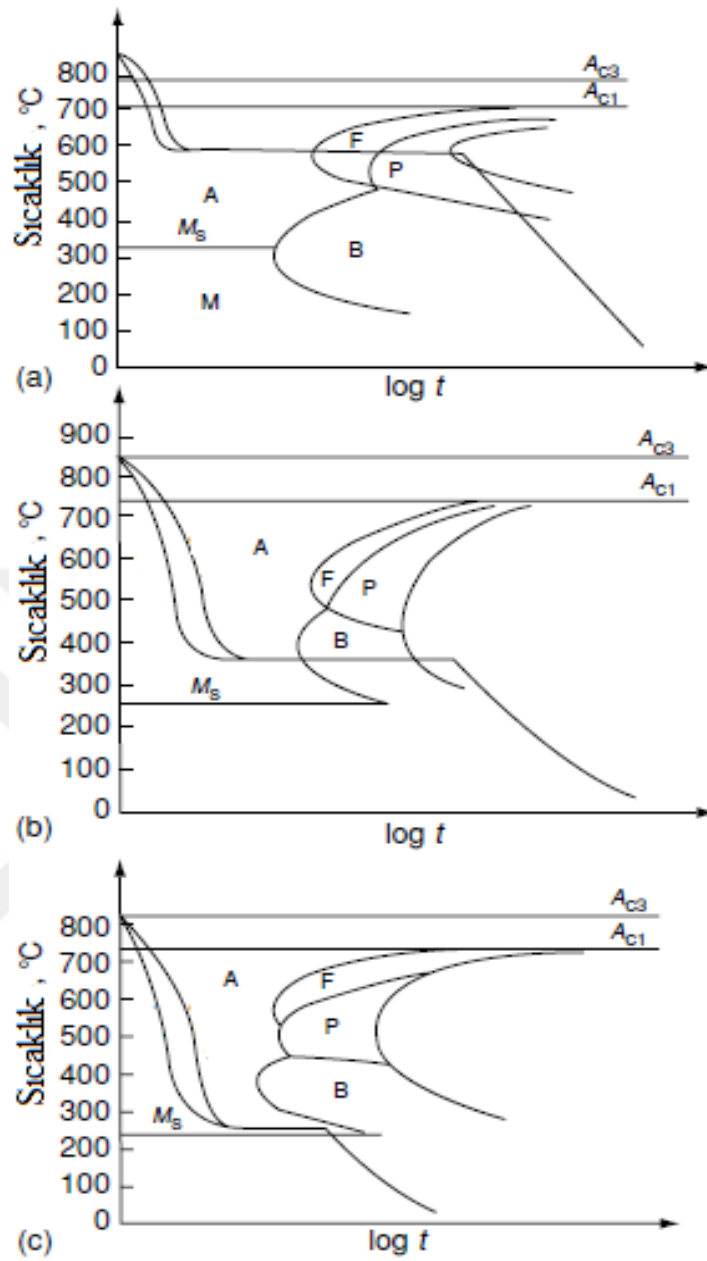


Şekil 2.12 DIN 41Cr4 çeliğin iki sıcaklık arasındaki bileşim farkının, ilgili SSD diyagramındaki dönüşüm eğrilerinin konumu üzerindeki etkisi (Hougardy 1978).

Üçüncü işlem martemperleme işlemidir (Şekil 2.13c). Martemperleme işlemi martenzit yapıyı minimum gerilme ve çarpılma ile elde etmek için ısıtma işlemi uygulanacak parçanın belirlenen sıcaklıkta hazırlanan banyo içerisine daldırılarak hem yüzeyin hem de merkezin aynı sıcaklığa ulaşmasının ardından martenzit bitiş sıcaklığının altına soğutulmasıdır. Bir çeliğin martemperleme işlemi için uygulanabilirliği yukarıdaki gibi kontrol edilebilir. Bu durumda diyagram hazırlanacak sıcak banyonun gerekli sıcaklığı ve bu sıcaklıkta bekletilmesi gereken maksimum süre (sadece martenzit elde etmek için) hakkında bilgi verir. Örnek olarak Şekil 2.14 yalnızca bir SSD diyagramının kullanılabildiği sadece üç sürekli soğutma durumunu gösterir. İlk durum (Şekil 2.14a), tam martenzitik yapı elde etmek için doğrudan su verme işlemidir. Bu durumda, diyagram kullanıcının söz konusu çeliğin kritik soğutma hızını belirlemesini sağlar. İkinci durum (Şekil 2.14b) sürekli yavaş soğutma işlemidir. Örneğin normalleştirme tavlamasından sonra havada soğutma işlemidir. Bu durumda, diyagram kullanıcının ferritik-perlitik yapının istenen sertliğini oda sıcaklığında elde etmek için gerekli soğutma hızını seçmesini sağlar. Üçüncü durum (Şekil 2.14c), ikiden fazla yapısal evreyle sonuçlanan herhangi bir sürekli soğutma evrelerini temsil eder. Bu durumlardan herhangi birinde diyagram, kullanıcının her fazın bölümünü ve soğutma işleminden sonra ki sertliği belirlemesini sağlar (Thelning 1984).

2.3.4 İş Parçalarını Soğutma İşleminde Yapısal Bileşenleri ve Sertliği Tahmin Etmek İçin SSD Diyagramının Kullanımı

Her SSD diyagramı, ısıtma işlemi uygulanacak numunelerin soğutma eğrileri boyunca meydana gelen yapının dönüşümlerini açıklar. Bu durum, bir SSD diyagramının yalnızca uygulandığı soğutma koşulları için geçerli olduğu anlamına gelir. SSD diyagramının oluşturulmasında kullanılan küçük çaplı ve küçük hacimli numuneler için soğutma yasası, Rose ve Strassburg (1953) a göre üstel fonksiyon ile tanımlanabilir. Bu fonksiyon denklem 2.17’de gösterilmiştir.



Şekil 2.13 Sadece IT diyagramlarının kullanılabildiği izotermal ısıtım süreçleri. (a) İzotermal tavlama; (b) östempereleme; (c) martemperleme (Thelning 1984).

$$T = T_0 e^{-\alpha t} \quad (2.17)$$

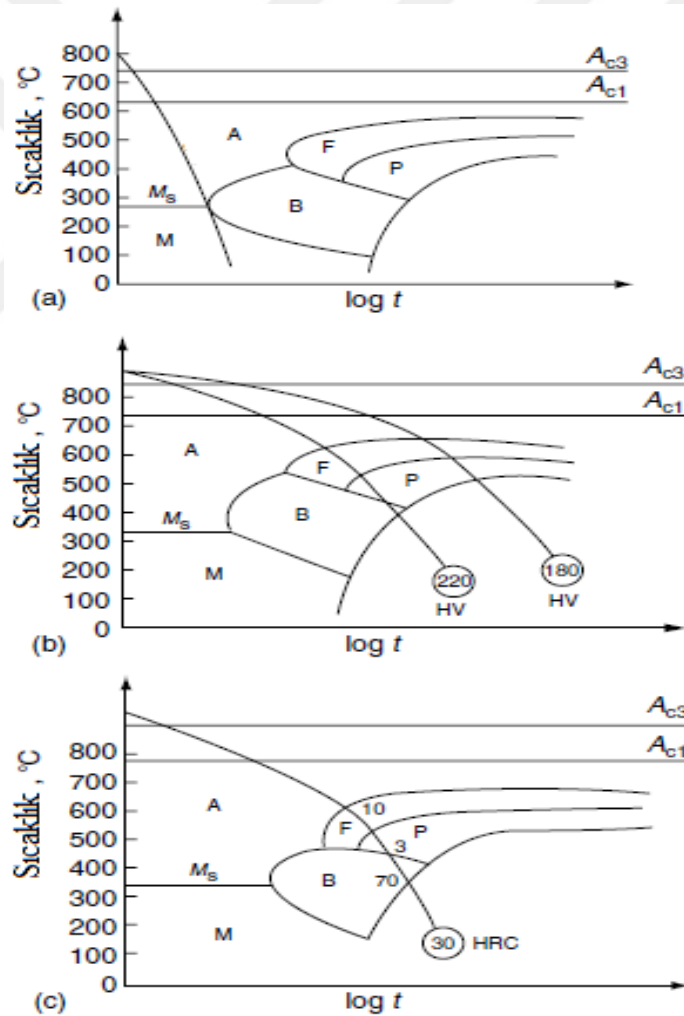
Yukarıdaki denklemde,

T_0 = Östenitleme sıcaklığı (°C)

α = Isı transfer katsayısı

t = Zaman (s)

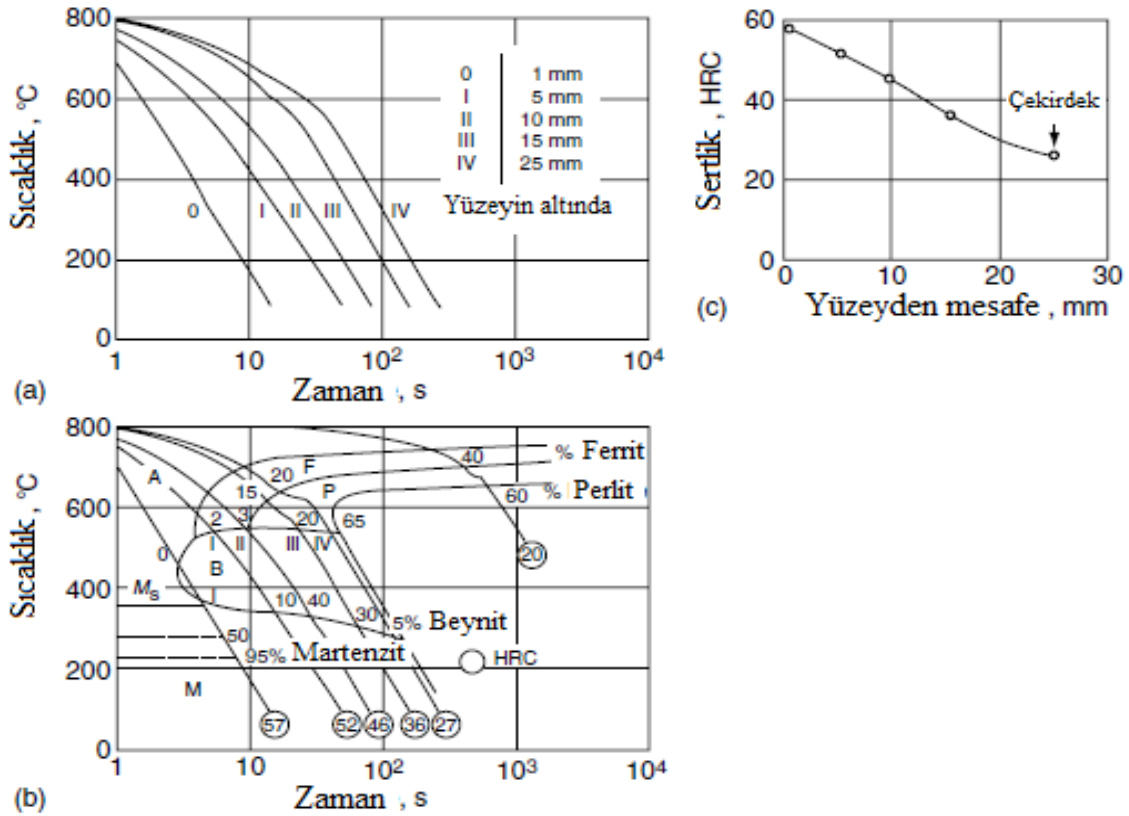
Su verme işlemi sonrası yapısal bileşenlerin (fazlar) ve sertlik değerlerinin tahmini, gerçek iş parçalarının kesitinde farklı noktalarda ki soğutma yasaının, sürekli soğutma işleminin ardından SSD diyagramında çizilen eğrilere ne kadar uyduğuna bağlıdır. Yüzeyin 1, 5, 10, 15 ve 25 mm altına yerleştirilen 30 mm çapındaki yuvarlak çubuklar kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar, yuvarlak çubuğun kesitinin farklı noktalarındaki soğutma eğrilerinin SSD diyagramlarında yer alan soğutma eğrilerine karşılık geldiğini gösterdi (Rose and Strassburg 1953). Yapısal dönüşüm, yani ortaya çıkan yapısal bileşenler ve sertlik değerleri karşılaştırılabilir. Şekil 2.15 bu karşılaştırmalar kullanılarak sertlik dağılımının nasıl tahmin edilebildiğini göstermektedir.



Şekil 2.14 Sadece SSD diyagramlarının kullanılabileceği sürekli soğutma ısıl işlem süreçleri. (a) Tam martenzitik yapı elde etmek için doğrudan söndürme; (b) gerekli sertlikte bir ferrit– perlit yapısı elde etmek için yavaş soğutma; (c) karışık bir yapının elde edildiği sürekli soğutma rejimi (Thelning 1984).

Ölçülen soğutma eğrilerinin sıcaklık-zaman ölçekleri ve SSD diyagramı aynıysa (Şekil 2.15a ve Şekil 2.15b'de olduğu gibi), saydam bir kağıt yaprağı kullanılarak farklı çelik sınıflarının SSD diyagramlarında ölçülen soğutma eğrileri üst üste konulur ve bu şekilde istenen yapı ve sertliği geliştirecek çelik sınıfı seçilebilir. İş parçasının kesitinin yarıçapı arttıkça, bir SSD diyagramından bu tür bir tahminin doğruluğu azalır. Peter ve Hassdenteufel (1967) e göre, yağda soğutma işlemi yaparken çapı 100 mm'ye kadar olan yuvarlak çubuklar ve suda soğutma işlemi yaparken çapı 150 mm'ye kadar olan yuvarlak çubuklar için SSD diyagramları kullanılarak yeterince kesin tahminler yapmak mümkündür (Thelning 1984).

Soğutma üzerine yapısal bileşenlerin ve sertliğin tahmini için SSD diyagramlarının pratik kullanımındaki temel sorunun, iş parçasının kesitinde belirtilen nokta için tam olarak soğutma eğrisinin oluşturulamaması olduğu anlaşılmaktadır.



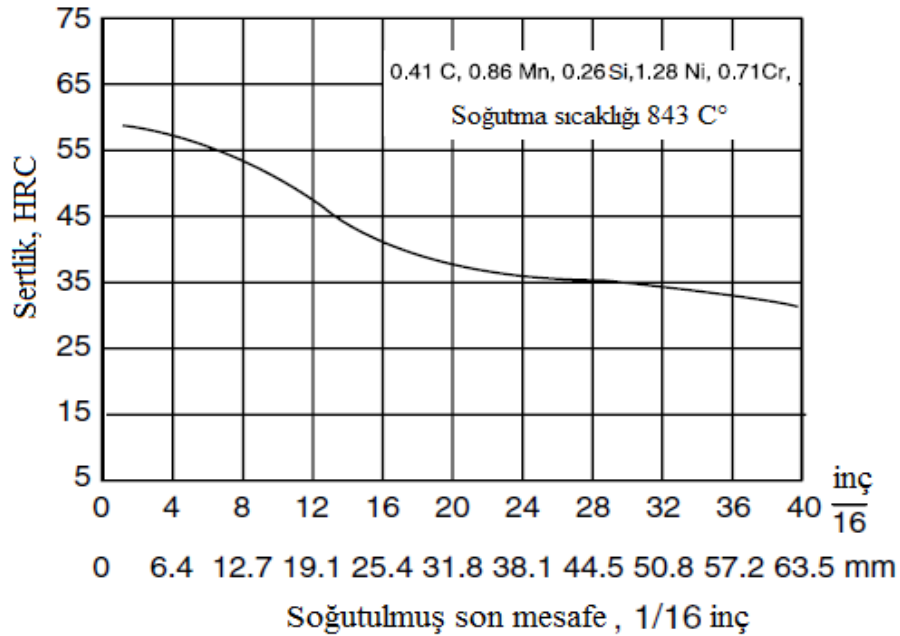
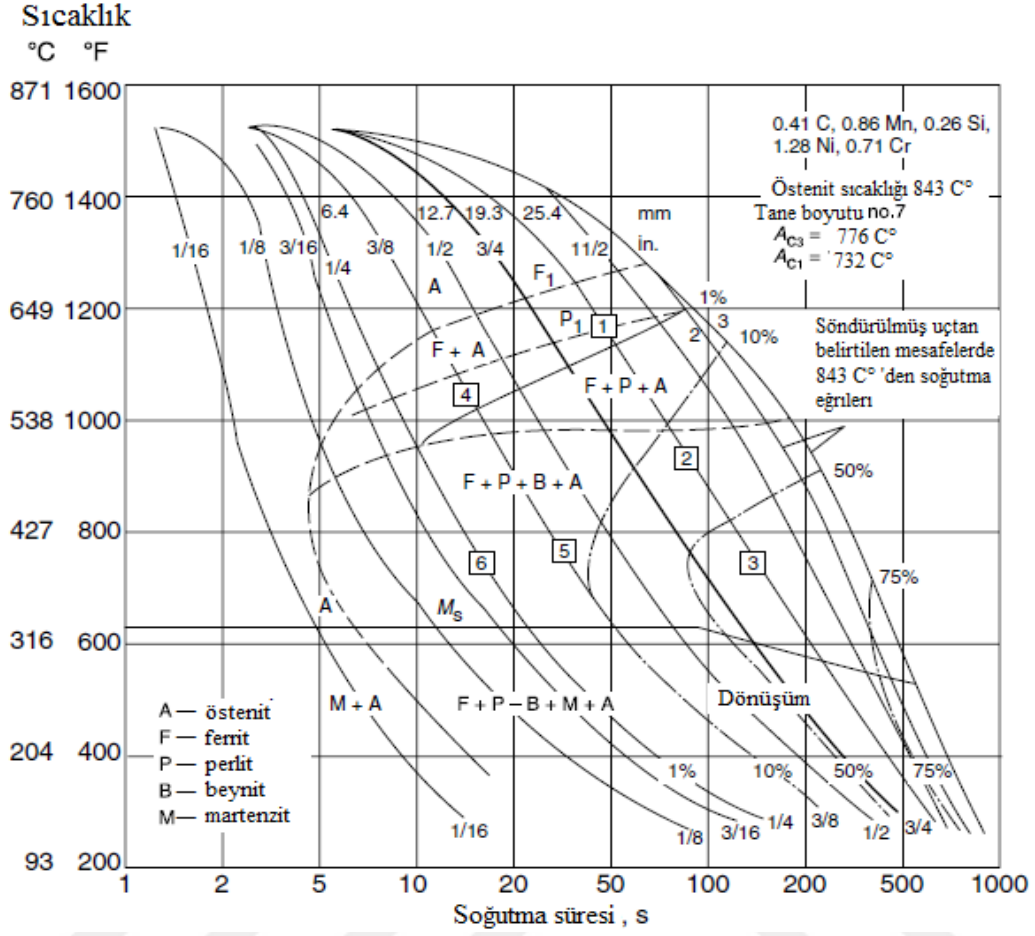
Şekil 2.15 Yuvarlak çubuk kesitinde sertlik dağılımının tahmini. (a) Soğutma eğrileri, belirtildiği gibi yüzeyin altında farklı noktalarda ölçülür. (b) (a)'dan üst üste bindirilmiş soğutma eğrileri ile ilgili çeliğin SSD şeması. (c) Soğutma üzerine çubuk kesitindeki sertlik dağılımı, (b)'den sertlik değerleri okunarak elde edilir (Thelning 1984).

Bu hesaplama ile (simetrik parçalar ve bir boyutlu ısı akışı söz konusu olduğunda ve sınır koşulları biliniyorsa) veya deneysel olarak (asimetrik parçalar için) bir termo element ile sıcaklık–zaman geçmişini ölçerek yapılabilir. Gerçek iş parçalarının soğutma eğrileri ile SSD diyagramlarında çizilen soğutma eğrileri arasındaki ilişkiler, yapının metalografik analizine ve soğutma sonrası ölçülen sertliğe dayalı olarak herhangi bir şekil ve boyutta bir iş parçasının kesitinin belirli bir noktasında soğutma eğrileri hakkında sonuç çıkarmayı da sağlar.

SSD diyagramları (Amerikan menşeli) kullanıldığında, yapısal bileşenleri ve sertliği tahmin etme şekli biraz farklıdır. Örneğin, Şekil 2.16'da genleşme soğutma eğrileri yerine, Jominy test numunesinin soğutulmuş ucundan farklı mesafelerde alınan soğutma eğrileri üst üste getirilir.

Eğer uygulayıcı bu soğutma eğrilerinden birini takip ederse, örneğin Jominy deneyi uygulanan AISI 3140 çeliğinin su verilmiş uçtan 19,1 mm'lik alanda (diyagramdaki belirgin çizgi) 25 sn soğutmadan sonra ferrit fazının, 30 sn sonra perlit ve 45 sn sonra beynit fazlarının oluşmaya başladığını görebilir. Deney parçası 90 sn soğutulduktan sonra östenitin %50'si zaten dönüştürülür. 140 sn sonra, bu noktada sıcaklık 315 °C'ye düştüğünde martenzit oluşumu başlar (Thelning 1984).

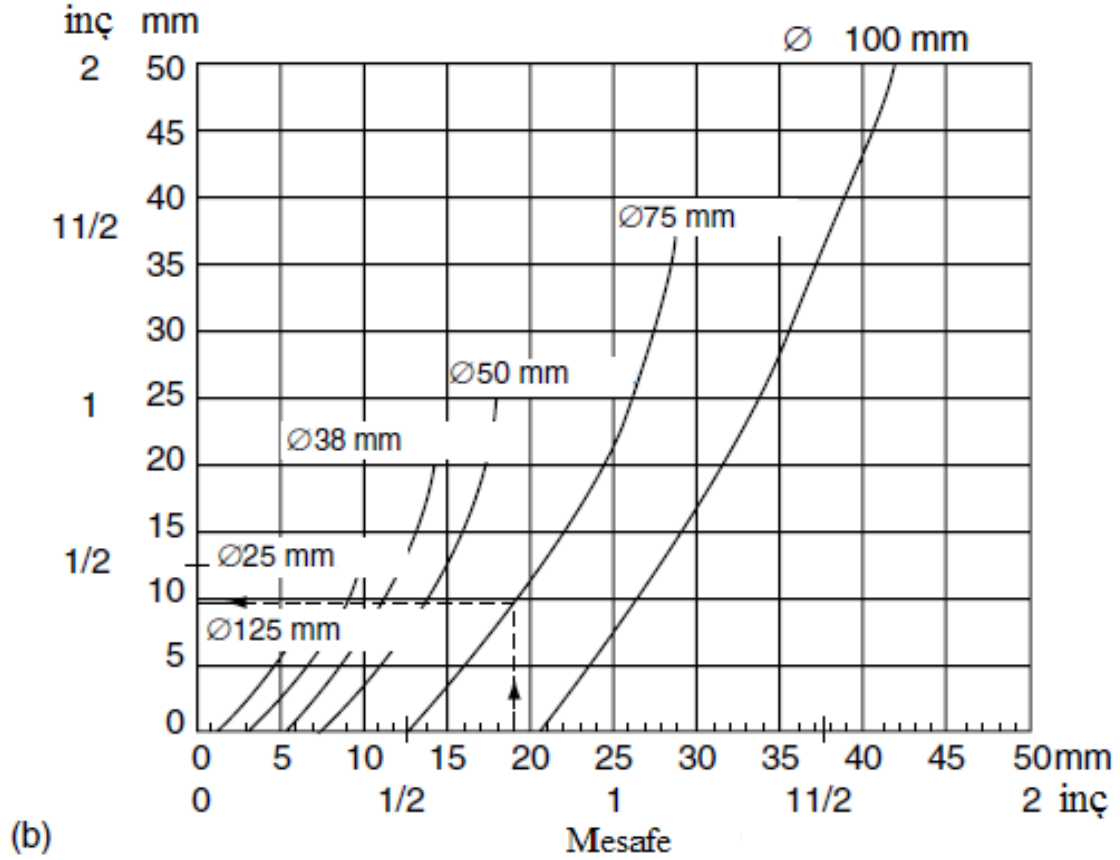
Şekil 2.16a'nın altındaki ilgili Jominy eğrisi, söz konusu çelikle olan bu soğutma eğrisinin 48 HRC sertliğe ulaşacağını göstermektedir. Bu sertliği yuvarlak çubukların farklı çaplardaki kesitlerinin farklı noktalarıyla ilişkilendirmek için, Şekil 2.16b'de gösterildiği gibi yardımcı bir diyagram (bu durum sadece orta derecede karıştırılarak yağda su verme için geçerlidir) kullanılmalıdır. Bu diyagramdan, 75 mm çapında yuvarlak bir çubuğun yüzeyinin 9 mm altında, orta derecede çalkalanmış yağda soğutulduktan sonra 48 HRC sertliğe ulaşacağını görebilirsiniz.



(a)

Şekil 2.16 (a) AISI 3410 için SSD diyagramı ve Jominy sertleşebilirlik eğrisi. (b) Farklı Jominy mesafelerinde soğutma oranı ile 12,5–100 mm çapında yuvarlak çubukların orta derecede çalkalanmış yağda soğutma oranı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (Thelning 1984).

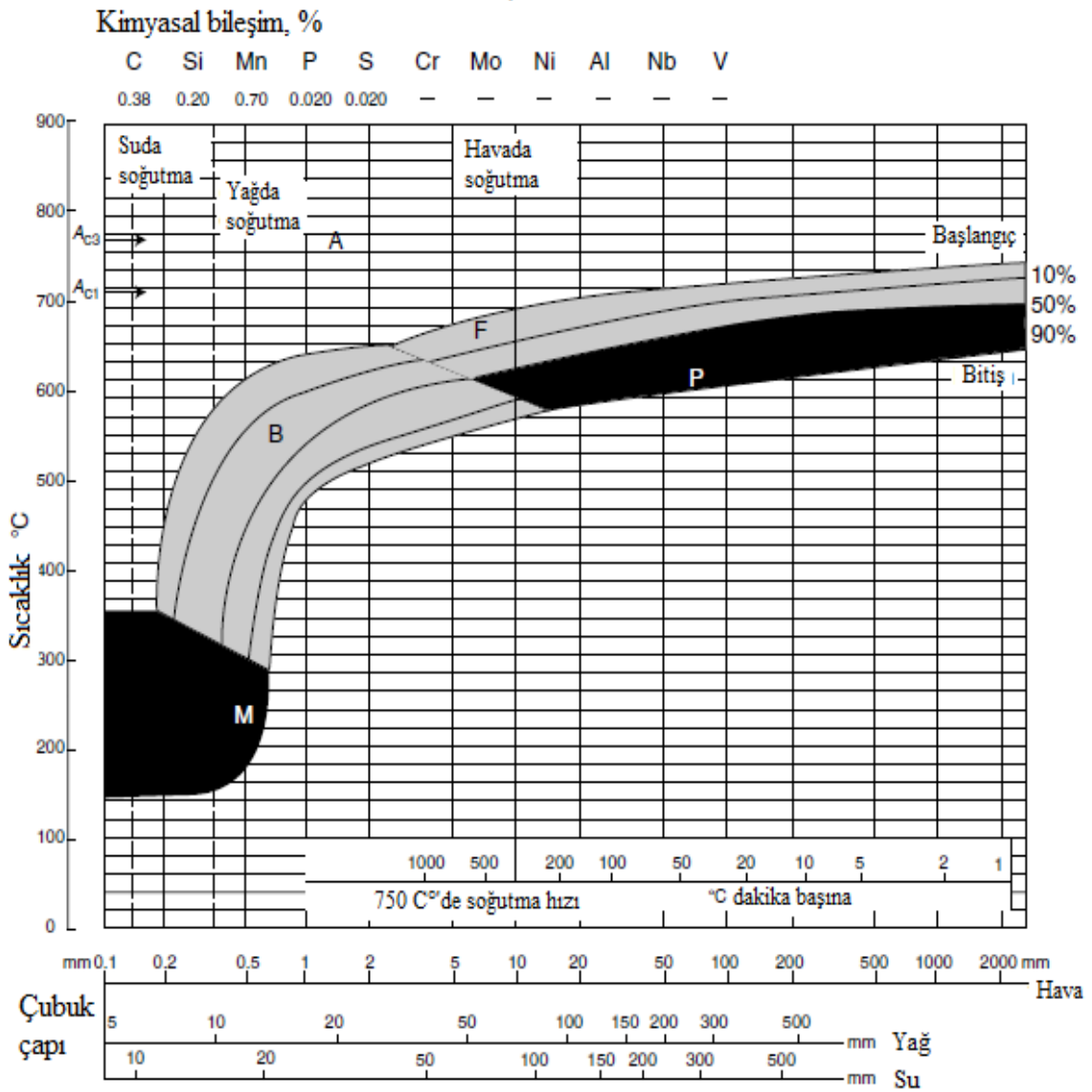
Çubuk yüzeyinin
altındaki mesafe



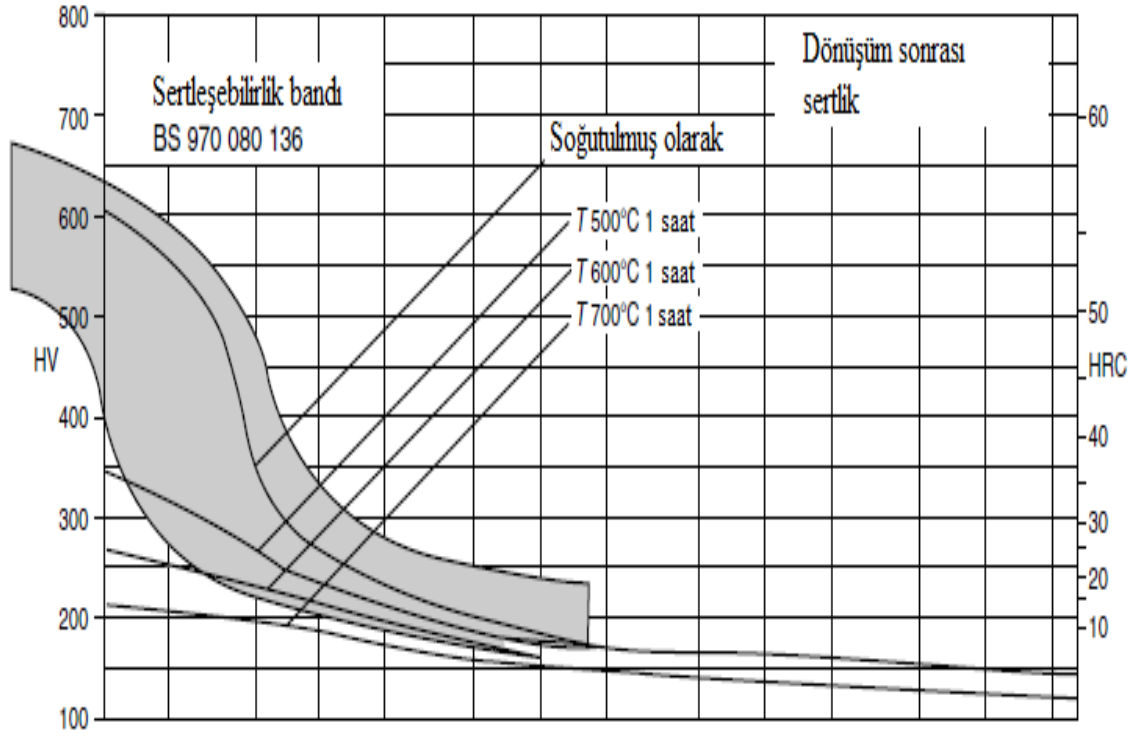
Şekil 2.16 (Devam) (a) AISI 3410 için SSD diyagramı ve Jominy sertleşebilirlik eğrisi. (b) farklı Jominy mesafelerinde soğutma oranı ile 12,5–100 mm çapında yuvarlak çubukların orta derecede çalkalanmış yağda soğutma oranı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (Thelning 1984).

Ayrıca Atkins (1977) tarafından geliştirilen, başka türden SSD diyagramları vardır (Şekil 2.17). Bu diyagramlar hava, yağ ve suda farklı çaplardaki yuvarlak çubukların soğutulması, çubuğun merkezindeki soğutma eğrilerinin kaydedilmesi ve daha sonra dönüşüm sıcaklıklarını, mikroyapıları ve sertliği tanımlamak için bu soğutma eğrilerini dilatometrik (numunenin sıcaklığın ya da zamanın bir fonksiyonu olarak boyut ölçülerindeki değişimini ölçen bir test yöntemi) bir testte simüle ederek geliştirilmiştir. Bu nedenle, bu diyagramlar yalnızca bir çubuğun merkezindeki ölçümlere göre belirlenir. Yatay eksen üzerinde bir zaman ölçeği yerine, bu diyagramlar havada, yağda ve suda soğutulmuş çubuk çaplarını gösteren üç paralel ölçeğe sahiptir (Thelning 1984).

Bu diyagramlar sadece farklı soğutma oranlarını gösteren dikey çizgiler boyunca (yukarıdan aşağıya) okunmalıdır. Örneğin, söz konusu 10 mm'lik çelik çubukta havada soğutma sonrasında oluşan mikroyapıyı ve sertliği belirlemek için, diyagramda 10 mm çapında dikey çizgi östenit bölgesinde başlar ve aşağı doğru ilerler. Bu durumda dönüşüm (%0,38 C ile alaşımsız çelik sınıfı) 700 °C'de ferrit fazının oluşması ile başlar ve dönüşümün %50'si tamamlandıktan sonra 640 °C'de perlit fazı oluşumu başlar. 580 °C'de, dönüşüm tamamlanmadan önce az miktarda beynit fazı oluşur.



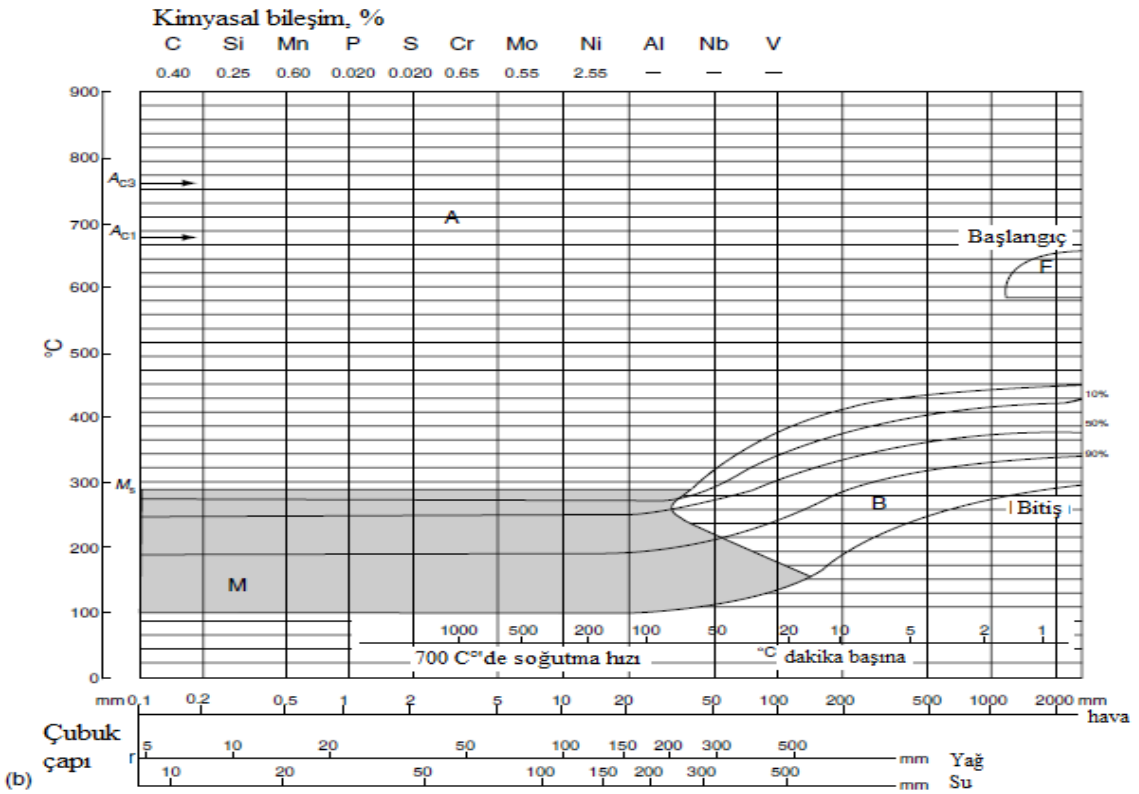
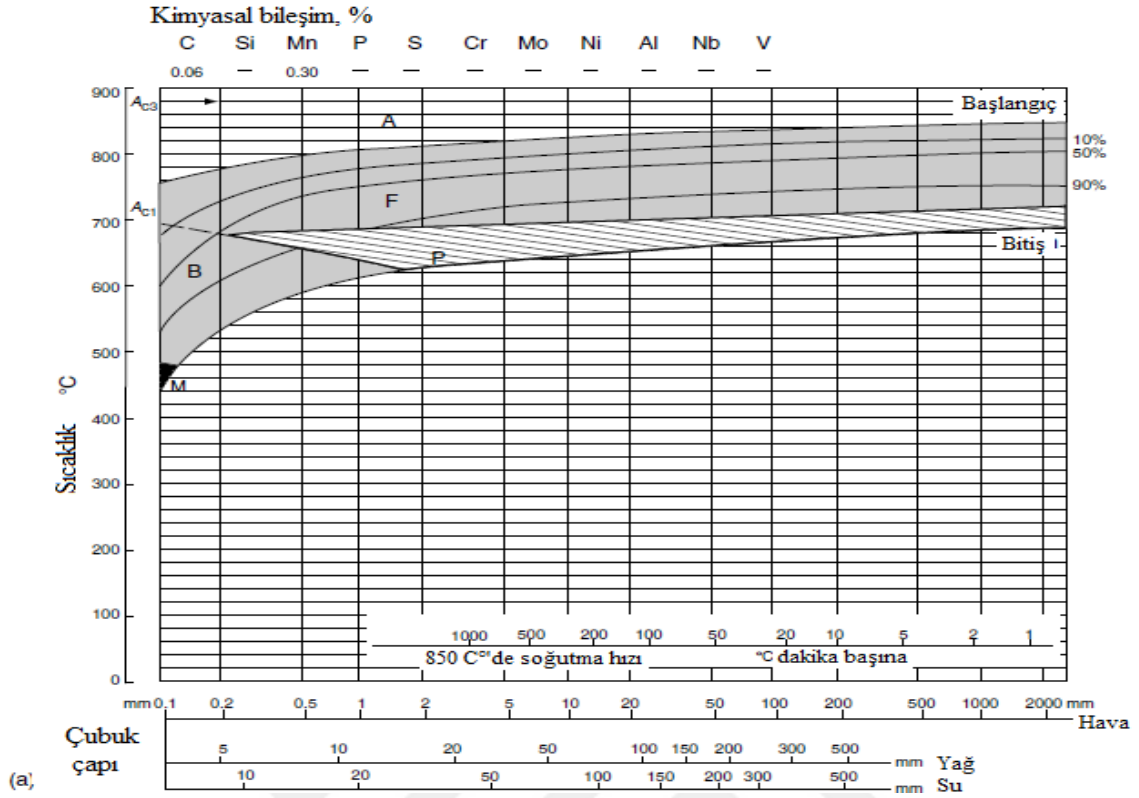
Şekil 2.17 860 °C'de östenitize edilmiş haddelenmiş çelik için SSD diyagramı (Atkins 1977).



Şekil 2.17 (Devam) 860 °C'de östenitize edilmiş haddelenmiş çelik için SSD diyagramı (Atkins 1977).

10 mm'lik bir çubuğun yağda soğutulduğu düşünüldüğünde, 10 mm'lik pozisyon Şekil 2.17'deki yağda soğutulmuş çubuk çapı ölçeğinde yer almalıdır. Yine üst bölgeden başlayıp dikey çizgi aşağı doğru takip edildiğinde, beynitin 560 °C'de östenitten oluşan ilk faz olduğu görülmektedir. 330 °C'de, yaklaşık %40 dönüşümden sonra, kalan östenit reaksiyon 150 °C'de tamamlanıncaya kadar martenzite dönüşür. Benzer şekilde, su ile soğutulmuş 10 mm çaplı bir çubuğun merkezinde ki dönüşüm 360 °C'den başlayıp 150 °C'de bitirerek martenzite dönüşecektir (Atkins 1977).

Söz konusu çelik için Şekil 2.17'deki üst diyagramın sol tarafı incelendiğinde, çapı 0,18 mm'ye kadar olan çubuklarda havada soğutma, çapı 8 mm'ye kadar olan çubuklarda yağda soğutma ve çapı 13 mm'ye kadar olan çubuklarda suda soğutma sonucunda martenzit fazının oluşacağı görülebilir (Atkins 1977).



Şekil 2.18 SSD diyagramlarında tasvir edildiği gibi düşük (a) ve yüksek (b) sertleşebilirliğe sahip çelik örnekleri (Atkins 1977).

Bu tip SSD diyagramının bir özelliği de çeliğin sertleşebilirliğinin kolaylıkla anlaşılabilir olmasıdır. Şekil 2.18a'da haddelenmiş ve 950 °C'de östenitleştirilmiş çok düşük sertleşebilirliğe sahip bir çeliğin SSD diyagramı gösterilmektedir. Şekil 2.18b'de daha önce haddelenmiş, 830 °C'de östenitize edilmiş ve 600 °C'de yumuşatılmış yüksek sertleşebilirlik özelliği olan bir çelik için benzer bir diyagram gösterilmektedir. Bu durumda östenit, çok çeşitli çubuk çapları ve soğutma aralığında ağırlıklı olarak martenzit ve beynite dönüşür (Atkins 1977).

2.4 Tavlama İşlemleri

2.4.1 Gerilim Giderme Tavlaması

Gerilim giderme tavlama, A_{C1} dönüşüm sıcaklığının altında bir tavlama işlemidir. Sonrasında kontrollü yavaş soğutma ile iş parçasının mekanik özelliklerini değiştirmeden artık gerilmeleri gidermek için uygulanır.

Bir iş parçasındaki artık gerilmeler aşağıdaki sebeplerden kaynaklanabilir:

1. Isıl faktörler (örneğin, ısıtma veya soğutma sırasında iş parçası içindeki sıcaklık geçişlerinin neden olduğu ısıl gerilmeler)
2. Mekanik faktörler (örneğin, soğuk şekillendirme)
3. Metalurjik faktörler (örneğin, mikroyapının dönüşümü)

Isı içeren işlemlerde, artık gerilmeler genellikle termal ve dönüşümsel gerilmelerin eş zamanlı varlığından kaynaklanır (örneğin, sıvı metallerin katılaşması, sıcak şekillendirme, sertleştirme veya kaynak sırasında). Isıl gerilmeler her zaman mevcut sıcaklık geçişleri ile doğru orantılıdır. Bu da kesit boyutuna ve ısıtma veya soğutma oranına bağlıdır.

Çelikten imal edilmiş iş parçalarında, yukarıdaki nedenlerden dolayı yerel artık gerilmeler yaklaşık 10 N/mm² arasında ve oda sıcaklığında akma mukavemetine yakın değerler de olabilir.

Kalıntı gerilmelerin sonuçları şunları içerebilir:

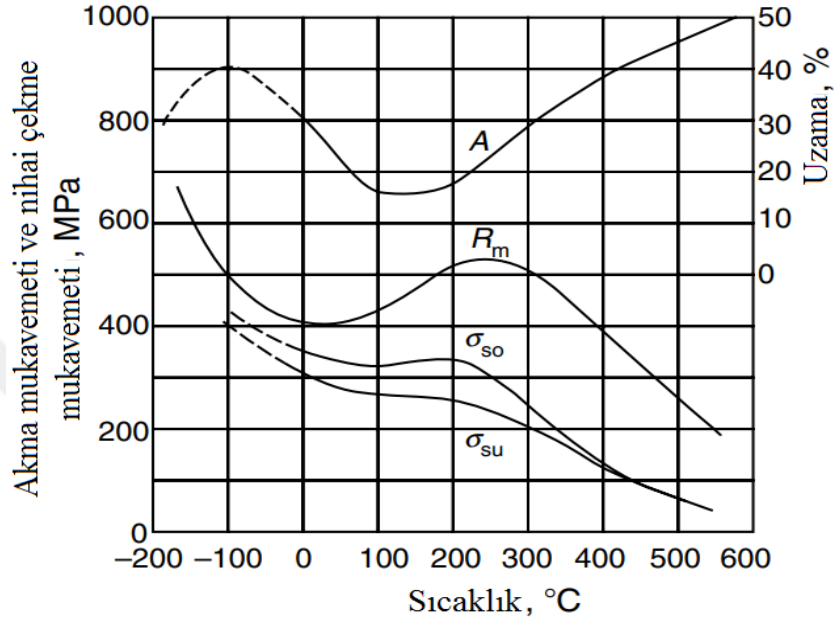
1. Boyutsal değişimler ve iş parçasının çarpılması
2. Makroskobik ve mikroskobik çatlakların oluşumu
3. Millerin asimetrik dönüşü
4. Mühendislik bileşenlerinin yorulma mukavemetinin bozulması

Bir iş parçasındaki artık gerilmeler sadece mikroyapıdaki plastik deformasyonla azaltılabilir. Bu, malzemenin akma mukavemetinin artık gerilmelerin değerinin altına indirilmesini gerektirir. Akma dayanımı ne kadar düşük olursa, plastik deformasyon o kadar büyük olur ve buna bağlı olarak artık gerilmelerin olasılığı artar veya azalır. Düşük karbonlu alaşımsız çelik için Şekil 2.19'da gösterildiği gibi çeliğin akma mukavemeti ve nihai çekme mukavemeti artan sıcaklık ile azalır. Bu nedenle, gerilim giderme tavı buna bağlı olarak yüksek bir sıcaklıkta ısıtma işlemi anlamına gelir. Sade karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler için bu sıcaklık genellikle 450 ile 650 °C arasında iken, sıcak iş takım çelikleri ve yüksek hız çelikleri için 600 °C ile 750 °C arasındadır. Bu işlem herhangi bir faz değişikliğine neden olmaz ancak yeniden kristalleşme gerçekleşebilir. Gerilim giderme tavı yapılacak makine parçalarına, herhangi bir çarpılmaya karşılık yeterli bir işleme payı verilmelidir (Eckstein 1987).

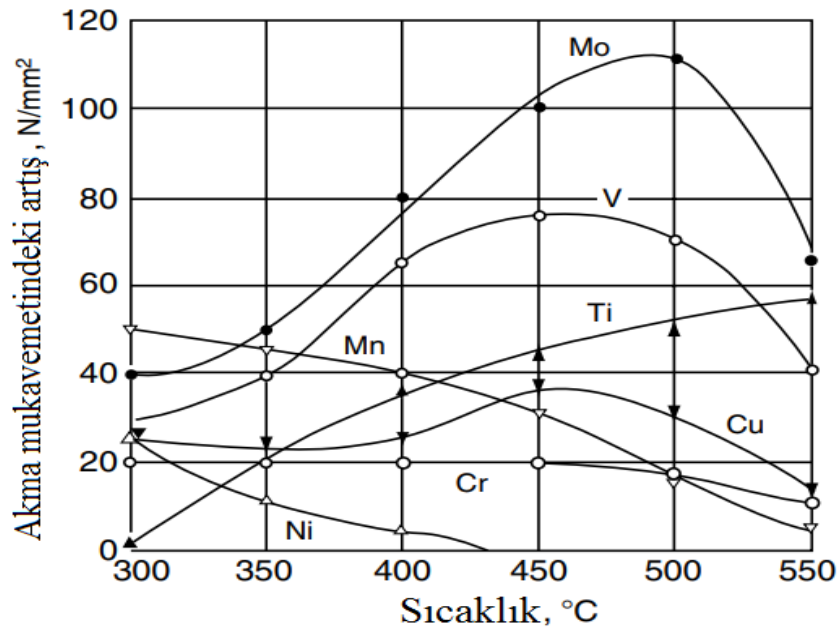
Sertleştirilmiş ve temperli çelik ile çalışırken, gerilim giderme tavı sıcaklığı temperleme için kullanılan yaklaşık 258 °C'nin altında olmalıdır. Temperleme sıcaklığı düşükse, gerilim giderme tavlamasından sonra oldukça yüksek bir kalıntı gerilmeler kalacaktır. Diğer bazı durumlarda, örneğin gri dökme demirlerde gerilim giderme tavlamasının maksimum sıcaklığı, olası mukavemet kaybı nedeniyle sınırlandırılmalıdır. Bu nedenle gri dökme demirlerde gerilim giderme tavlaması 550 °C'nin üzerinde olmamalıdır.

Metallerin ısıtılmasında, hızlı soğutma en büyük kalıntı gerilmelerin nedenidir. Kalıntı gerilmeler genellikle büyük kesitli iş parçalarında yüksek soğutma hızlarında meydana gelmektedir. Böyle bir durumda, yüksek sıcaklık geçişleri ortaya çıkacak ve farklı sıcaklık ve zamanlarda kesitin farklı noktalarında yapısal dönüşümler oluşacaktır. Sürekli soğutmalı ısıtılma işlemi proseslerinin aksine, izotermal soğutma uygulamaları (örneğin, östempereleme) düşük seviyede artık gerilmelere neden olur (Eckstein 1987).

Plastik deformasyonları etkinleştirmek için, artık gerilmeler malzemenin akma mukavemetinin üzerinde olmalıdır. Bu nedenle, yüksek sıcaklıklarda yüksek akma mukavemetine sahip çelikler, yüksek sıcaklıklarda düşük akma mukavemetine sahip çeliklerden daha yüksek kalıntı gerilmeler oluşturabilir.



Şekil 2.19 Düşük karbonlu alaşımsız çeliğin artan sıcaklıktaki bazı mekanik özelliklerindeki değişiklik. A, uzama; R_m, nihai çekme mukavemeti; σ_{so}, üst akma dayanımı; σ_{su}, daha düşük akma mukavemeti (Eckstein 1987).



Şekil 2.20 Belirtilen her bir alaşım elementinin %0.5'i alaşımsız bir çeliğe eklendiğinde, yüksek sıcaklıklarda akma mukavemetindeki gözlenen artış (Spur ve Stöferle 1987).

Yüksek sıcaklıklarda akma dayanımı seviyesi çelikteki alaşım elementlerine bağlıdır. Şekil 2.20, her bir elementin %0,5'inin alaşımsız bir çeliğe eklendiğinde 300–550 °C sıcaklıklarda akma mukavemetindeki artışı göstermektedir. Bu diyagramdan, Mo ve V elementlerinin yüksek sıcaklıklarda akma mukavemetini arttırmada en etkili olduğu görülebilir.

Gerilim giderme tavlaması ile bir iş parçasındaki artık gerilmeleri azaltmak için, mevcut kalan gerilmelerin maksimumu için yeterli olan akma mukavemetine karşılık gelen sıcaklığın üzerinde bir sıcaklığa ulaşılmalıdır. Başka bir deyişle, bir iş parçasındaki her kalıntı gerilim seviyesi, sıcaklık durumuna bağlı olan akma dayanımına karşılık gelir. Sıcaklığa yanı sıra, ısıtma süresi de Şekil 2.21'de gösterildiği kalıntı gerilmelerin azaltılmasında önemli bir etkiye sahiptir (Spur ve Stöferle 1987).

Gerilim giderme tavlaması sırasında sıcaklık ve ısıtma süresi arasındaki ilişki Hollomon parametresi ile tanımlanabilir. Bu parametre denklem 2.18'de verilmiştir.

$$P = T(C + \log t) \quad (2.18)$$

Yukarıdaki denklemde,

P = Hollomon parametresi

C = Hollomon-Jaffe sabiti

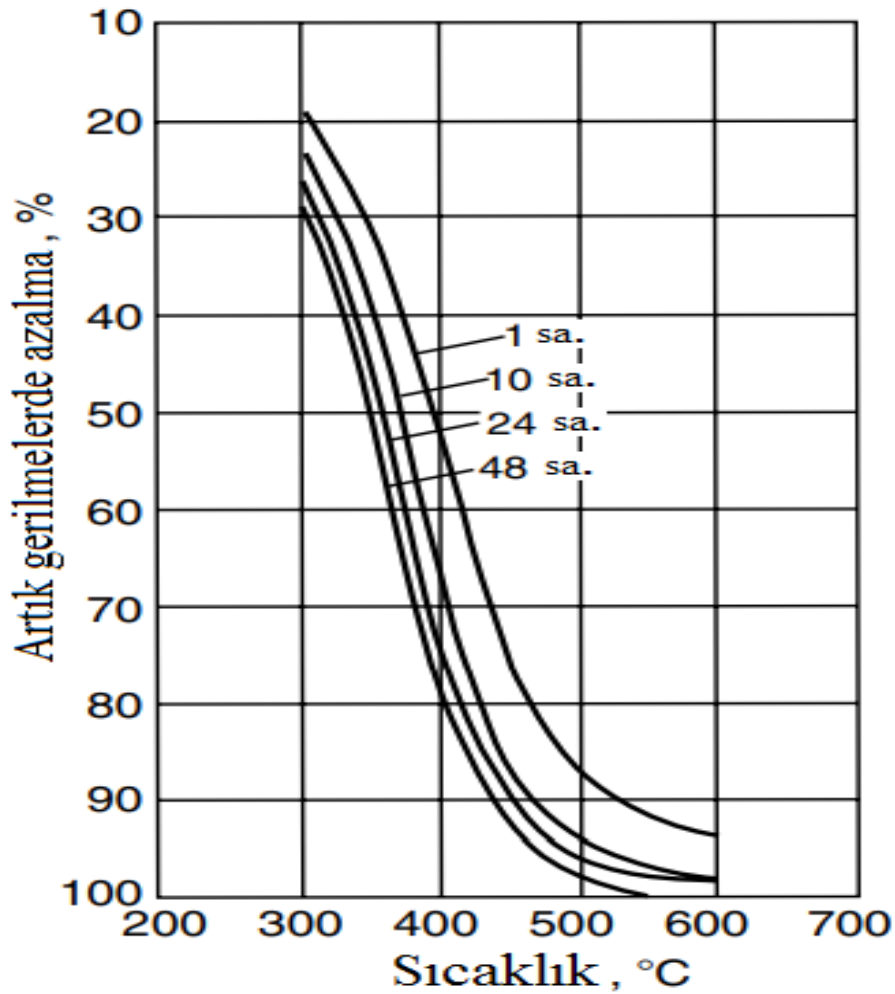
T = Sıcaklık (K)

t = Zaman (sn)

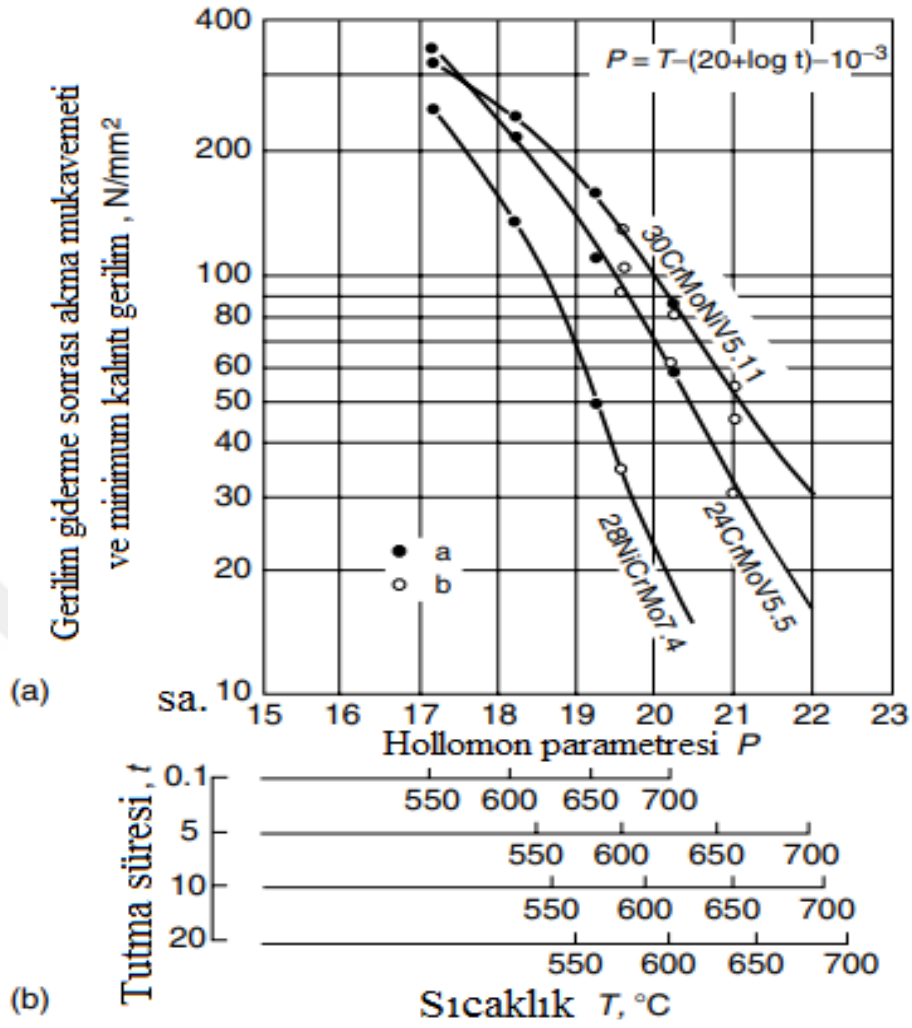
Hollomon-Jaffe sabiti denklem 2.19'da gösterilen formüle göre hesaplanabilir.

$$C = 21.3 - (5.8 \times \% \text{ karbon}) \quad (2.19)$$

Şekil 2.22’de (Larson–Miller yöntemine göre), üç farklı alaşımlı yapı çeliklerinin sertleştirme ve temperleme işlemleri için yüksek sıcaklıklarda (%0,2 gerilme için) akma mukavemetinin hesaplanan değerlerini göstermektedir. Bu diyagramı kullanarak, eksen temsil eden Hollomon parametresi P, gerilim giderme tavlama sıcaklığını ve zamanını bilerek bu tavlama işleminden sonra iş parçasında kalacak olan kalıntı gerilmelerin seviyesini yani bu gerilim giderme tavlama ile kalıntı gerilmelerin azaltılacağı seviyeyi okuyabilir. Örneğin DIN 24CrMoV5.5 çelik için 600 °C sıcaklık ve 10 saat soğutma süresi için gerilim giderme tavlama sonrasında kalıntı gerilmeler, maksimum 70 N/mm²’ye düşürülecektir. Daha yüksek sıcaklıklar ve daha uzun tavlama süreleri, Şekil 2.22’de görülebileceği gibi kalıntı gerilmeleri daha düşük seviyelere düşürebilir (Spur ve Stöferle 1987).



Şekil 2.21 Sertleştirilmiş ve temperlenmiş çelikler için artık gerilmelerin azaltılması üzerine farklı sürelerde uygulanan gerilim giderme (farklı sıcaklıklarda) işleminin etkisi (Spur ve Stöferle 1987).



Şekil 2.22 Sertleştirme ve temperleme için (%0,2 gerilme için) üç sınıf alaşımlı yapı çeliğinin Larson-Miller yöntemine göre hesaplanan yüksek sıcaklıklarda akma mukavemeti. (a) Hesaplanan değerler ve (b) deneysel olarak elde edilen değerler (Spur ve Stöferle 1987).

Hollomon parametresinin dahil olduğu tüm ısıtma süreçlerinde olduğu gibi, daha yüksek bir sıcaklık seçimi ısıtma süresini önemli ölçüde kısaltabilir ve tavlama işleminin ekonomisine önemli ölçüde katkıda bulunabilir.

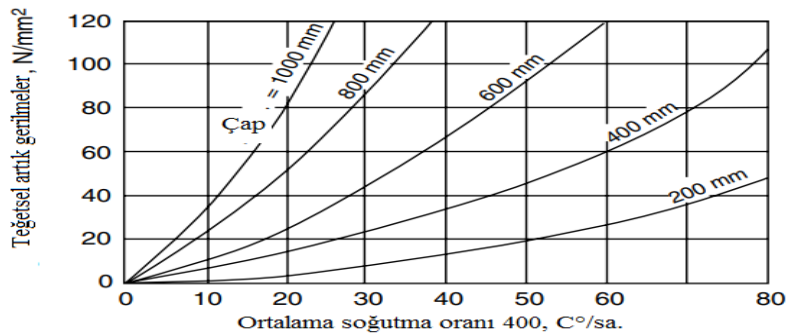
Sertleştirme ve temperleme için yapısal çeliklerinde, gerilim giderme ve temperleme işlemi aynı anda tek bir işlem olarak gerçekleştirilebilir. Çünkü Hollomon'un parametresi temperleme için de geçerlidir. Böyle bir durumda, gerilim giderme diyagramı, hem sertliği hem de azaltılmış gerilme seviyesini optimize etmek için temperleme diyagramı ile birlikte kullanılabilir (Spur ve Stöferle 1987).

Gerilim giderme tavlaması sonrası kalıntı gerilim seviyesi, ancak yeni iç gerilimler ortaya çıkmayacak kadar yavaş ve kontrol edilen sıcaklıktan soğuma durumunda korunur. Soğutma sırasında indüklenen yeni gerilmeler soğutma hızına, iş parçasının kesit boyutuna ve çeliğin bileşimine bağlıdır. Şekil 2.23 CrMoNiV çeliğinden yapılmış dövme parçaların soğutma hızının ve kesit çapının, gerilim giderme tavlamasından sonra teğetsel kalıntı gerilmeler düzeyinde etkisini göstermektedir.

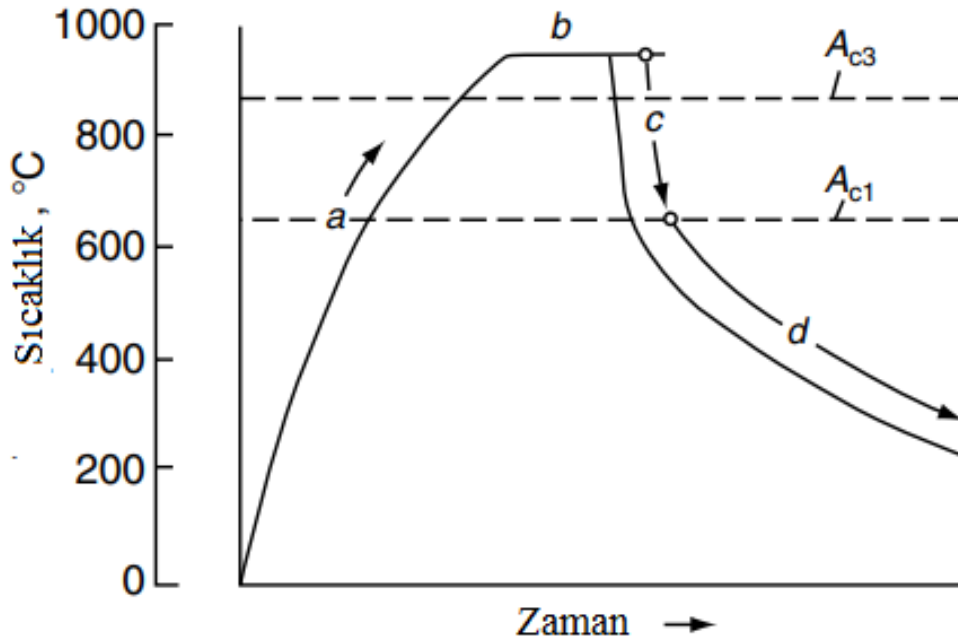
Gerilim giderme tavlaması ile ilgili genel bir sonuç şudur: 450–650 °C sıcaklık aralığında, alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerin akma mukavemeti o kadar düşürülür ki plastik deformasyon ile büyük miktarda artık gerilme azaltılabilir. Çelik bileşiminin tavlamadan sonra kalıntı gerilmeler seviyesine etkisi önemli olabilir. Gerilim giderme işleminden sonra Ni, Mn ve Cr alaşımlı ve alaşımsız çelikler, 500 °C üzerinde tavlama uygulandığında kalıntı gerilmelerin düşük bir seviyeye indirgenmesini sağlayabilir. Mo+V alaşımlı çelikler, yüksek sıcaklıkta çok daha yüksek akma mukavemeti nedeniyle aynı sıcaklıkta gerilim giderme tavlama işleminden sonra kalıntı gerilmelerin çok daha yüksek bir seviyesini koruyacaktır (Spur ve Stöferle 1987).

2.4.2 Normalizasyon

Normalizasyon tavlı, A_{C3} dönüşüm sıcaklığının 30-80 °C üzerindeki sıcaklıklarda (ötoktoid üstü çelikler için) östenitleme ve ardından yavaş soğutmadan (genellikle havada) oluşan bir ısıtma işlem sürecidir. Amacı ince taneli, eşit olarak dağıtılmış bir ferrit-perlit yapısı elde etmektir (Spur ve Stöferle 1987).



Şekil 2.23 Soğutma hızına ve kesit çapına bağlı olarak bir CrMoNiV alaşımlı çelikte teğetsel artık gerilmeler (Spur ve Stöferle 1987).

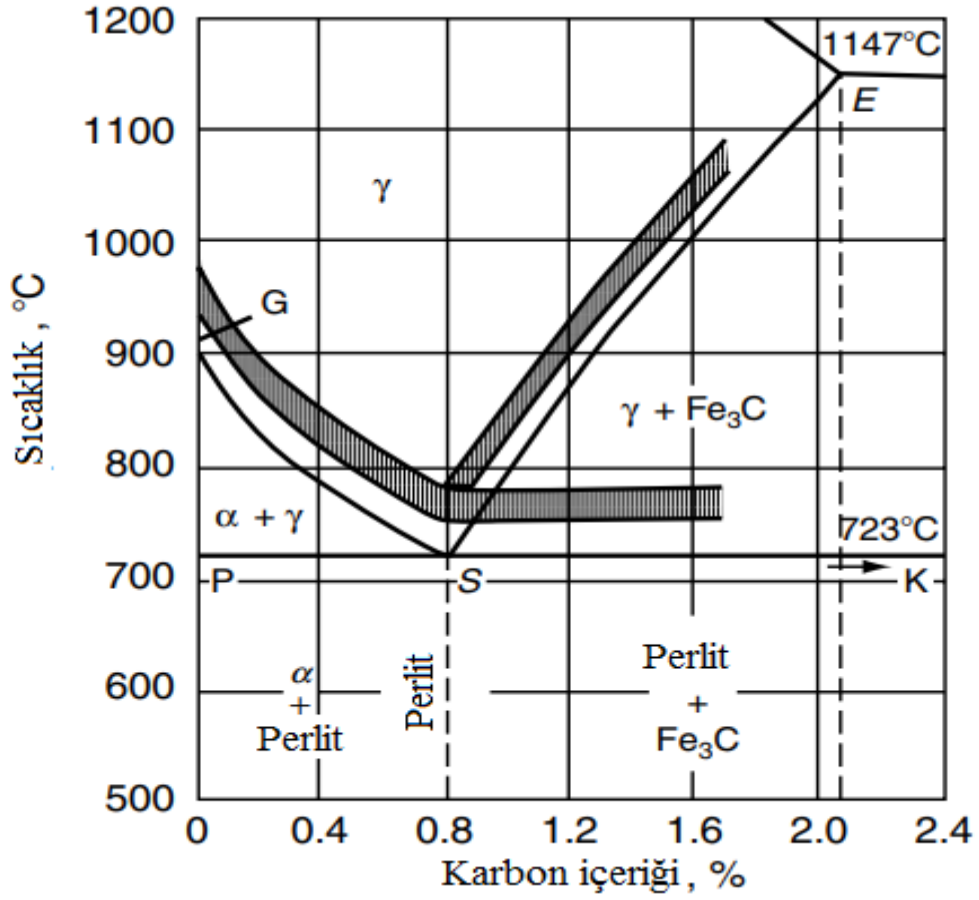


Şekil 2.24 Normalizasyonun zaman-sıcaklık rejimi. a, Isıtma; b, östenit sıcaklığında tutma; c, havada soğutma; d, hava veya fırında soğutma (Spur ve Stöferle 1987).

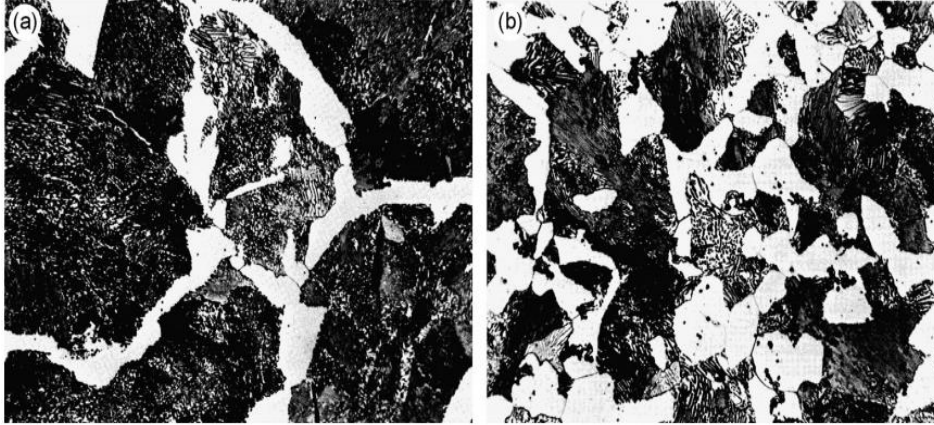
Normalleştirme esas olarak alaşımsız ve düşük alaşımlı ötoktoid altı çeliklere uygulanır. Ötektoid üstü çelikler için normalleştirme sadece özel durumlarda gerçekleştirilir ve bu çelikler için östenitleştirici sıcaklık A_{C1} dönüşüm sıcaklığının 30-80 °C üzerindedir.

Şekil 2.24 normalleştirme işleminin ısıl döngüsünü gösterirken, Şekil 2.25 karbon içeriğine bağlı olarak alaşımsız çelikleri normalleştirmek için östenitleştirici sıcaklıkların aralığını gösterir. Normalleştirme işleminin parametreleri ısıtma hızı, östenitleme sıcaklığı, östenitleme sıcaklığında tutma süresi ve soğutma hızıdır (Spur ve Stöferle 1987).

Normalleştirme işlemi, örneğin dövme veya kaynak gibi işlemlerde yüksek sıcaklığa ısıtmanın ardından oluşan kaba taneli yapının iyileştirilmesi sağlar. Şekil 2.26 %0,5 C bir karbon çeliğinin normalizasyon işlemi sonrası tane inceltici etkisini gösterir. Bu tür tane inceltme ve normalleştirme ile yapının homojenleştirilmesi, genellikle ya iş parçasının mekanik özelliklerini geliştirmek için ya da (sertleşme için önceki) sertleştirme sonrası daha iyi ve daha düzgün sonuçlar elde etmek için yapılır. Bazı durumlarda düşük karbonlu çeliklerin daha iyi işlenebilirliği için normalleştirme tavı uygulanır.



Şekil 2.25 Karbon içeriğine bağlı olarak alaşımsız çeliklerin normalleştirilmesi için östenit sıcaklık aralığı (S–E hattının üzerindeki sıcaklık aralığı, ikincil karbürlerin çözünmesi için kullanılır). α, ferrit; γ, östenit; Fe₃C, sementit (Spur ve Stöferle 1987).

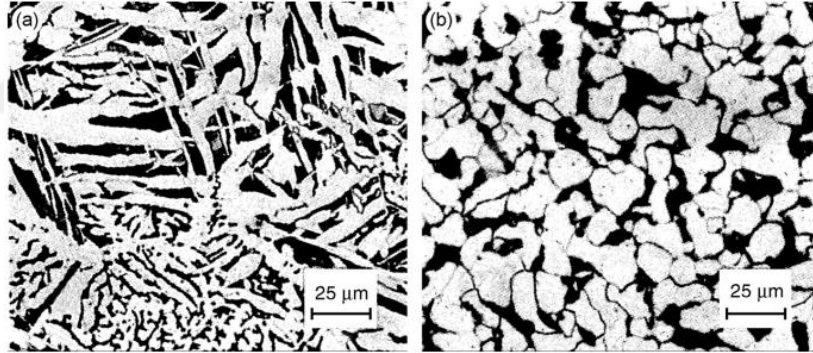


Şekil 2.26 %0,5 C'lik bir karbon çeliğini normalleştirmenin tane küçülmesine etkisi. (a) Haddelenmiş veya dövme olarak, tane boyutu ASTM 3 ve (b) normalize, tane boyutu ASTM 6. Büyütme 500x (Thelning 1984).

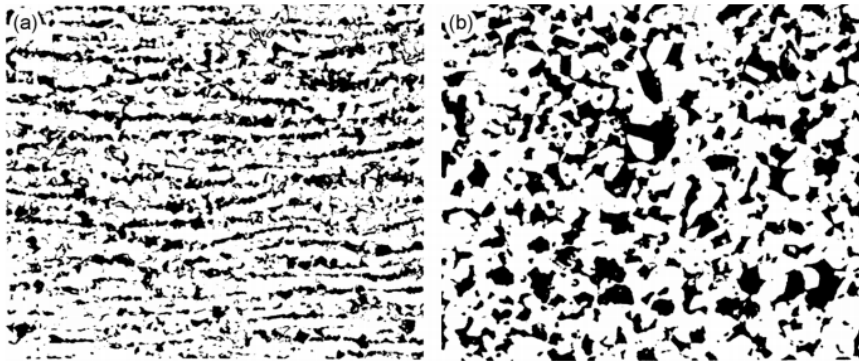
Çelik dökümlerde normalleştirme için özel bir ihtiyaç vardır. Çünkü döküm sonrası yavaş soğutma nedeniyle Şekil 2.27'de gösterildiği gibi, genellikle iğne benzeri ferrit (Widmannstatten yapısı) içeren kaba taneli bir yapı oluşur. 780-950 °C'de (kimyasal bileşime bağlı olarak) normalizasyon tavı ile, %0,3–0,6 C'ye sahip alaşımsız ve alaşımlı çelik dökümlerin bu istenmeyen yapısını ortadan kaldırır (Eckstein 1987).

Sıcak haddelemeden sonra, çelik yapısı genellikle Şekil 2.28'de gösterildiği gibi haddeleme yönünde yönlendirilir. Böyle bir durumda, mekanik özellikler haddeleme yönü ve ona dik yönü arasında farklılık gösterir. Yönlendirilmiş yapıyı kaldırmak ve her yönde aynı mekanik özellikleri elde etmek için normalizasyon tavı uygulanmalıdır.

Yüksek sıcaklıklarda dövme işlemi sonrası, özellikle enine kesit boyutuna göre değişkenlik gösteren iş parçaları ile, dövme sıcaklığında ki farklı soğutma oranları nedeniyle normalleştirilerek düzgün hale getirilebilen heterojen bir yapı elde edilir.



Şekil 2.27 Normalleştirmeden önce çelik döküm (a) ve normalleştirmeden sonra çelik döküm (b) yapısı (Eckstein 1987).



Şekil 2.28 DIN 20MnCr5 çeliğinin yapısı (a) sıcak haddelemeden sonra ve (b) 880 °C'de normalleştirildikten sonraki yapısı. Büyütme 100x (Spur ve Stöferle 1987).

Metalurjik açıdan, normalleştirme işlemi sırasında yeni oluşan ferrit–perlit yapısının ince taneli ve üniform dağılımı aşağıdaki mekanizma ile açıklanabilir. Normalizasyon tavında, ilk olarak $\alpha \rightarrow \gamma$ (ferrit-perlit→östenit) dönüşümü, östenitleme sıcaklığında bekletme süresinden sonra yinelenen bir $\gamma \rightarrow \alpha$ (östenit-ferrit→perlit) dönüşümü gerçekleşir. Normalleştirmenin etkisi östenitleştirmeye ve östenitleme sıcaklığından soğutmaya bağlıdır.

Östenitizasyon sırasında karbürlerin çözünmesi hedeflenir ancak bu süreçte karbürlerin çözünmesinden sonra östenit tanelerinin büyümesi istenmez. Karbür çözünmesinin yanı sıra, östenit matrisi içindeki homojenizasyon derecesi normalleştirildikten sonra yapıda düzenli yeni bir ferrit ve perlit fazı elde etmek için önemlidir. Hem çözünme hem de homojenleştirme, sıcaklığa ve zamana bağlı olarak gelişen difüzyon prosesiyle mümkün olur. Bu nedenle, özellikle alaşımlı çeliklerde daha düşük östenitleme sıcaklıkları ve normalleştirme için daha uzun tutma süreleri, östenit tane büyümesi dikkate alındığında önemli avantaj sağlar. Şekil 2.29’da gösterildiği gibi, yüksek östenitleme sıcaklığında normalleştirme işleminden sonra kaba taneli bir östenit yapısı meydana gelir.

Östenitleme sıcaklığında bekletme süresi ampirik formül kullanılarak hesaplanabilir. Bu formül denklem 2.20’de gösterilmiştir.

$$t = 60 + D \quad (2.20)$$

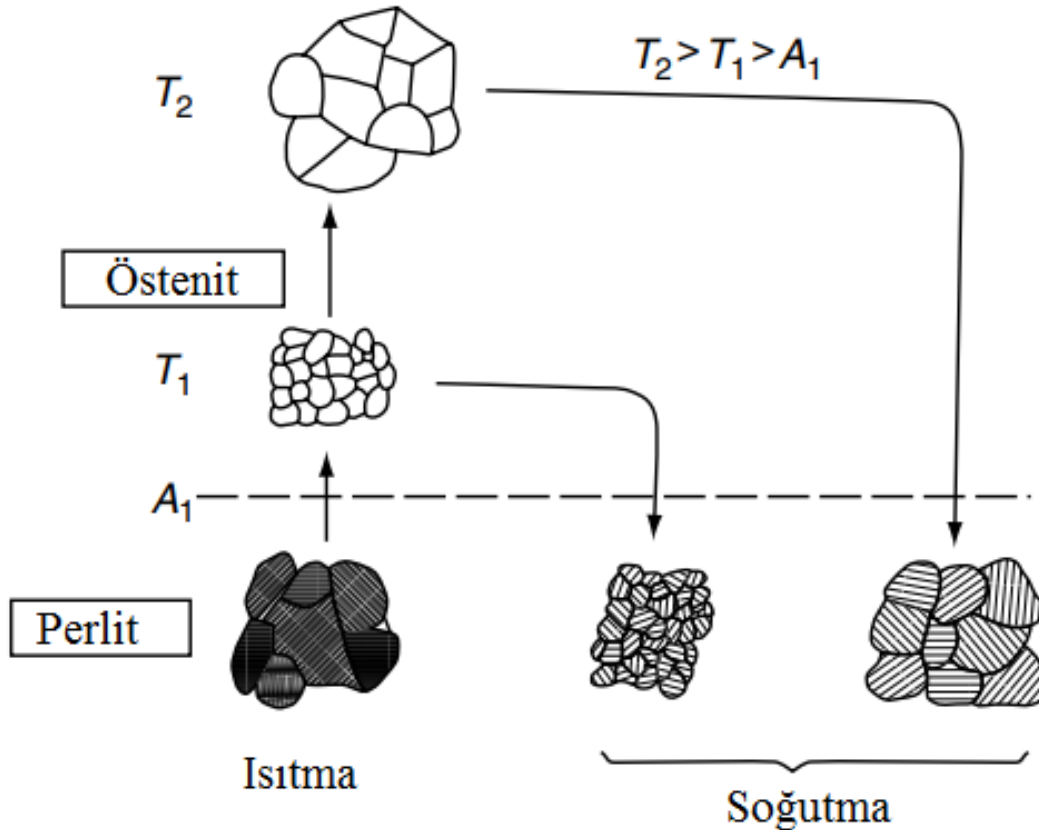
Yukarıdaki denklemde,

t = Tutma süresi (dk)

D = İş parçasının maksimum çapı (mm)

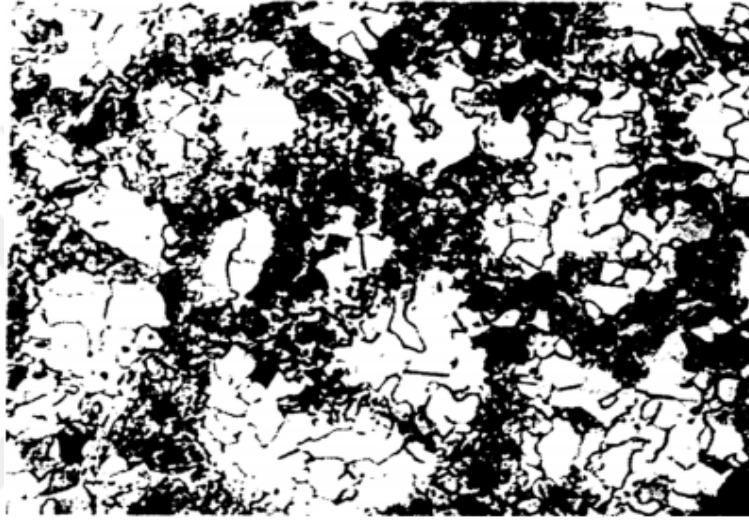
Ötektoid altı çelikleri normalleştirirken (yani, %0,8 C'den daha az olan çelikler), östenitizasyon sıcaklığından soğutma sırasında, ötektik öncesi ferrit çökmesi gerçekleşir. Daha düşük bir soğutma hızı ile, ferritin çökmesi östenit tane sınırları boyunca artar. Normalleştirmeden sonra ferrit ve perlitin üniform dağılımı için, eş zamanlı olarak ferrit ve perlit oluşumu gereklidir (Eckstein 1987).

Karbon içeriği %0,35 ile %0,55 C arasında olan çelikler Şekil 2.30'da gösterildiği gibi üniform olmayan ferrit dağılımları geliştirme eğilimindedir. Bu şekilde yapı A_{C3} ve A_{C1} arasındaki ötektoid öncesi ferrit çökeltme sıcaklık aralığında aşırı yavaş soğutma gösterir. Öte yandan, bu sıcaklık bölgesi boyunca soğutma çok hızlı gerçekleşirse, karbon içeriği %0,2 ile %0,5 arasında olan çelikler, Şekil 2.31'de gösterildiği gibi Widmannstatten yapısı olarak adlandırılan istenmeyen bir iğne benzeri ferrit (östenit tane sınırlarına yönlendirilmiş) oluşumu ile sonuçlanabilir. Perlit oluşumu, yalnızca A_{C1} sıcaklığında kalan östenit yapısının dönüşümü ile ferritin tamamen çökmesinden sonra gerçekleşir. İlk olarak ferrit ve östenit tane sınırlarında başlar ve östenit tanelerinin iç kısmına doğru yayılır. Oluşan perlit bölgelerinin sayısı arttıkça, perlit tanelerinin büyümeleri karşılıklı olarak engellenir ve sonuç olarak normalleştirilmiş yapının taneleri ince olur. Alaşım elementlerinin östenit üzerindeki ferrit ve perlit dönüşümü üzerindeki etkisi ilgili SSD diyagramından okunabilir (Spur ve Stöferle 1987).



Şekil 2.29 Ötektoid bir çelik yapısının normalleştirme işleminden sonra tane büyüklüğü üzerinde östenitleştirici sıcaklığın etkisinin şematik sunumu (Eckstein 1987).

İş parçası içindeki soğutma oranının, söz konusu çeliğin dönüşüm davranışına karşılık gelen ve saf bir ferrit-perlit yapısına neden olan bir aralıkta olmasını sağlamak için özen gösterilmelidir. Havada soğutulan farklı çaplarda yuvarlak çubuklar için, çekirdekteki soğutma eğrileri deneysel olarak ölçülüp kaydedilmişse, söz konusu çelik kalitesi için uygun SSD diyagramı kullanılarak normalleştirildikten sonra yapıyı ve sertliği tahmin etmek mümkündür. Kaydedilen soğutma eğrilerini SSD diyagramına eklemek için, zaman-sıcaklık ölçekleri SSD diyagramına eşit olmalıdır.



Şekil 2.30 Alaşımsız DIN C35 çeliğinin normalleştirilmesi sırasında hatalı sıcaklık kontrolünün bir sonucu olarak ferrit ve perlitin homojen olmayan dağılımı. Büyütme 100x (Spur ve Stöferle 1987).

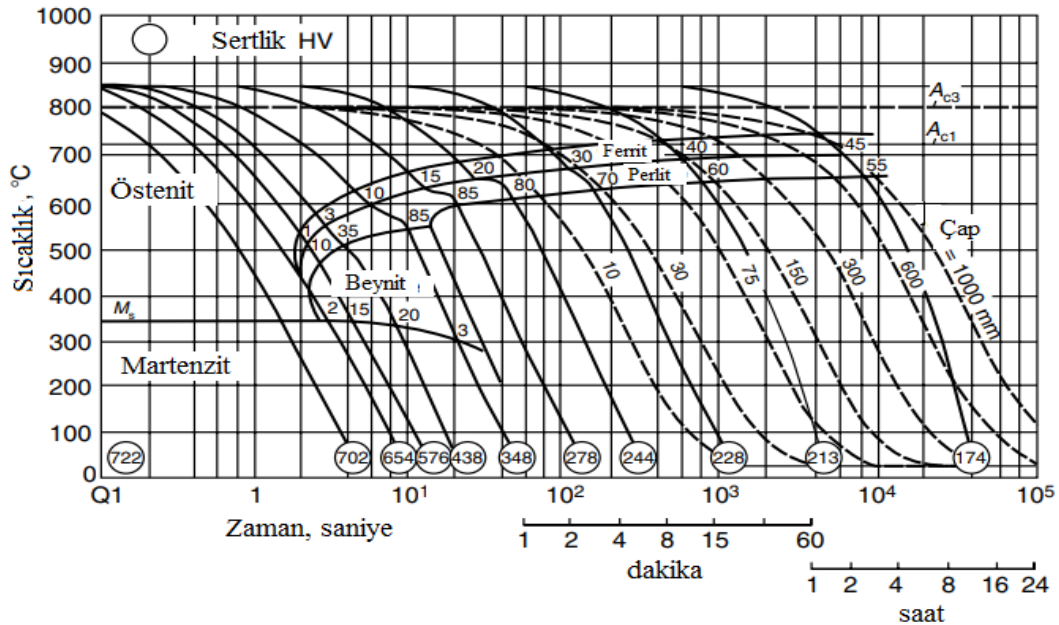


Şekil 2.31 Çok hızlı bir soğutma oranı nedeniyle alaşımsız çelik DIN C35'in normalleştirilmesinden sonra tane sınırlarında iğne benzeri ferrit oluşumu. Büyütme 500x (Spur ve Stöferle 1987).

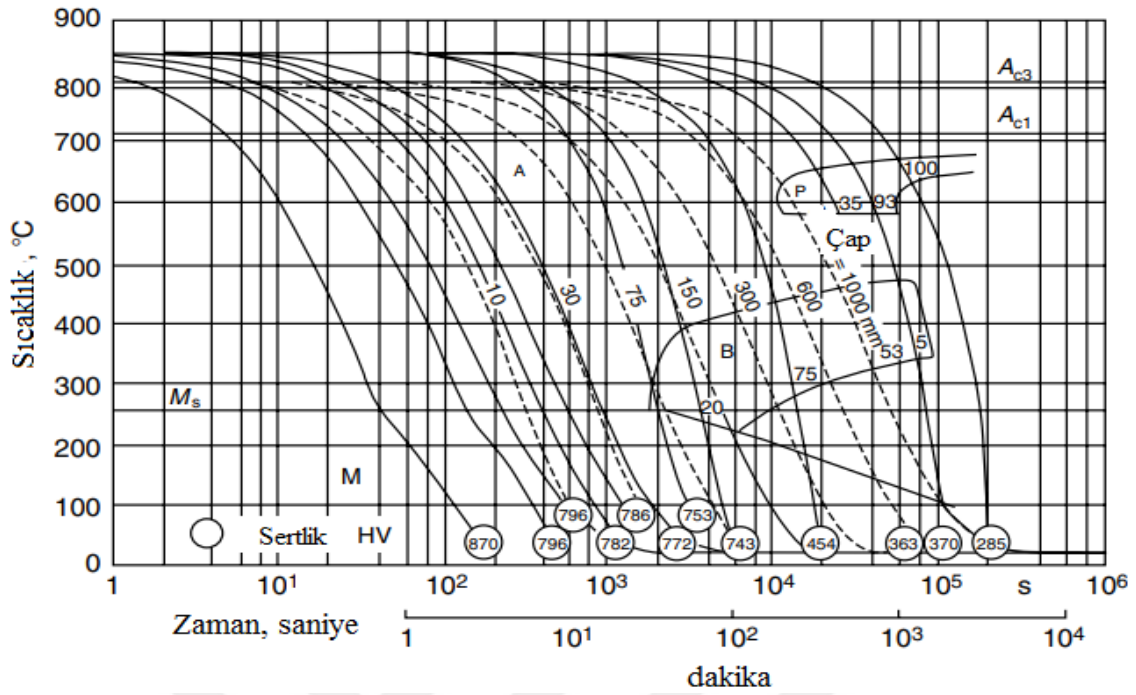
Şekil 2.32, alaşımsız çelik DIN Ck45'in havada soğutulan farklı çaplardaki tüm incelenen çubukların çekirdeğinde istenen ferrit-perlit yapısına ulaşacağını göstermektedir. Öte yandan, Şekil 2.33'de gösterildiği gibi, havada aynı şekilde soğutulan alaşımlı çelik DIN 55NiCrMoV6'da martenzit ve beynit oluşacaktır. Bu durumda, normalleştirildikten sonra istenen yapı ve sertliğin elde edilmesi için yaklaşık 10 C/sa.'lık çok daha yavaş bir soğutma yani fırın soğutması, östenitizasyon sıcaklığından perlit oluşumunun bittiği sıcaklığa kadar uygulanmalıdır.

2.4.3 İzotermal Tavlama

Ötektoid altı düşük alaşımlı sementasyon çeliklere ve sertleştirilip temperlenmiş orta karbonlu yapısal çeliklere, en iyi işlenebilirliği sağlamaları için genellikle izotermal tavlama işlemi uygulanır. Düzgün dağılmış ferrit-perlit yapısı bu çeliklerin işlenebilirliği için en uygun yapıdır. Düşük karbonlu çelikler yumuşak tavllanmış ise, malzemenin kesici kenarında birikmesi nedeniyle döndürüldüğünde uzun talaşlar ve kötü bir yüzey görünümü (bazen 'sıvanma' veya 'yırtilma' olarak adlandırılır) verirler. Diğer yandan, beynit gibi daha sert yapısal bileşenlere sahip tavlannmamış iş parçaları, işlendiğinde kesici kenarın aşınmasına neden olur.



Şekil 2.32 Havada soğutulmuş farklı çaplarda ki yuvarlak çubukların çekirdeğinde ölçülen üst üste bindirilmiş soğutma eğrileri ile alaşımsız çelik DIN Ck45 (östenit sıcaklığı 850 °C) SSD diyagramı (Spur ve Stöferle 1987).



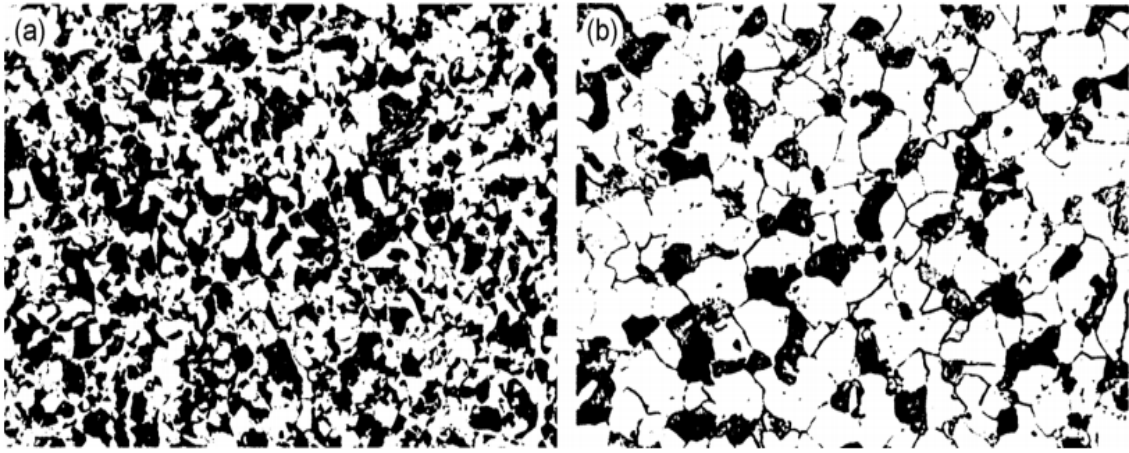
Şekil 2.33 Havada soğutulmuş farklı çaplarda ki yuvarlak çubukların çekirdeğinde ölçülen üst üste bindirilmiş soğutma eğrileri ile alaşımsız çelik DIN 55NiCrMoV6 (östenit sıcaklığı 950 °C) SSD diyagramı (Spur ve Stöferle 1987).

İzotermal olarak tavllanmış bir yapı aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır:

1. Yüksek oranda ferrit
2. Düzgün dağılmış perlit taneleri
3. İnce lamel halinde dizilmiş perlit taneleri
4. Kısa perlit lameller
5. Kaba ferrit taneleri

Şekil 2.34, normalleştirme ve izotermal tavlama işleminden sonra semantasyon ısıl işlemi için düşük alaşımlı çelikten (DIN 16MnCr5) yapılmış ince duvarlı bir kalıp dövme yapısını göstermektedir. İstenen ferrit-perlit yapısı, izotermal bir tavlama sırasında ortaya çıkar ve prensibi Şekil 2.35 ile açıklanır. Bu şekil, sürekli soğutmada farklı soğutma oranları için üst üste getirilmiş soğutma eğrileri ile semantasyon için düşük alaşımlı bir çeliğin (DIN 15CrNi6) IT diyagramını göstermektedir. En düşük 3 K/dk soğutma hızı fırında soğutma ile ilgilidir ve en hızlı 3000 K/dk soğutma hızı su verme ile ilgilidir. Şekil 2.35'deki diyagramdan, beynit oluşumunun sadece çok yavaş sürekli soğuma ile önlenebileceği, ancak böyle yavaş bir soğutma ile dokulu (uzatılmış ferrit) yapı sonuçları açıkça görülmektedir (Wünning 1977).

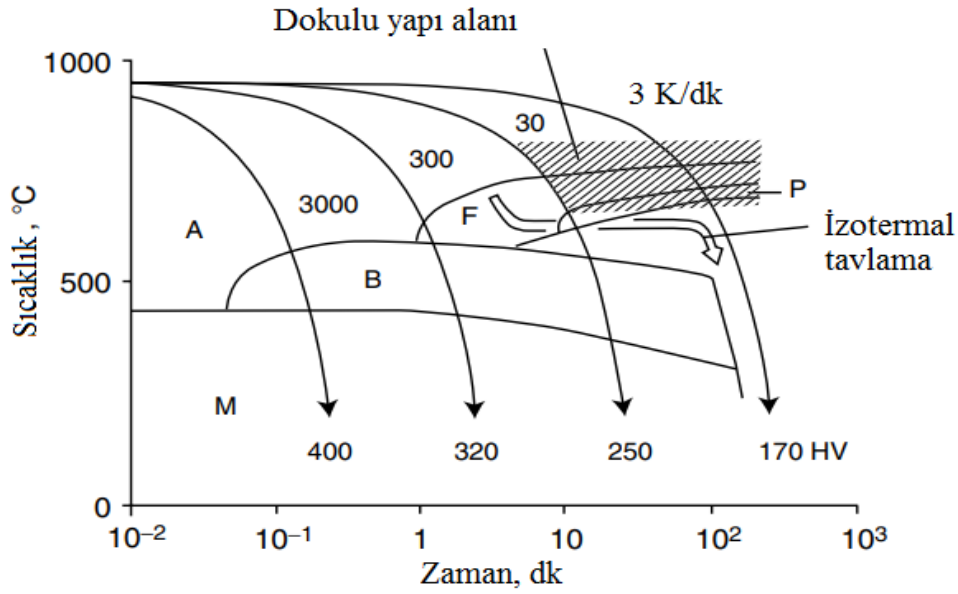
Hem beynit oluşumunu hem de dokulu bir yapının oluşumunu önlemenin tek bir yolu vardır ve bu östenitleme ve ardından perlit oluşumunun sıcaklık aralığına hızlı bir soğutma ile (genellikle yaklaşık 650 °C) oluşan izotermal tavlama işlemidir. İzotermal bir tavlamanın sıcaklık-zaman diyagramı Şekil 2.36'da verilmiştir. İyi bir izotermal tavlamanın metalurjik mekanizması, östenitizasyon koşullarına, izotermal dönüşümün sıcaklığına ve zamanına ve östenitizasyon sıcaklığından izotermal dönüşüm sıcaklığına soğutmaya bağlıdır (Spur ve Stöferle 1987).



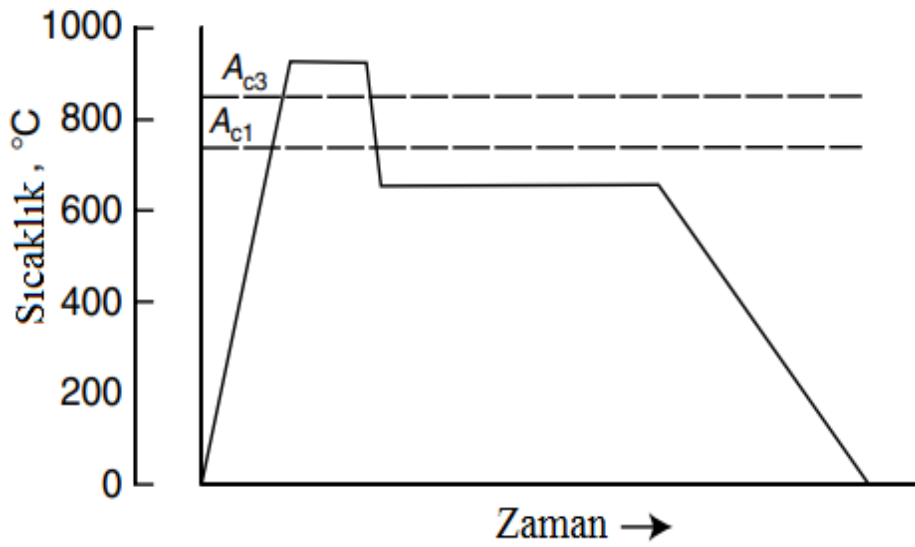
Şekil 2.34 Sementasyon için düşük karbonlu çelikten yapılmış bir dövme yapı (DIN 16MnCr5). (a) Normalleştirildikten sonra ve (b) izotermal tavlamadan sonra. Büyütme 200x (Spur ve Stöferle 1987).

Östenitizasyon sıcaklığı ve zamanı, östenit matrisini homojenize etmek, östenit yapısını stabilize etmek ve soğutulduktan sonra kaba taneli bir ferrit-perlit yapısı elde etmek için tüm karbürleri tamamen eritecek kadar yüksek olmalıdır. İstenmeyen dokulu yapı, gerilmiş fazlar boyunca, örneğin manganez sülfidler, karbon segregasyonları veya alüminyum nitrür çökelmeleri gibi istenmeyen yapılar ön ötektoid ferrit çökmesinden kaynaklanır. Bu fazlar, bir ön sıcak şekillendirme işleminin bir sonucu olarak gerilmiştir.

Dokulu yapıyı önlemek için çeliğin mümkün olduğunca az kükürt, azot ve alüminyum içermesi gerekir ve östenitizasyon sırasında nitrür çökeltilerinin ve karbürlerin tamamen çözünmesi sağlanmalıdır. Bu nedenle östenitizasyon sıcaklığı yeterince yüksektir, yani A_{C3} 'ün yaklaşık 100 °C üzerindedir ve tutma süreleri genellikle 2 saattir.



Şekil 2.35 İzotermal tavlama prensibi. Semantasyon için DIN 15CrNi6 düşük alaşımlı çeliğin ZSD diyagramı (Wünning 1977).



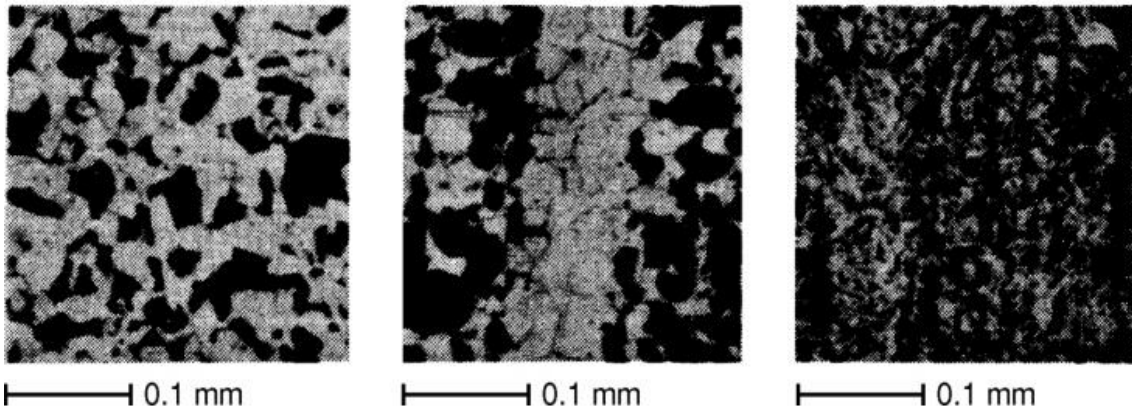
Şekil 2.36 İzotermal tavlamanın sıcaklık-zaman döngüsü (Spur ve Stöferle 1987).

Dokulu bir yapıyı önlemek için bir diğer önemli koşul, östenitizasyon sıcaklığı ve izotermal dönüşüm sıcaklığı arasındaki minimum soğutma hızını gerçekleştirmektir. Bu nedenle soğutmanın, yaklaşık 300 °C azalarak 20-40 K/dk minimum soğutma hızında geçmesi gerekir. Bu, işlenen parçalarının homojen olarak yaklaşık 950 °C'den 650 C'ye en az 10 dakika içinde soğutulması gerektiği anlamına gelir. Bu soğutma işlemi sırasında, beynit oluşumunu önlemek için seçilen izotermal dönüşüm sıcaklığının altında bir soğutmadan kaçınılmalıdır.

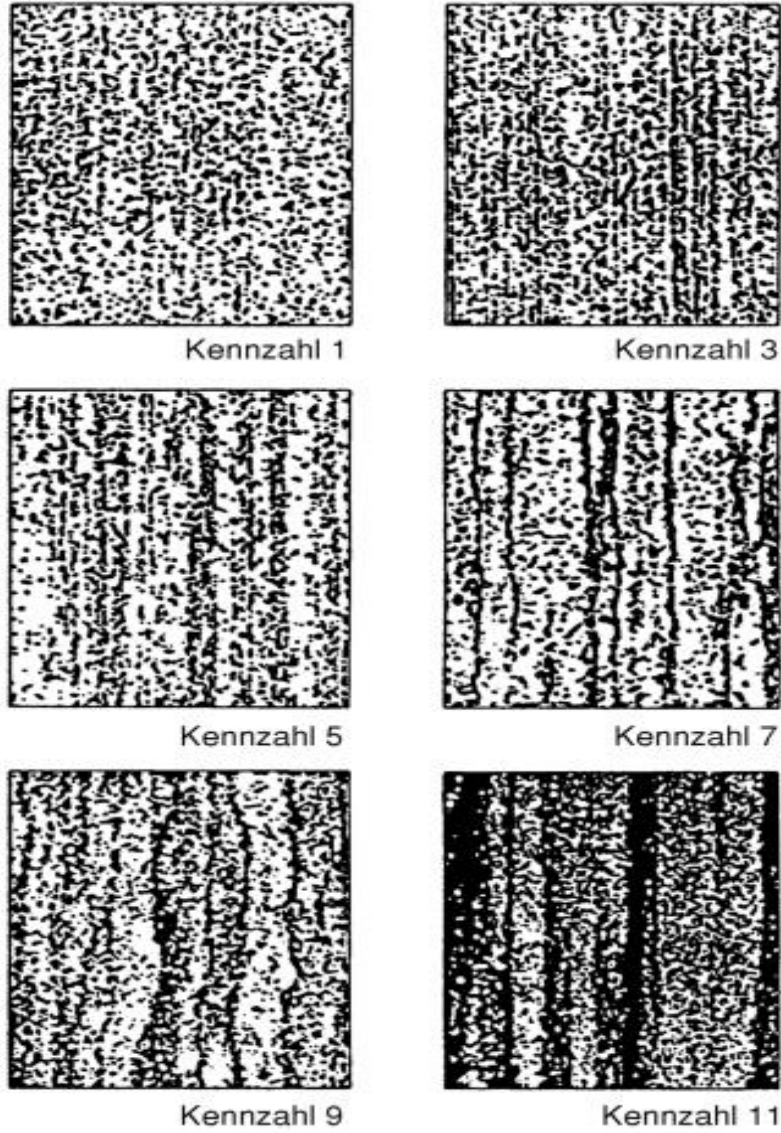
Ferrit çökelmesinin şeklini ve büyüklüğünü hesaplayan fiziksel mekanizma, östenitleme sıcaklığından soğutma sırasında ki karbon difüzyonudur. İzotermal tavlamadan sonra iyi bir yapı elde etmek için karbon difüzyon oranını düşüren veya soğutma sırasında karbon atomlarının difüzyon süresini kısıtlayan tüm önlemler yararlıdır.

Şekil 2.37, düşük alaşımlı çelik DIN 16MnCr5'in izotermal tavlama işleminden sonra oluşan üç yapıyı göstermektedir. Östenit sıcaklığından çok yavaş soğutmanın dönüşüm sıcaklığı, ferrit ve perlitin istenmeyen dokulu bir yapıyla sonuçlanır ve eğer bu soğutma işlemi sırasında perlit oluşumundan önce bir aşırı soğutma gerçekleşirse (yani, dönüşüm sıcaklığı çok düşük seçilmiştir) o zaman yapı içerisinde istenmeyen beynit fazı oluşacaktır (Wünning 1977).

Büyük şirketler genellikle Şekil 2.38'de gösterildiği gibi, işlenebilirlik açısından izotermal tavllanmış yapıların izin verilen tekstüre derecesini tahmin etmek için iç standartlara sahiptir. Söz konusu çelik için dönüşüm sıcaklığı ve gerekli dönüşüm süresi uygun IT diyagramı ile belirlenebilir. Şekil 2.39, çelik DIN 17CrNiMo6 için böyle bir diyagramı göstermektedir. Görüldüğü gibi, seçilen dönüşüm sıcaklığı ne kadar düşük olursa dönüşüm o kadar erken başlar, dönüşümü başlatmak için en kısa sürenin elde edildiği bir sıcaklığa (perlit burnu) kadar. Bu sıcaklığın altında, dönüşümü başlatmak için daha uzun süreler gereklidir. Perlit burnu sıcaklığı aralığında, ince lamel perlit oluşacak ve perlit dönüşümünü tamamlama süresi en kısadır (Spur ve Stöferle 1987).



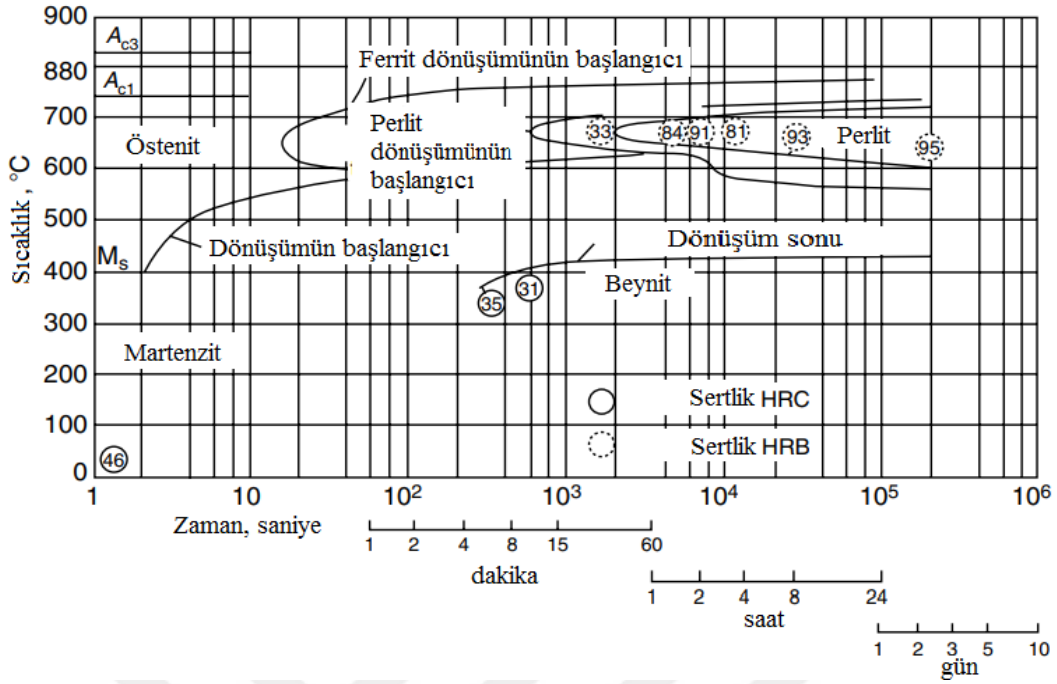
Şekil 2.37 Düşük alaşımlı çelik DIN 16MnCr5 (solda) izotermal tavlama sonrası farklı yapılar. İyi dağıtılmış ferrit-perlit; doğru tavlama (merkezi). Dokulu ferrit-perlit yapısı; östenitleşmeden dönüşüm sıcaklığına (sağda) çok yavaş soğutma. Ferrit-perlit+beynit; perlit dönüşümünden önce aşırı soğutma (Wünning 1977).



Şekil 2.38 Alman şirketi Edeltahlwerke Buderus A.G.-Wetzlar'ın iç standardı izotermal tavlamadan sonra yapının izin verilen tekstüre derecesinin tahmini. Büyütme 100x (Spur ve Stöferle 1987).

Alaşımız çelikler için, perlit burun sıcaklıkları 550 °C ile 580 °C arasında iken, alaşımlı çelikler için 640 °C ile 680 °C arasındadır. Optimum izotermal tavlama sıcaklığı, perlit burun sıcaklığının 10-20 °C üzerindedir.

Gerekli dönüşüm süresi çelikteki alaşım elementlerine bağlıdır. İzotermal tavlama uygulamasında, dönüşüm sıcaklığında tutma süresi, farklı çelik ısılarda kompozisyon toleransları nedeniyle yeterli bir rezerv içerir. Genellikle sementasyon işlemi uygulanan düşük alaşımlı çelikler ve sertleştirme ve temperleme işlemi uygulanan yapısal çelikler için dönüşüm süreleri 2 saatin altındadır (Spur ve Stöferle 1987).



Şekil 2.39 DIN 17CrNiMo6 çeliğinin izotermal dönüşüm (IT) diyagramı (Spur ve Stöferle 1987).

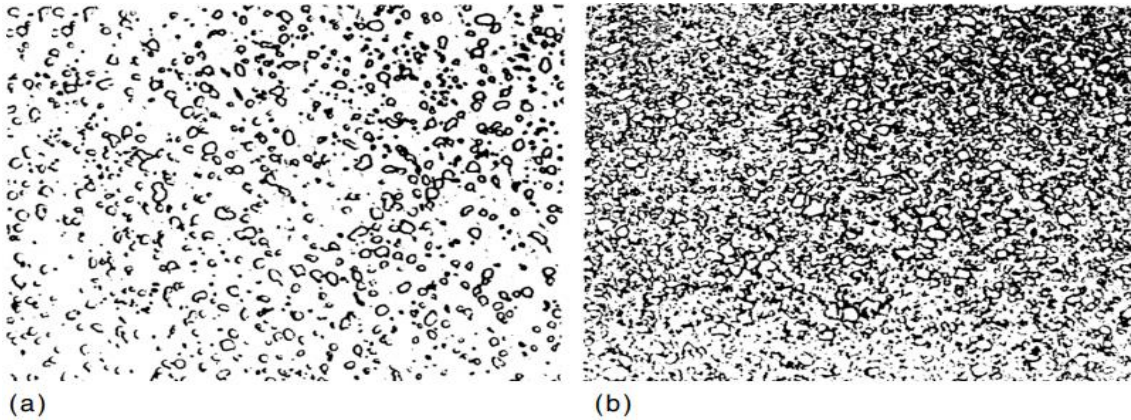
Teknik açıdan bakıldığında, bir iş parçasının izotermal olarak olması gerektiği gibi tavlandıktan sonra karşılaşılan en büyük sorun, östenitize sıcaklıktan seçilen dönüşüm sıcaklığına kadar herhangi bir aşırı soğutma olmadan yeterince hızlı soğutma gerçekleştirmektir. Bu soğutma işlemi birkaç faktöre bağlıdır ve ana faktörler parçaların yüzey ve ortam arasındaki östenitleme sıcaklığı ve soğutma ortam sıcaklığı ve ısı transfer katsayısı, yükleme düzenlemesi, sıcaklık farkı vardır.

2.4.4 Yumuşatma Tavlaması (Küreselleştirme Tavlaması)

Yumuşatma veya küreselleştirme tavlaması, A_{C1} sıcaklığının altında veya üstündeki yakın sıcaklıklarda tavlama işlemi olup, daha sonra yavaş soğutma ile birlikte uygulanmaktadır. Yumuşak tavlamadan önce çeliğin mikroyapısı ferrit–perlit (ötektoid altı çelikler), perlit (ötektik çelikler) veya sementit–perlit (ötektoid üstü çelikler)'dir. Bazen yumuşak tavlamadan önce daha önce sertleştirilmiş bir yapı mevcut olabilir. Yumuşak tavlamanın amacı perlit, beynit ve martenzit gibi tüm sert bileşenleri (özellikle %0,5'in üzerinde karbon içeriği olan çeliklerde ve takım çeliklerinde) ferritik matristeki küresel karbür yapısına dönüştürerek yumuşak bir yapı üretmektir.

Şekil 2.40, orta karbonlu düşük alaşımlı çeliğin yumuşak tavlama sonrasında (a) ve yüksek hız çeliğinin yumuşak tavlama sonrasında (b) oluşan küresel karbürlü yapıyı göstermektedir. Böyle yumuşak bir yapı, %0,6'dan fazla C'ye sahip çeliklerin iyi işlenebilirliği ve plastik deformasyon içeren tüm soğuk çalışma süreçleri için gereklidir. Soğuk şekillendirme işlemleri için malzemenin mukavemeti ve sertliği mümkün olduğunca düşük olmalıdır. İyi işlenebilirlik için orta mukavemet veya sertlik değerleri gereklidir. Bu nedenle, örneğin bilyalı rulmanlı çelikler yumuşak tavlama sonrasında genellikle bir sertlik toleransı belirtilir. Üretim sırasında yumuşak tavlama genellikle bir yarı mamulle (haddeleme veya dövme işleminden sonra) gerçekleştirilir ve işlemlerin sırası sıcak işlem, yumuşak tavlama, soğuk şekillendirme, sertleştirme ve temperlemedir (Spur ve Stöferle 1987).

Gerekli küreselleştirme derecesi (yani küresel sementit veya karbürlerin %80-90'ı) bazen belirtilir. Yumuşak tavlama sonrasında yapıyı değerlendirmek için, bilyalı rulman çeliği DIN 100Cr6 için Şekil 2.41'de gösterildiği gibi, elde edilen küresel sementit yüzdesini gösteren belirli bir çelik sınıfı için standartlar vardır. Küreselleşme derecesi bu durumda kalan lamel perlit yüzdesi olarak ifade edilir.



Şekil 2.40 (a) 720-740 °C'de yumuşak tavlama sonrasında orta karbonlu düşük alaşımlı çelik DIN 50CrMoV4 ve (b) 820 °C'de tavlama sonrasında yüksek hızlı çelik yapıları. Büyütme 500x (Spur ve Stöferle 1987).

Yumuşak tavlamanın fiziksel mekanizması, karbon difüzyonunun belirleyici olduğu ferrit matrisi içindeki sementit parçacıkların katılaşması esasına dayanır. Ferritik matris içindeki küresel sementit, demir-karbon sistemindeki tüm yapıların en düşük enerji içeriğine sahip yapıdır.

Karbon difüzyonu sıcaklık, zaman ve çelikteki alaşım elementlerinin türüne ve miktarına bağlıdır. Oda sıcaklığında çok düşük olan ferritteki karbonun çözünürlüğü (%0,02 C), A_{C1} sıcaklığına kadar önemli ölçüde artar. A_{C1} 'e yakın sıcaklıklarda karbon, demir ve alaşımlı atomların difüzyonu o kadar büyüktür ki, enerji içeriğini en aza indirecek şekilde yapıyı değiştirmek mümkündür.

Katılma derecesi ve yumuşak tavlamadan sonra karbürlerin boyutu da tavlamadan önceki başlangıç yapısına bağlıdır. Başlangıç yapısı perlit ise, karbürlerin küreselleşmesi sementit lamellerin katılması ile gerçekleşir. Bu süreç genel olarak iki aşamaya ayrılabilir. İlk başta sementit lameller Şekil 2.42'de gösterildiği gibi bir mafsallık kemikli şeklini alır. Tavlama devam ettikçe, lameller uçlarında kürecikler oluşturur ve sınır yüzey enerjisi sayesinde küreler ayrılır ve bu durum küreselleştirme olarak adlandırılır. İkinci aşamada sementit karbürler birleşerek büyür. Her iki aşamada da, bu işlemin oranı difüzyon ile kontrol edilir. Sementit lamelleri ne kadar kalın olursa, bu işlem için daha fazla enerji gereklidir. İnce lamel perlit yapısı daha kolay bir şekilde küresel bir forma dönüştürülebilir (Thelning 1984).

Yumuşak tavlama için proses parametrelerinin oluşturulmasında, ötektoid altı karbon çelikleri, ötektoid üstü karbon çelikleri ve alaşımlı çelikler arasında bir ayrım yapılmalıdır. Her durumda ilgili A_{C1} sıcaklığının değeri bilinmelidir. Bu değer ilgili IT veya SSD diyagramından alınabilir veya denklem 2.21'e göre hesaplanabilir.

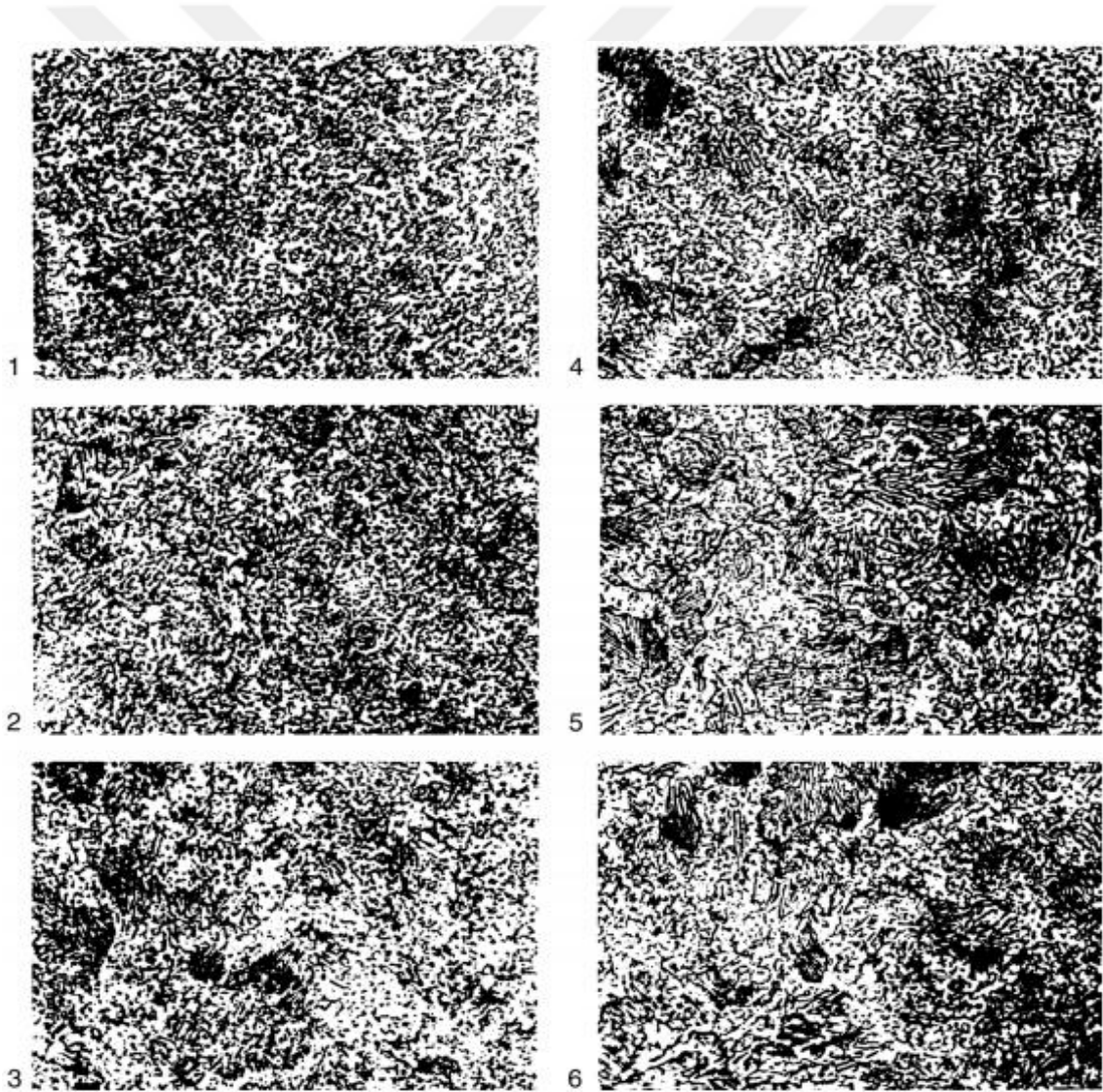
$$A_{C1} = 739 - 22(\% C) + 2(\% Si) - 7(\% Mn) + 14(\% Cr) + 13(\% Mo) + 13(\% Ni) + 20(\% V), [^{\circ}C] \quad (2.21)$$

Alaşımsız karbon çeliklerinin yumuşak tavlama için sıcaklık aralığı Şekil 2.43'de gösterildiği gibi demir-karbon diyagramından alınabilir. Seçilen sıcaklıktaki bekleme süresi iş parçası kesitinin yaklaşık 1 dk/mm'dir.

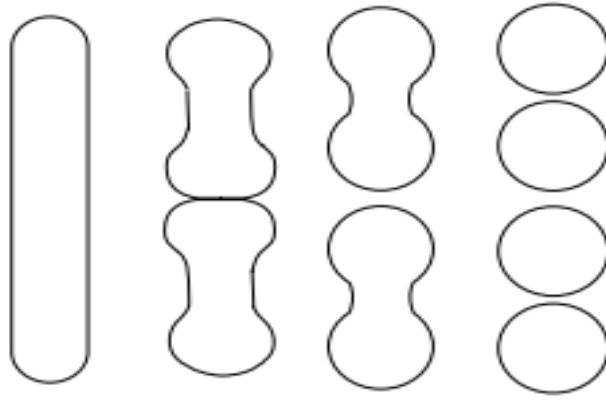
Alaşımlı çelikler için yumuşak tavlama sıcaklığı ampirik formüle göre hesaplanabilir. Bu formül denklem 2.22’de gösterilmiştir.

$$T = 705 + 20(\% Si - \% Mn + \% Cr - \% Mo - \% Ni + \% W) + 100(\% V)[^{\circ}C] \quad (2.22)$$

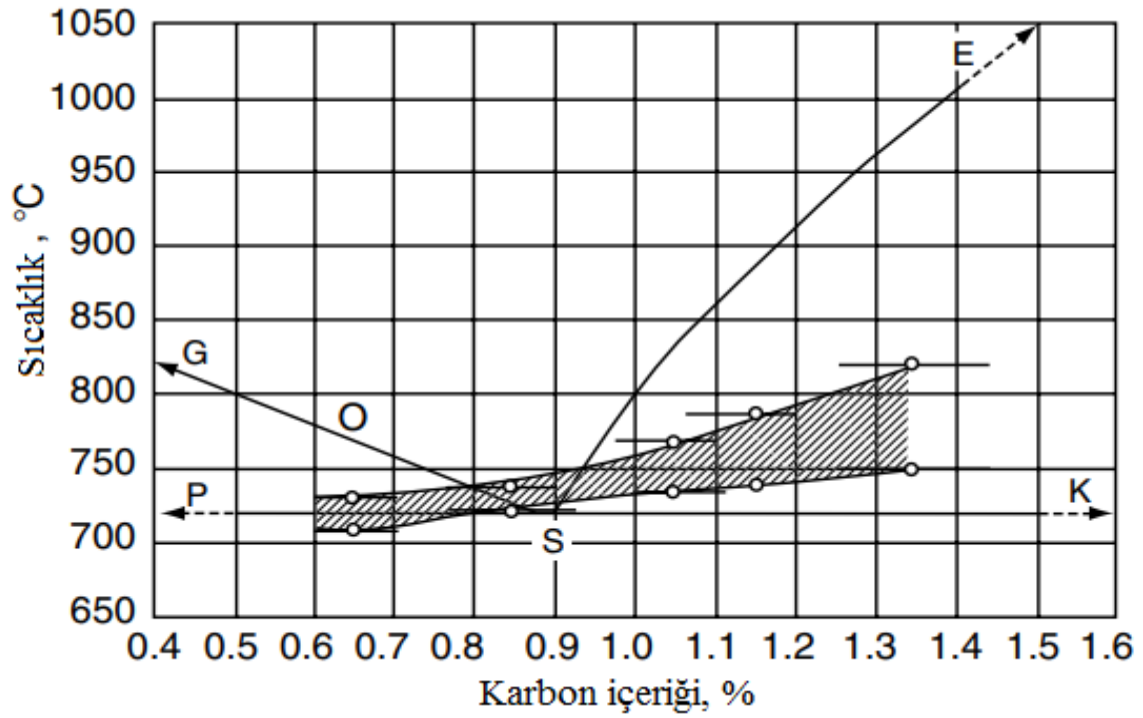
Bu formül sadece alaşım elementlerinin şu değerlerine kadar geçerlidir: %0,9 C; %1,8 Si; %1,1 Mn; %1,8 Cr; %0,5 Mo; %5 Ni; %0,5 W ve %0,25 V. Eğer çelik daha yüksek miktarda alaşım elementine sahipse, yalnızca bu belirtilen maksimum değerler dikkate alınmalıdır.



Şekil 2.41 Alman şirketi Edelstahlwerke Buderus A.G.-Wetzlar'ın DIN 100Cr6 çeliğinin yumuşak tavlama sonrasında küreselleşme derecesinin değerlendirilmesi için iç standardı. Büyütme 500x (Spur ve Stöferle 1987).

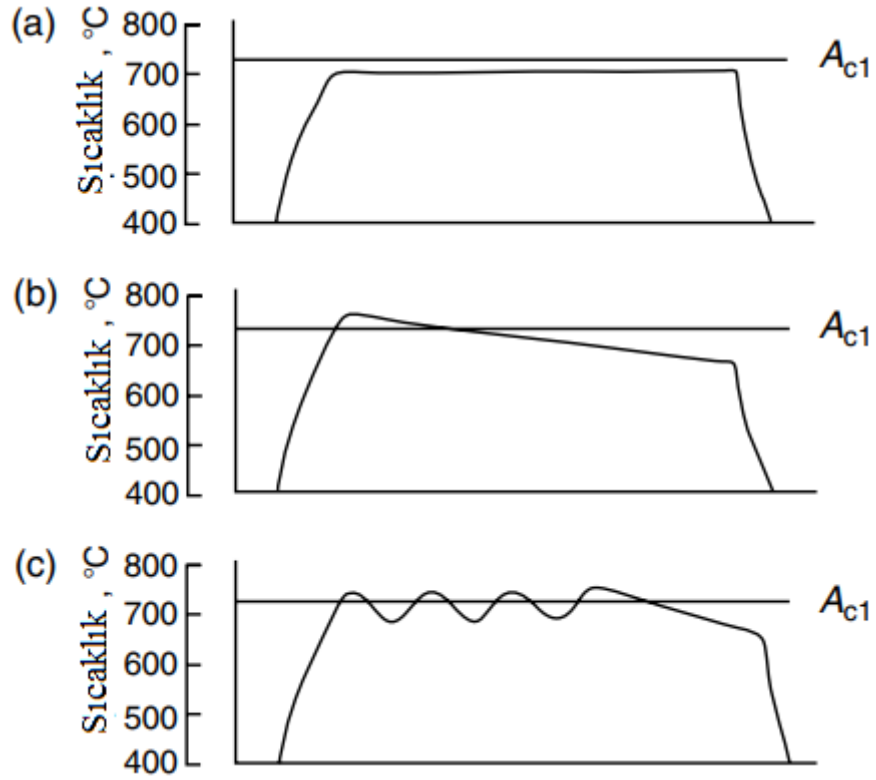


Şekil 2.42 Yumuşak tavlama sırasında sementit lamelini sferoitlere dönüştürme sürecinin şematik sunumu (Thelning 1984).

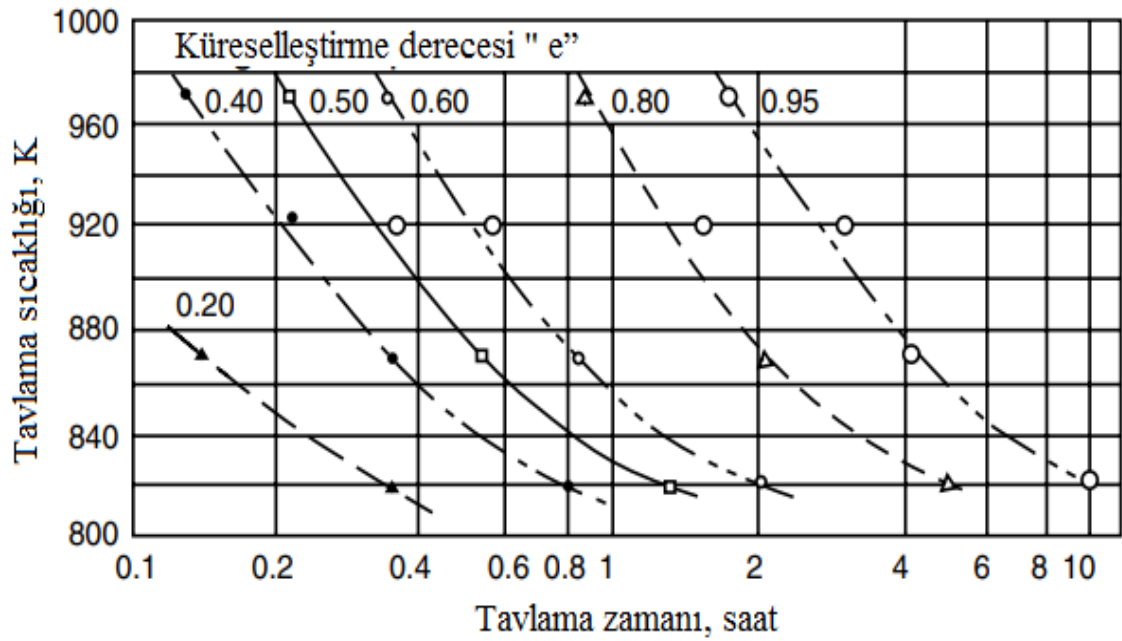


Şekil 2.43 Karbon içeriği %0,6–1,35 C olan alaşımsız çeliklerin yumuşak tavlama için 4 sıcaklık aralığı (Spur ve Stöferle 1987).

Şekil 2.44 yumuşak tavlama için olası sıcaklık-zaman rejimlerini göstermektedir. Dalgalı eğriler (Şekil 2.44c), sementit lamellerin küresel forma dönüşmesini hızlandırmak için kullanılır. Sıcaklığın A_{C1} üzerinde yükseltilmesi, sementit lamellerin çözünmesini kolaylaştırır. A_{C1} 'in altında devam eden soğutmada, bu çözünme işlemi son bulur ve çözünen (sınır yüzey enerjisine daha az dirençli olan) parçalar daha kolay ve hızlı bir şekilde katılaşır (Spur ve Stöferle 1987).



Şekil 2.44 Yumuşak tavlama sıcaklık-zaman rejimleri. (a) Alaşımsız çelikler ve bey nitik veya martenitik başlangıç yapısına sahip alaşımlı çelikler için A_{C1} 'in altında 20 °C'de tavlama; (b) A_{C1} 'in üstünde 10 °C'de tavlama (başlangıç) ve alaşımlı çelikler için A_{C1} 'in altında 30 °C'ye düşürme; (c) hiper ötektoid çelikler için A_{C1} yaklaşık ± 5 °C tavlama (Spur ve Stöferle 1987).

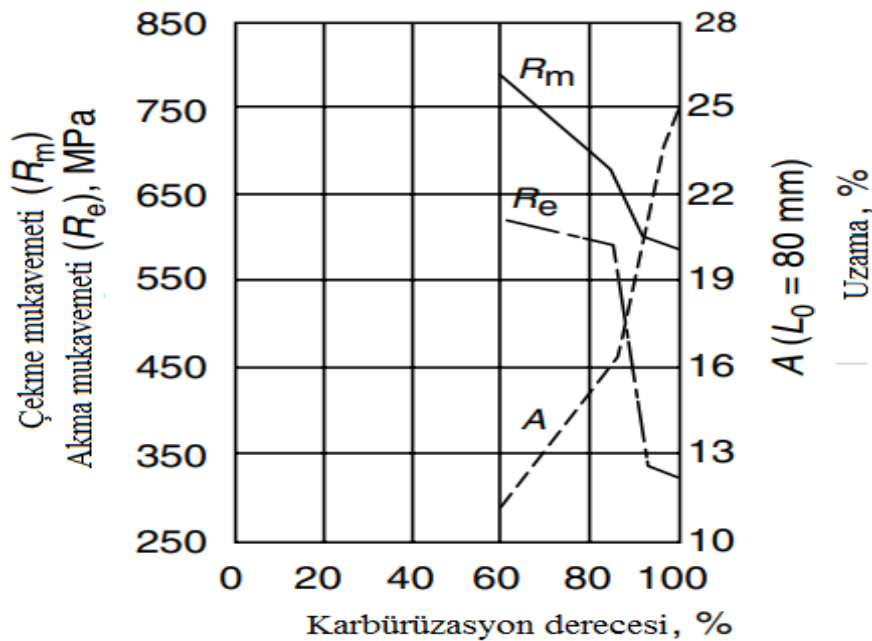


Şekil 2.45 Gerekli sferodizasyon derecesini elde etmek için alaşımsız çelik DIN C35'in yumuşak tavlama için zaman-sıcaklık diyagramı (Köstler 1987).

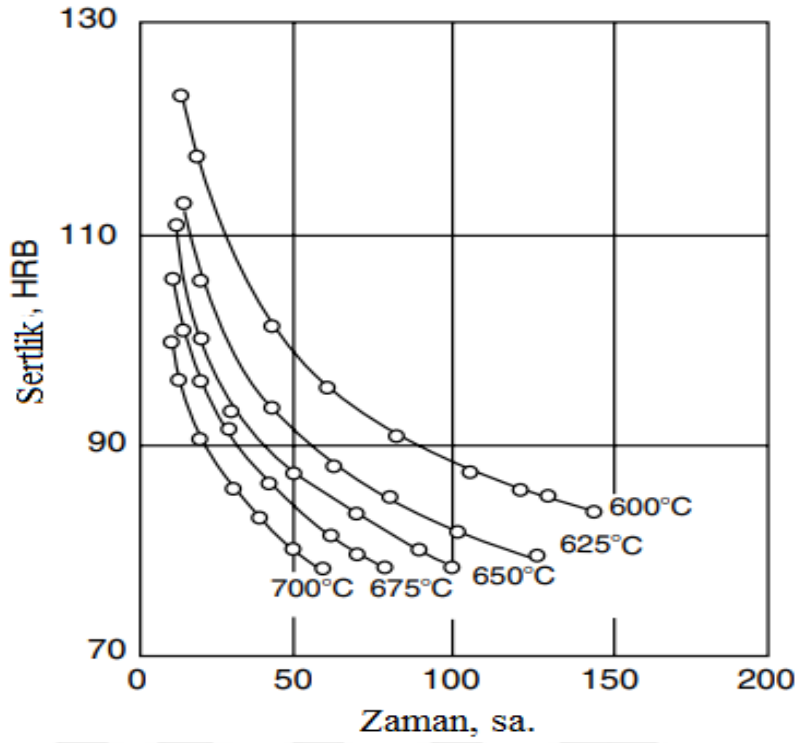
Köstler (1987) in araştırmaları esas alınarak, yumuşak tavlamadan sonra bir çelikteki toplam sementit miktarına kıyasla küresel sementit miktarını veren bir derece küreselleştirme dereceleri belirlenmiştir. $e=1$, küresel sementitin %100'ünün (yani, lamelli sementit yok) kaldığı anlamına gelir. Küreselleştirme derecesi yumuşak tavlama işleminin zaman ve sıcaklığına bağlı olduğundan, küreselleştirme derecesini yumuşak tavlamanın zaman ve sıcaklığı ile ilişkilendiren diyagramlar oluşturulabilir. şekil 2.45 alaşımsız elik DIN C35 için böyle bir diyagramı göstermektedir (Köstler 1987).

Küreselleştirme derecesi, özellikle %80'in üzerinde ($e:0.8$), nihai çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve uzama üzerinde şekil 2.46'da alaşımsız ötektoid elik DIN C75 için önemli bir etkiye sahiptir. Yumuşak tavlama sonrası sertlik şekil 2.47'de %0,89 C ile alaşımsız bir elik için gösterildiği gibi, küreselleştirme zaman ve sıcaklığına bağlıdır (Eckstein 1987).

şekil 2.48'de gösterildiği gibi, %0,6'dan fazla C'ye sahip çeliklerin işlenebilirliği yumuşak tavlama ile artırılabilir; bu sayede çekme mukavemetinin azaltılması ve küreselleştirme derecesinin artırılmasının m/dk'da daha yüksek bir dönüş hızına (v_{60}) izin verdiği görülebilir.



şekil 2.46 Nihai ekme mukavemeti, akma mukavemeti ve alaşımsız DIN C75 ötektoid çeliğin artan karbürizasyonu ile uzama değişimi (Eckstein 1987).



Şekil 2.47 Karbürüzasyon süresine ve sıcaklığına bağlı olarak yumuşak tavlamadan sonra %0,89 C içeren alaşımsız bir çeliğin sertliği (Eckstein 1987).

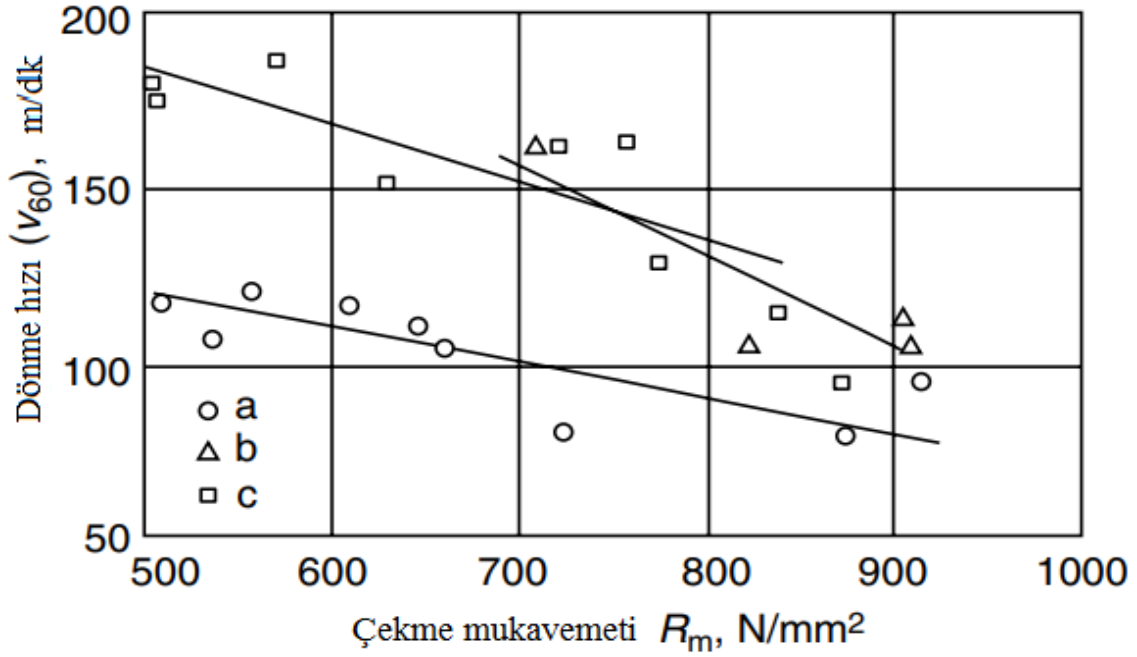
Yumuşak tavlamadan sonra soğutma genellikle yavaş olmalıdır. Çelik sınıfına bağlı olarak soğutma aşağıdaki gibi yapılmalıdır:

- 650 °C'ye kadar düşük alaşımlı çelikler için, soğutma oranı 20–25 K/sa. (fırında soğutma)
- 630 °C'ye kadar orta alaşımlı çelikler için, soğutma oranı 15-20 K/sa. (fırın soğutma)
- 600 °C'ye kadar yüksek alaşımlı çelikler için, soğutma oranı 10–15 K/sa. (fırın soğutma)
- Belirtilen sıcaklıkların altında daha fazla soğutma genellikle havada yapılır

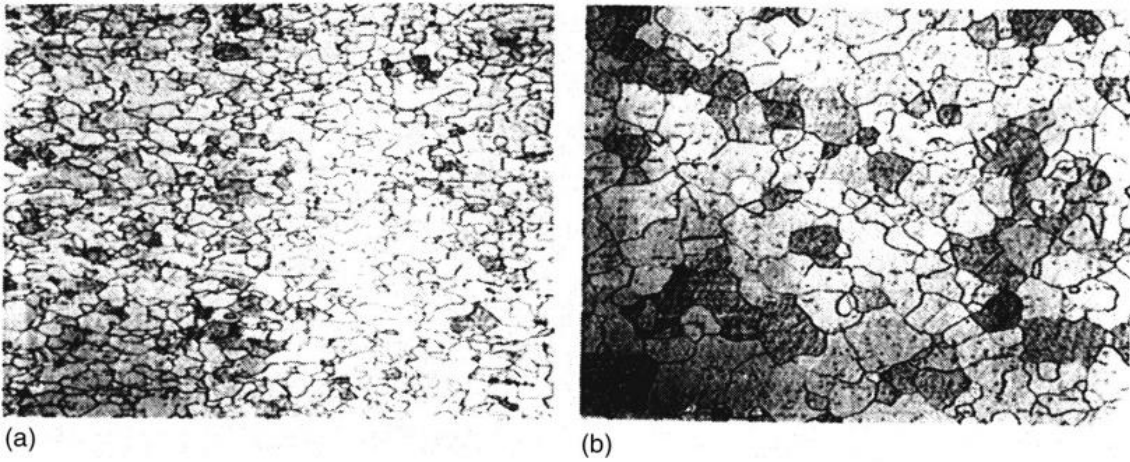
2.4.5 Rekristalizasyon (Yeniden Kristalleşme) Tavlaması

Rekristalizasyon tavlaması soğuk haddeleme, derin çekme veya tel çekme gibi soğuk şekillendirme işleminden sonra var olan yapıdaki özelliklerin yenilenmesini ve değişimlerini amaçlayan, faz dönüşümü olmaksızın soğuk işlenmiş malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda tavlama işlemidir (Thelning 1984).

Soğuk şekillendirme işlemine ve daha sonra rekristalizasyona tabi tutulacak malzemeler iyi soğuk şekillendirme yeteneğine sahip olmalıdır. Bu malzemeler arasında yumuşak alaşımsız çelikler, derin çekme için mikro alaşımsız çelikler, mikro alaşımsız yüksek mukavemetli çelikler, alaşımsız ve alaşımlı karbon çelikleri, paslanmaz çelikler ve yumuşak manyetik çelikler bulunur (Spur ve Stöferle 1987).

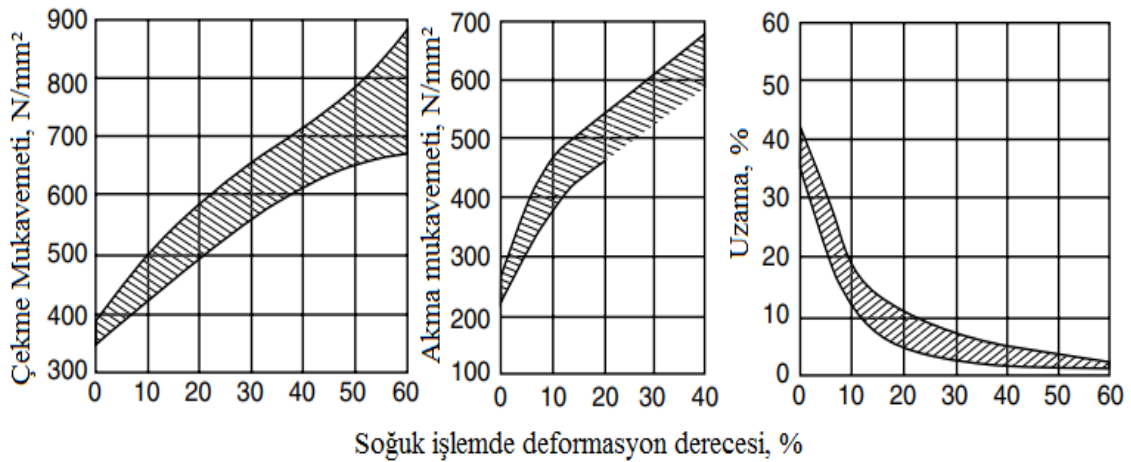


Şekil 2.48 Sementasyon, sertleştirme ve temperleme için yapısal çeliklerin işlenebilirliği üzerine nihai çekme mukavemeti ve karbürüzasyon derecesinin etkisi. (a) Karbürüzasyon derecesi %30'dan az; (b) karbürüzasyon derecesi %40 ila %60 arasında; (c) karbürüzasyon derecesi %70'den büyük (Spur ve Stöferle 1987).



Şekil 2.49 %0,05 düşük karbonlu çelik (a) soğuk çalışma ile %20 azalma (sertlik 130 HV) ve (b) 750 °C'de sonraki yeniden kristalleştirme tavlamasından sonra (sertlik 75 HV). Büyütme 200x (Thelning 1984).

Tavlama üzerinde yeniden kristalleşmenin ön koşulu, soğuk çalışma sırasında deformasyon derecesinin çekirdeklenmeyi başlatmak için kristallerde gerekli sayıda kusur üretecek kadar büyük olmasıdır, bu da daha sonra tane büyümesi ile takip edilir. Şekil 2.49, soğuk çalışmadan sonra düşük karbonlu bir çeliğin mikroyapısını (a) ve daha sonra yeniden kristalleşme tavlama işleminden sonra ki mikroyapıyı (b) göstermektedir. Metalik malzemelerin soğuk çalışması sırasında, deformasyon için uygulanan enerjinin çok büyük kısmı ısıya dönüştürülür, ancak nispeten küçük bir parçası (%5'ten az) kristal kafes kusurlarının oluşması nedeniyle malzemede birikmeye devam eder. Her soğuk çalışma sürecinin (yani, malzemenin plastik deformasyonu), bazı büyüklük dereceleri ile dislokasyon yoğunluğunu arttırdığı bilinen bir gerçektir. Her dislokasyon, iç gerilmelerle ilişkili bir kristal kusur olduğundan dislokasyon yoğunluğundaki artış, iç gerilmelerin (yani iç enerjinin) birikmesine neden olur ve böylece serbest entalpiyi artırır. Soğuk şekillendirme işleminde plastik deformasyon ne kadar büyük olursa, çekme mukavemetinde ve akma mukavemetinde bir artış ve Şekil 2.50'de gösterildiği gibi uzamada bir azalma ile karakterize edilen malzemenin güçlendirilmesi o kadar büyük olur. Malzeme daha sert ve daha kırılgan hale gelir, böylece bazı durumlarda şekillendirme işleminde tekrar rekristalizasyon tavlama olmadan uygulanamaz. Ayrıca, malzemenin anizotropisi yani mekanik özelliklerin soğuk şekillendirme sürecinin yönüne bağımlılığı, bir yönde deforme olan yönlendirilmiş taneleri orijinal küresel forma geri getirerek yeniden kristalizasyon tavlama ile küreselleştirilir (Spur ve Stöferle 1987).



Şekil 2.50 Soğuk haddelendirme işlemi ile düşük karbonlu bir çeliğin mukavemetinin artırılması (Spur ve Stöferle 1987).

Yeniden kristalizasyon tavlamasında sıcaklığın artırılması, orijinal yapıyı (soğuk çalışmadan önce) dislokasyon yoğunluğu ile yeniden oluşturmak için kullanılabilir, bu da sertlik ve mukavemetin azalmasına ve sünekliğin ve şekillendirilebilirliğin artmasına neden olur. Yeniden kristalleşme tavlama işlemi süreçleri: toparlanma, dislokasyonların dizilmesi, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi.

2.4.5.1 Toparlanma

Toparlanma, düşük sıcaklıklarda (150-350 °C) soğuk işlenmiş metalik bir yapıyı, mikroyapıda fark edilebilir değişikliklere neden olmadan temperleme işlemidir. Sadece malzemenin mukavemetini önemli ölçüde düşürmeden iç gerilmelerin azaltılmasına neden olur. Bununla birlikte, bu işlem sırasında soğuk işlenmiş malzemenin elektriksel direncinde ve sıcaklık katsayısında karakteristik değişiklikler meydana gelir. Toparlanma için gerekli olan aktivasyon enerjisi, soğuk çalışma derecesine bağlıdır. Deformasyon derecesi ne kadar yüksek olursa gerekli aktivasyon enerjisi o kadar az olur. Toparlanma sıcaklığı, formüle göre aynı malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı ile ilişkilidir. Bu formül denklem 2.23’de gösterilmiştir.

$$T_{GR} = T_R - 300[^\circ\text{C}] \quad (2.23)$$

Yukarıdaki denklemde,

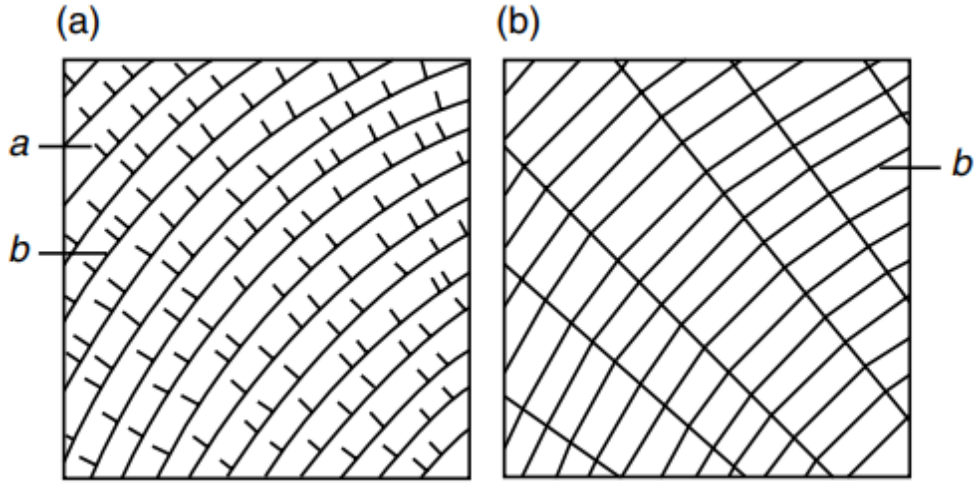
T_{GR} = Toparlanma sıcaklığı (°C)

T_R = Yeniden kristalleşme sıcaklığı (°C)

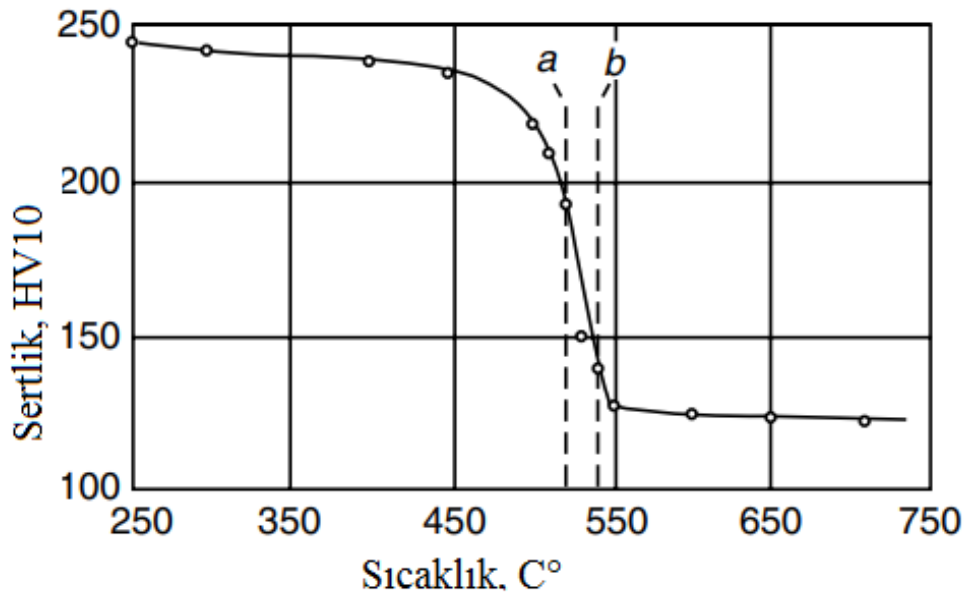
2.4.5.2 Poliganizasyon (Dislokasyonların Yeniden Dizilmesi)

Soğuk işlenmiş bir yapının poliganizasyonu, toparlanma sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleşen metalik kristal kafesteki kenar dislokasyonlarının yeni bir çokgen düzenlemesinin oluşturulmasıdır. Şekil 2.51’de gösterildiği gibi, böyle bir durumda uygulanan termal enerji kenar dislokasyonlarını yeniden düzenlemek için yeterlidir (Spur ve Stöferle 1987).

Bu durumda, başlangıçta bükülmüş kayan düzlemler, alt taneler adı verilen bir tane içinde bölümler oluşturan çokgen bir şekle sahiptir. İç gerilmelerin giderilmesiyle önemli bir enerji deşarjının sonucu olarak, malzeme mukavemeti azaltılır. Poliganizasyon esas olarak soğuk işlenmiş yapılarda, özellikle ferritik matrislerde yeniden kristalleşme sıcaklığının altında gerçekleşir.



Şekil 2.51 Poliganizasyonun şematik gösterimi. Kenar dislokasyonunun ve kayma düzlemlerinin (a) poliganizasyondan önce ve (b) poliganizasyondan sonra düzenlenmesi. a, Kenar dislokasyonları; b, kayma düzlemleri (Spur ve Stöferle 1987).



Şekil 2.52 Tavlama sıcaklığının bir fonksiyonu olarak, soğuk haddelenmiş %0,03 C, %0,54 Si ve %0,20 Mn'ye sahip bir çeliğin yeniden kristalleştirilmesi sırasında sertliğin azalması (Isıtma hızı 20 °C/sa.). a, Yeni tanelerin oluşumunun başlaması; b, yeni tanelerin oluşumunun son bulması (Spur ve Stöferle 1987).

2.4.5.3 Yeniden Kristalleşme ve Tane Büyümesi

Yeniden kristalleşme işlemi, yeniden kristalleşme sıcaklığı aşıldığında başlar. Bir malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı, Şekil 2.52’de gösterildiği gibi soğuk işlenmiş bir mikro yapı içinde yeni taneciklerin oluşumunun başladığı sıcaklıktır. Bu şekilden, söz konusu çelik için yeniden kristalleşme sıcaklığının 520 °C olduğu sonucuna varılabilir. Yeniden kristalleşme esnasında, Şekil 2.52’de görülebileceği gibi, süneklik artarken sertlik ve mukavemet önemli ölçüde azalır. Uygulamada, yeniden kristalleşme sıcaklığı T_R genellikle yeniden kristalleşmenin olduğu soğuk işlenmiş bir malzemenin sıcaklığı olarak kabul edilir. 1 saat tavlama işleminden sonra tamamlanır. Yeniden kristalizasyon sıcaklığı (T_R) ile malzemenin ergime sıcaklığı (T_M) arasında bir bağıntı vardır, bu bağıntı denklem 2.24’de verilmiştir.

$$T_R = 0.4T_M \quad (2.24)$$

Yeniden kristalizasyon sıcaklığı, soğuk çalışma sırasındaki deformasyon derecesi, ısıtma hızı ve başlangıç mikroyapısından etkilenebilir. Toparlanma sürecinin aksine yeniden kristalleşme süreci sadece çekirdeklenme döneminden sonra başlar, yavaş başlar, maksimum orana ulaşır ve yavaşça biter. Yeni tanelerin yetiştiği çekirdekler tercihen sıkıştırılmış soğuk işlenmiş tanelerin tane sınırlarında bulunur.

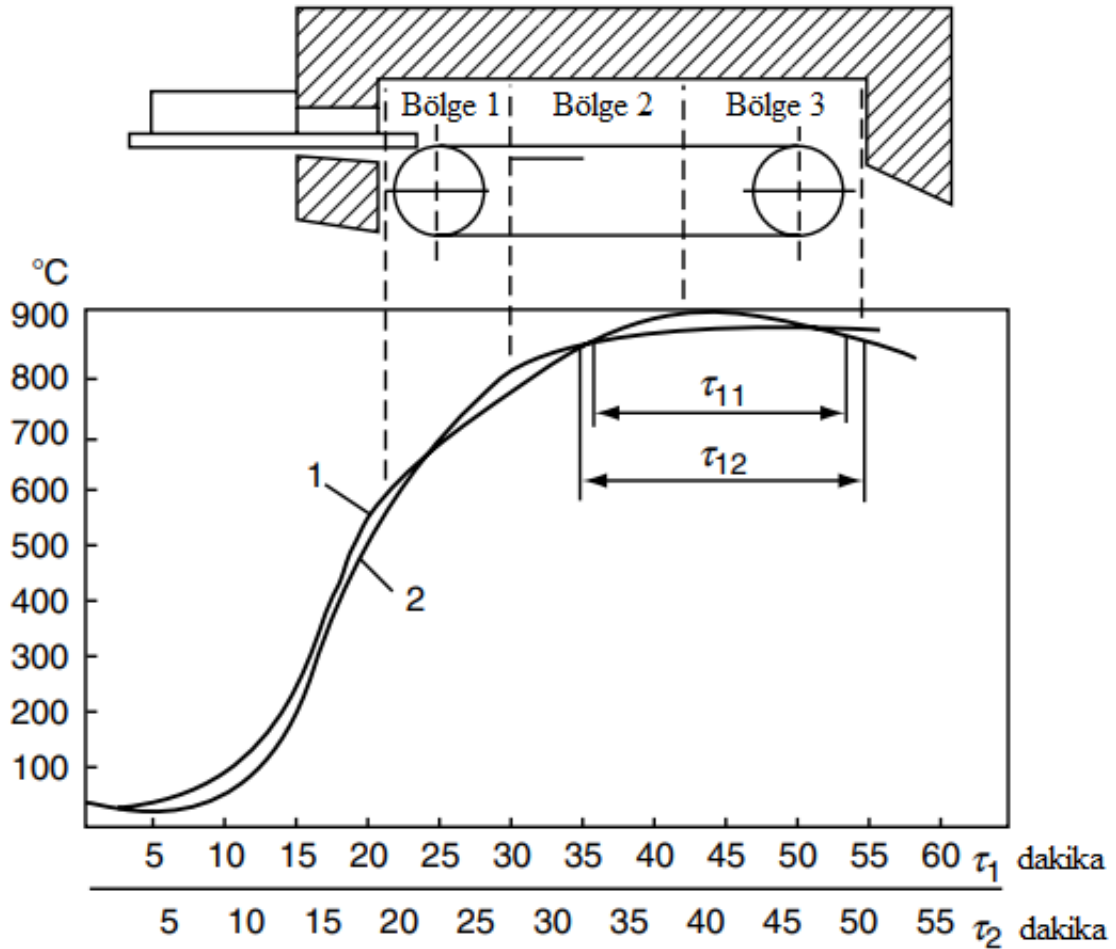
2.5 Fırın Transfer Mekanizmaları

Isıl işlem fırınları yığın, yarı sürekli veya sürekli olarak sınıflandırılır. Isıl işlem endüstrisinde en yaygın ve çok yönlü olan yığın fırınlarda, parçalar tipik olarak fırın girişinde sabit tutulur. Fırın tek bir işlemle yüklenir veya boşaltılır.

Sürekli fırınlarda, parça Şekil 2.53’de gösterildiği gibi farklı sıcaklıklarda farklı bölgelerden geçer. Isıl işlem görmüş parçalar sürekli olarak devam eden proseste fırından geçirilir (Kulakov 1981).

Yarı sürekli fırınlarda, parçalar sürekli fakat kademeli olarak hareket eder. Örneğin, bir tabla veya bir sepet içinde fırın boyunca hareket edebilir. Tabla veya sepet içerisinde fırında şarj edilir ve sonrasında soğutulur. Soğutma döngüsü tamamlandıktan sonra, tabla veya sepet hareket eder, ardından fırından tahliye edilir ve soğutulur ve işlem kademeli olarak devam eder.

Bu tartışma amacıyla, yarı sürekli fırınlar sürekli olarak kabul edilir. Tartışılan yığın tip fırınlar arasında kutu, çukur, bütünsel söndürme (IQ) ve tip-up (hem dairesel hem de araba tabanı) bulunur. Burada tartışılan sürekli tip fırınlar arasında yürüyen kiriş, döner fırın, itici, makaralı fırın, konveyör, sarsak tabanlı fırın, vidalı konveyör ve döner imbik bulunmaktadır.

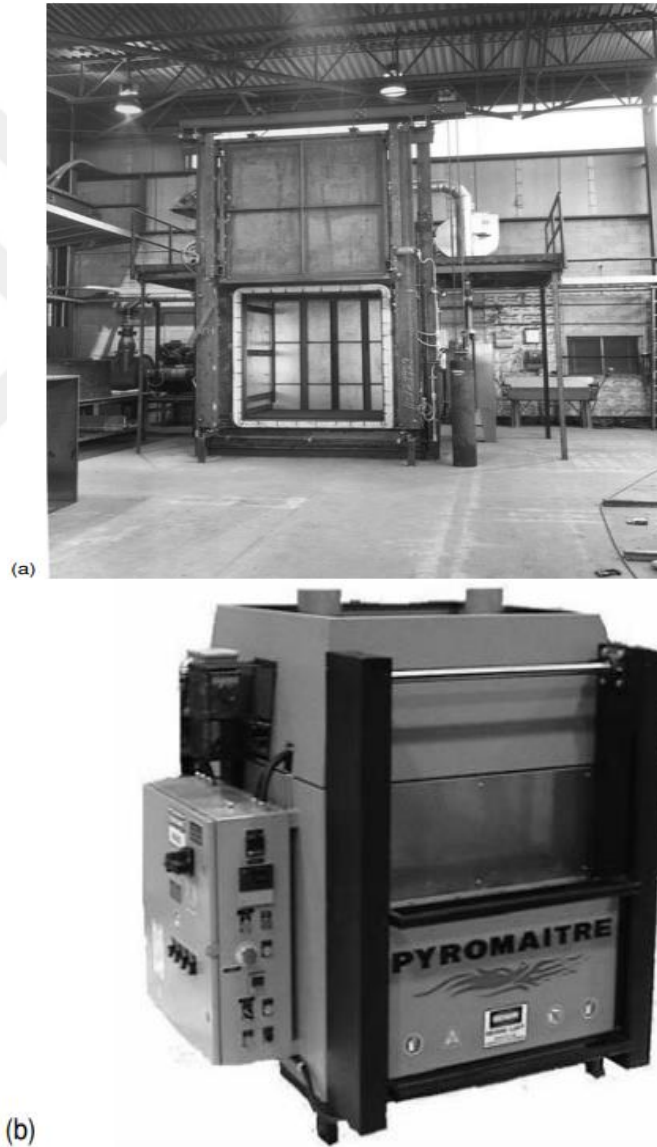


Şekil 2.53 Sürekli bir fırın içerisindeki mesafe ile sıcaklık değişimi (Kulakov 1981).

2.5.1 Yığın Fırınları

2.5.1.1 Kutu Fırınları

Resim 2.1'de gösterilen kutu fırını, en basit ısıtma işlem fırınıdır. Temperleme, tavlama, normalleştirme, gerilim giderme ve yığın sementasyon için kullanılır. 95-1095 °C gibi geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilir (İnt.Kyn.1).

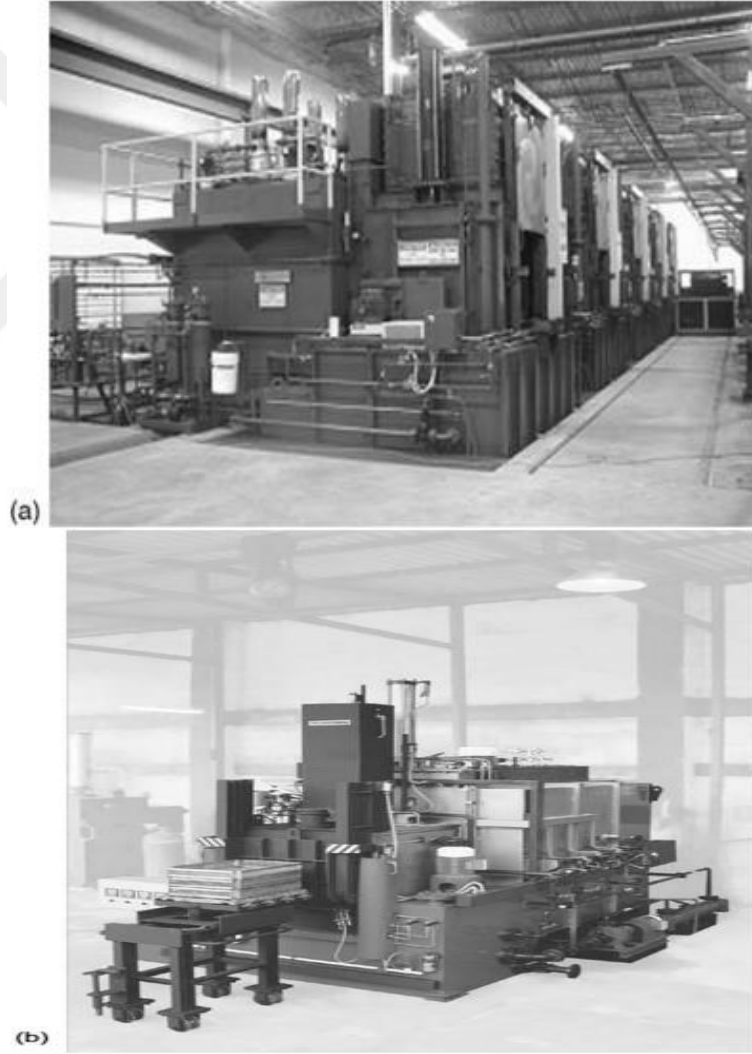


Resim 2.1 (a) Elektrikle ısıtılan kutu fırını. (b) Küçük parçaları ısıtmak için kullanılan küçük 'yüksek hızlı' laboratuvar fırını ve aynı zamanda üretim ölçekli sürekli gerilim giderici fırınlar için gerilim giderici ve temperleme süreçleri geliştirmek için ısıtma ve soğutma döngülerini modellemek için kontrol edilebilir (İnt.Kyn.1).

2.5.1.2 Atmosfer Kontrollü (Integral Quench) Isıl İşlem Fırını

Atmosfer kontrollü fırınlar (IQ), küçük parçaların ısıtılması için en yaygın kullanılan ve en değişik fırınlardır. Normalleştirme ve gerilim gidermeye ek olarak inert veya atmosfer kontrollü sertleştirme işlemleri için kullanılabilirler.

Atmosfer kontrollü fırınlar kutu fırınlarına benzer, ancak soğutma tankı Resim 2.2'de gösterildiği gibi fırının boşaltma ucunda bulunur. Parçalar fırından çıkarıldığında, ısıtılmış işlem görmüş parçaları tutmak için kullanılan sepetler bir asansör ile soğutma ortamına indirilir (Thelning 1984).



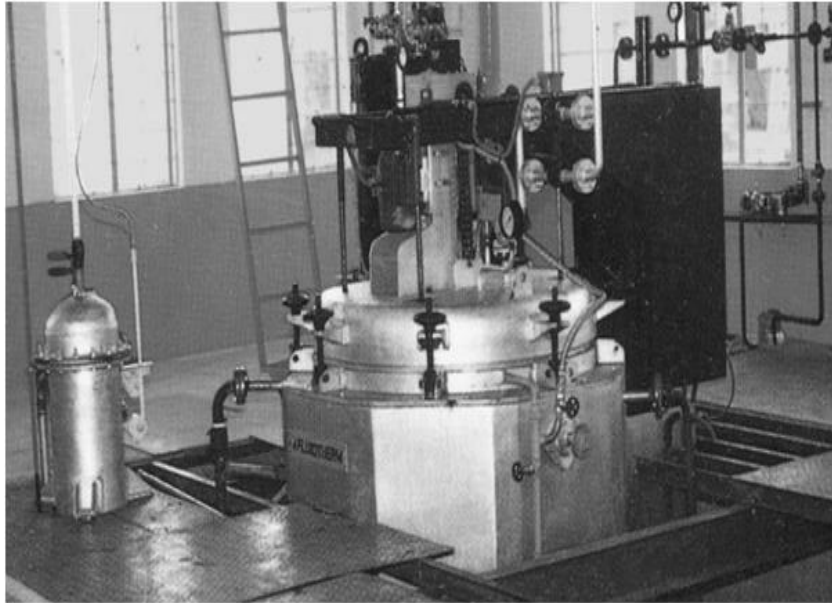
Resim 2.2 (a) Kapalı atmosfer kontrollü fırın. (b) Kompakt yığın entegre su verme fırını (Thelning 1984).

Sabit söndürme tankı bir dezavantaj olabilir, çünkü sepetlerin banyo yüklemesi ve yüksekliği söndürülebiyecek parçaların boyutunu kısıtlar (Ruffler 1982). Başka bir sınırlayıcı faktör ısıtma odasının boyutudur.

Ekonomik açıdan, ısıtma işlemi uygulanacak parça miktarına göre mevcut en büyük fırının kullanılması tercih edilmelidir. Fırın tasarımıındaki gelişmeler, her zamankinden daha fazla otomasyona, çevrim sürelerinin kısalmasına ve bu fırınların yakıt verimliliğinin artmasına neden olmuştur (Anonim 1988).

2.5.1.3 Çukur Tipi Isıl İşlem Fırını

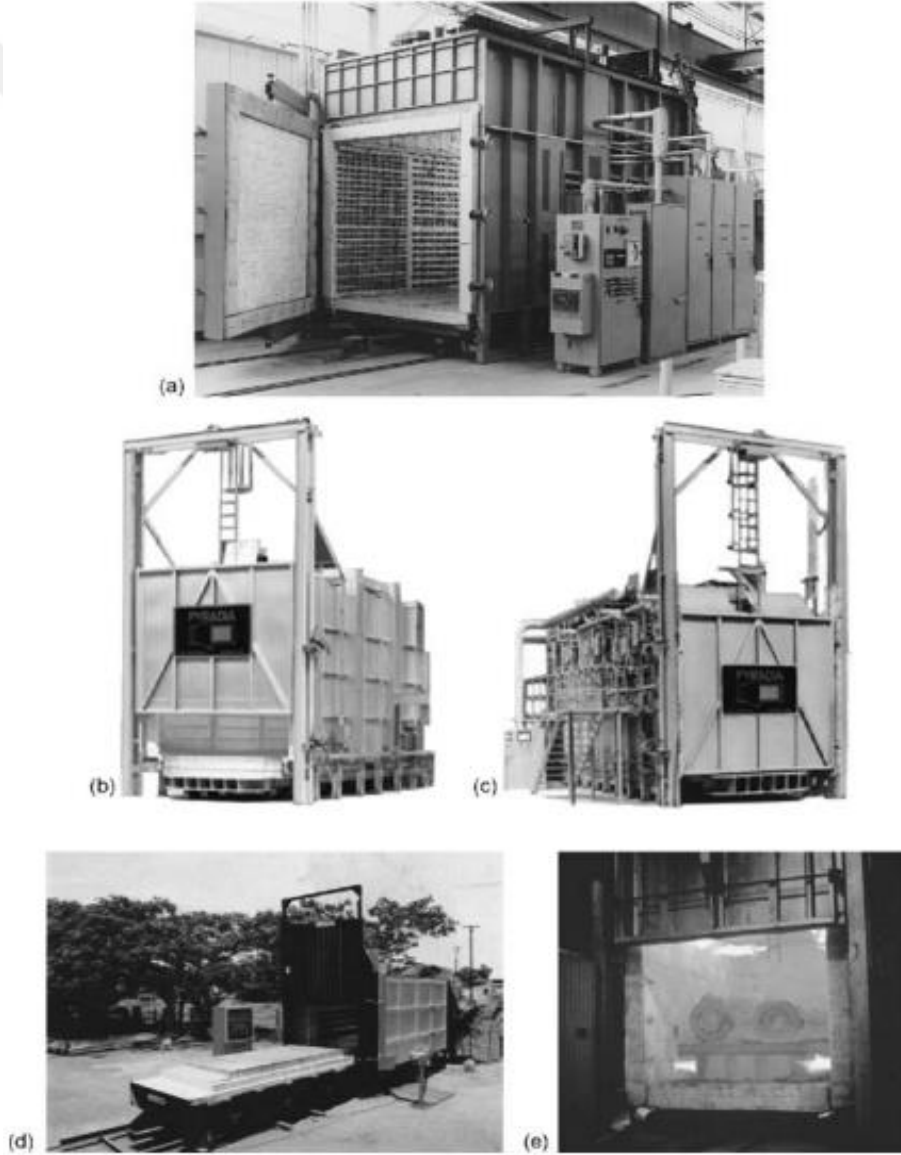
Çukur fırınları, zemine veya çukura monte edilebilen dairesel fırınlardır. Tavlama, sementasyon, temperleme, normalleştirme ve gerilim giderme gibi işlemler için kullanılırlar. Dairesel fırının avantajlarından bazıları, kutu veya dikdörtgen fırınlara kıyasla daha küçük ısı salınım alanları, daha homojen atmosfer, geliştirilmiş sıcaklık dağılımı ve ağırlık bakımından daha hafif olması. Bir çukur fırını örneği Resim 2.3'te gösterilmiştir (Anonim 1994). Bu tür çukur fırınlar karbürizasyon veya nitrasyon işlemleri için de kullanılabilir.



Resim 2.3 Çukur tipi ısıtma işlem fırını (Thelning 1984).

2.5.1.4 Araba Tabanlı Isıl İşlem Fırını

Araba tabanlı fırınlar, dişliler ve dövme parçalar gibi çok büyük parçaların ısıtılma işlemlerinde kullanılır (Anonim 1988). Sementasyon, tavlama, sertleştirme, normalleştirme, gerilim giderme ve temperleme için kullanılabilirler (Hupper 1980). Fırının tabanı raylar üzerinde hareket eden, refrakter kaplı vagon şeklinde düz bir yapıdır. Bazı fırınlar aynı uçtan yüklenir ve boşaltılır. Diğerleri bir ucundan yüklenir ve diğer ucundan boşaltılır. Yine birden fazla fırın tabanı kullanımına izin vermek için bazı fırınlar yandan yüklenebilir. Resim 2.4'te araba tabanlı fırın örnekleri gösterilmektedir.



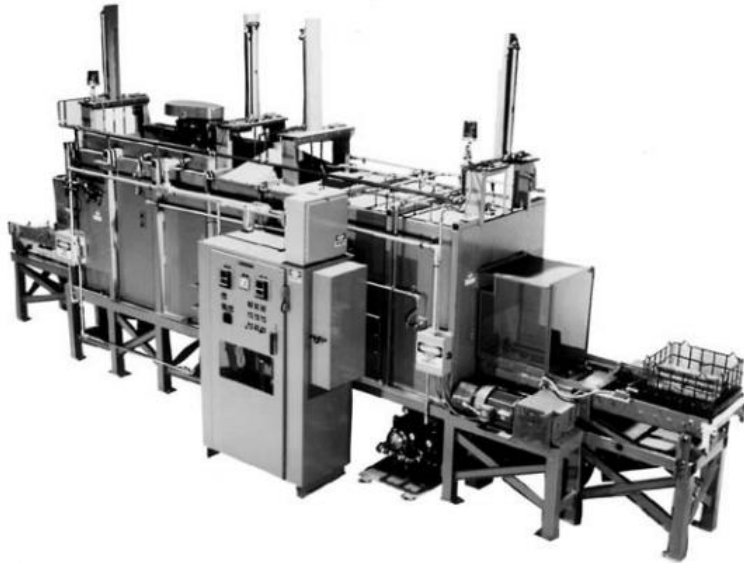
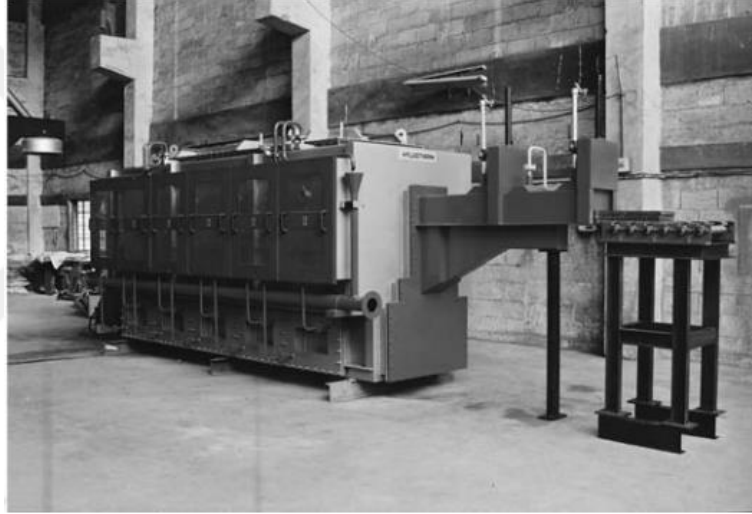
Resim 2.4 Döküm ve dövme ısıtma işlemi için araba tabanlı fırınlar (İnt.Kyn.1 ve 2).

2.5.1.5 Kaldırmalı (Tip-Up) Isıl İşlem Fırını

Bazı ısıtıl işlem fırınları, forklift tarafından sklmesini kolaylaştırmak için üst kısmının hidrolik olarak kaldırılabilceği şekilde tasarlanmıştır. Bu fırınlar dairesel veya araba tabanlı fırınların bir varyasyonu olarak ta gösterilebilir (Ford 1992, Anonim 1994).

2.5.2 Sürekli Isıl İşlem Fırını

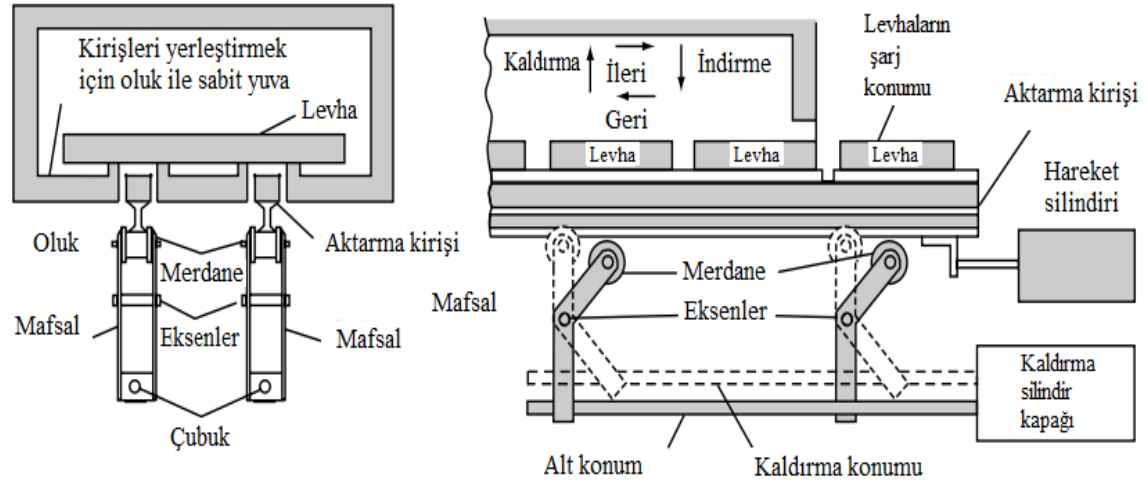
Sürekli fırınlar, özellikle aynı veya benzer olan parçaların sürekli ısıtıl işlem prosesine uygundur. Resim 2.5’te sürekli fırınların çeşitli örnekleri gösterilmektedir.



Resim 2.5 Sürekli fırın rnekleri (İnt.Kyn.3 ve 4).

2.5.2.1 Yürüyen Tabanlı Isıl İşlem Fırını

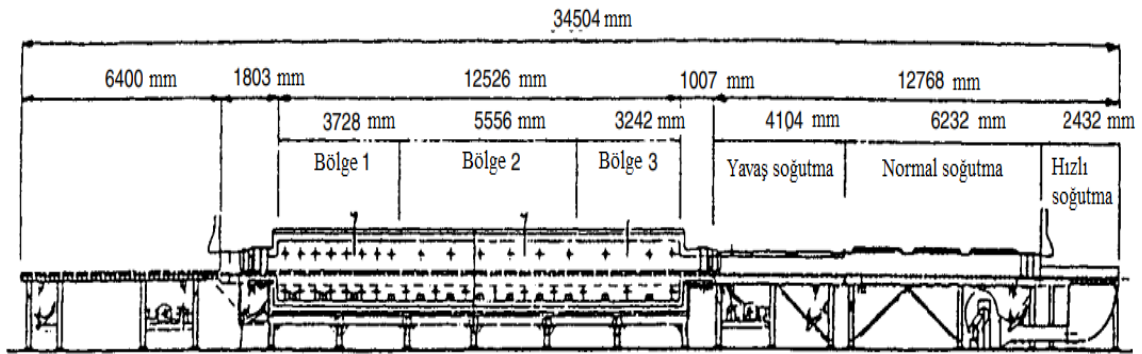
Parçaların Şekil 2.54'de gösterilen yürüyen tabanlı bir fırın içerisindeki hareketi, fırındaki parçaların bir yürüme hareketi ile tekrarlı bir şekilde kaldırılması, hareket ettirilmesi ve indirilmesidir (Greenberg 1994). Yürüyen tabanlı fırınlar özellikle büyük ve ağır parçaların sürekli ısıtılması için uygundur.



Şekil 2.54 Yürüyen tabanlı fırın mekanizması (Thelning 1984).

2.5.2.2 Makara Tabanlı Isıl İşlem Fırını

Makara tabanlı fırınlarda, yük harici olarak tahrik edilen ısıya dayanıklı alaşımlı silindirler ile taşınır. Bu fırın, büyük parçaların ve plakaların sürekli ısıtılması için uygundur ve Şekil 2.55 ve Resim 2.6'da gösterilmektedir (Greenberg 1994).



Şekil 2.55 Isıtma - soğutma bölgeleri ve makara tabanlı fırında transfer mekanizması (Thelning 1984).



Resim 2.6 Makara tabanlı ısıtım işlem fırını (İnt.Kyn.5).

2.5.2.3 İtmeli (Pusher) Isıl İşlem Fırını

İtici fırınlar en basit fırın tasarımlarından birine sahiptir. Yük hidrolik veya pnömatik olarak fırının içindeki silindirlere veya kızak raylarına mekanik olarak itilir (Ruffler 1982). Bu fırın tasarımının bir diğer versiyonu tavlama, normalleştirme, temperleme ve gerilim gidermeye ek olarak nötr sementasyon için kullanılabilen tabla itici fırınıdır (Hutchinson 1990).

2.5.2.4 Örgü Bant Konveyörlü Isıl İşlem Fırını

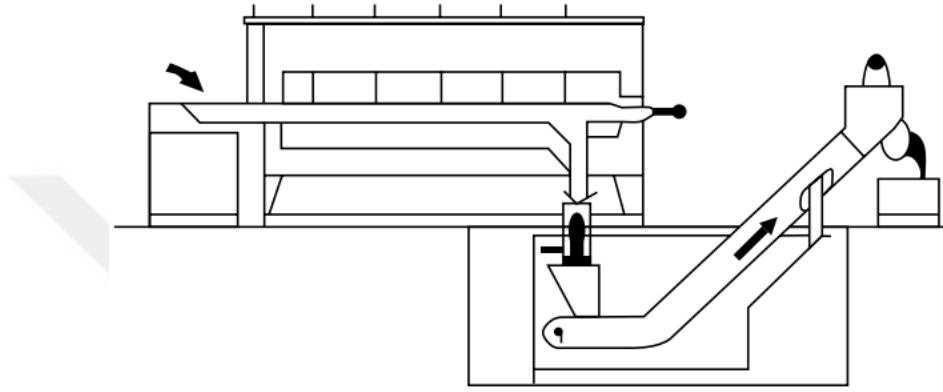
Bantlı konveyör fırınlarının ebatları çok küçükten çok büyüğe değişebilir. Yükün, Resim 2.7’de gösterildiği gibi bir metal örgü, makaralı zincir veya bağlantı zinciri üzerinde fırından sürekli olarak taşınması dışında, makaralı tabanlı fırınlara benzemektedir (Illgner 1989). Yük, soğutma ve temperleme gibi diğer işlem hatlarında sürekli olarak taşınabilir.



Resim 2.7 Örgü bant konveyörlü ısıtım işlem fırını (İnt.Kyn.3).

2.5.2.5 Sallar Tabanlı Isıl İşlem Fırını

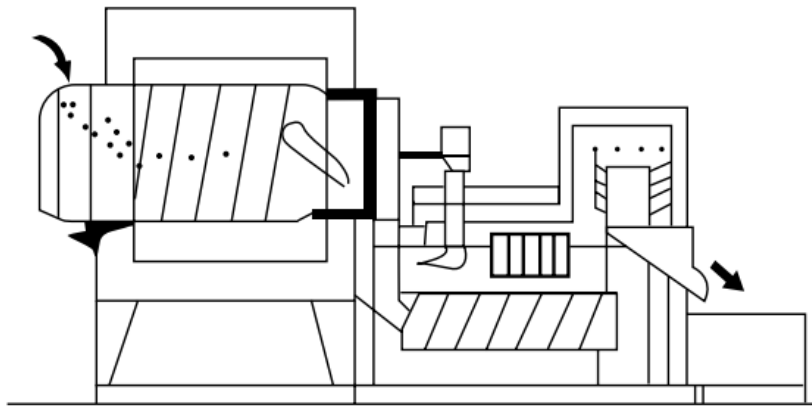
Sallar tabanlı fırın (Şekil 2.56), öncelikle küçük parçaların ısıtılması için kullanılan sürekli fırının bir başka örneğidir (Ruffler 1982). Parçalar, bir kayış veya zincirin başlangıca geri dönmesini gerektirmeyen mekanik olarak indüklenen bir titreşimli mekanizma ile fırından geçirilir.



Şekil 2.56 Sallar tabanlı ısıtma fırını şematik gösterimi (Thelning 1984).

2.5.2.6 Vidalı Konveyör Isıl İşlem Fırını

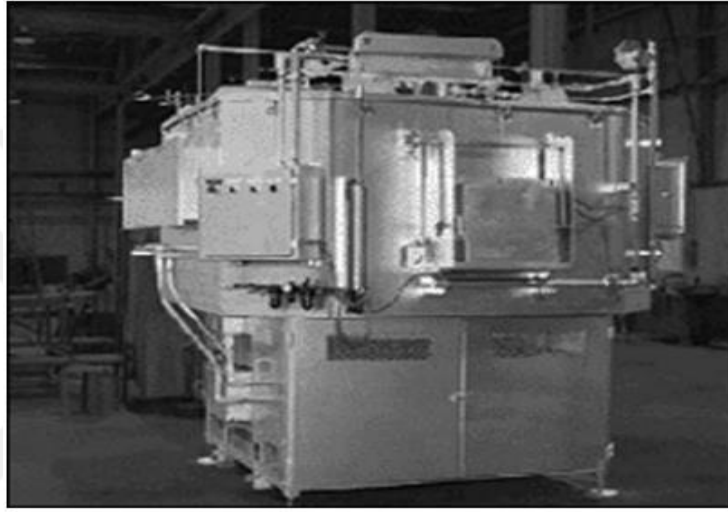
Vidalı konveyör fırınında, parçalar Şekil 2.57’de gösterildiği gibi bir veya daha fazla vida mekanizması üzerinde fırın boyunca ilerler (Illgner 1989). Bu fırınlar, ısıtma sırasında dikkatli kullanım gerektiren uzun, ince parçaların sertleştirme, yumuşatma, tavlama ve gerilim giderme için uygundur.



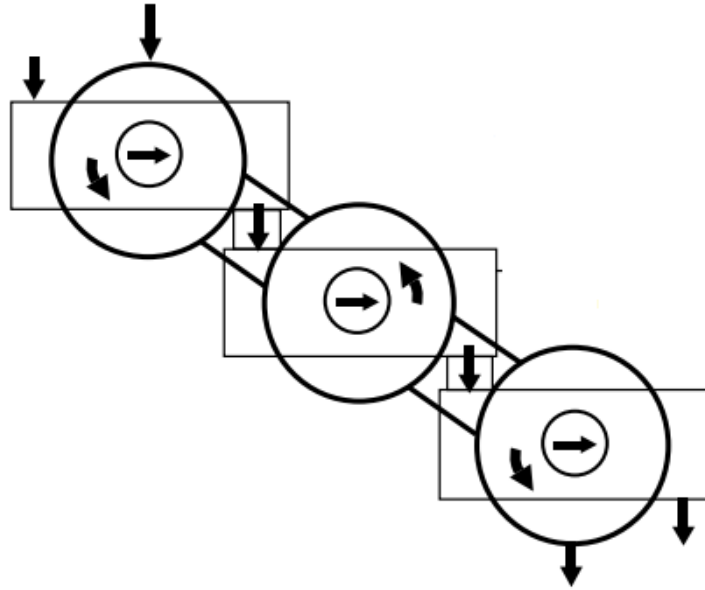
Şekil 2.57 Vidalı konveyör ısıtma fırını şematik gösterimi (Thelning 1984).

2.5.2.7 Döner Tabanlı Isıl İşlem Fırını

Döner tabanlı fırınlar, daha önce tartışılan fırınlardan farklıdır çünkü yük hareketli bir fırın tabanında bir döner hareketle ısıtma bölgesine aktarılır. Bu sistem Resim 2.8'de gösterilmiştir, burada ısıl işlem yapılacak parça şarj bölgesinden fırına yüklenir. Şekil 2.58'de gösterilen ticari tasarımda, daha büyük fırın ve zemin alanı esnekliği elde etmek için çeşitli döner tabanlı fırınlar sırayla bağlanır (İnt.Kyn.6).



Resim 2.8 Döner tabanlı ısıl işlem fırını (İnt.Kyn.6).



Şekil 2.58 Holcroft çok bölmeli döner karbonlama sistemi (Thelning 1984).

2.5.3 Fırınlarda Isı Üretimi: Elektrik ve Gaz

Fırın tasarımında ilk adımlardan biri, fırını ısıtmak için kullanılacak olan enerji kaynağını, tipik olarak elektrik veya gazın seçilmesidir. Gaz ve elektrik ekonomisi kullanılabilirlik ve maliyet ile değişir.

2.5.3.1 Fırın Isıtma Ekonomisi

Bir fırının ısıtma ekonomisinin belirlemesindeki ilk adım, bir enerji dengesi gerçekleştirmektir. Toplam ısı girişine göre dikkate alınması gereken ısı kaybı faktörleri (Piwtorak 1981,1982):

- Duvar kayıpları
- Atmosfer kayıpları
- Baca kaybı
- Aralık ve kapak açma-kapama kaybı

Temiz hava, sızma ve egzoz gibi atmosfere ısı kayıpları denklem 2.25 kullanılarak hesaplanabilir (Shefsiek 1980, Piwtorak 1981, 1982).

$$Btu/h = scfm \ 1.08DT \quad (2.25)$$

Yukarıdaki denklemde,

Btu/h = Isı aktarım hızı

$scfm$ = Havanın standart metreküpü (dk)

1.08 = Dönüşüm sabiti

DT = Hava sıcaklığındaki değişim (°F)

Fırından geçen tabla, ekipman ve çelik gibi malzemelerde meydana gelen ısı kayıpları denklem 2.26 kullanılarak hesaplanabilir (Piwtorak 1981,1982).

$$Btu/h = WC_p\Delta T \quad (2.26)$$

Yukarıdaki denklemde,

W = Fırından geçen malzemenin ağırlığı (lb/h)

C_p = Malzemenin özgül ısısı (Btu/(lb°F))

ΔT = Fırının girişi ve çıkışı arasındaki sıcaklık farkı (°F)

Fırın duvarından kaynaklanan ısı kaybı denklem 2.27 ile hesaplanır (Piwtorak 1981,1982).

$$Btu/h = AU\Delta T \quad (2.27)$$

Yukarıdaki denklemde,

A = Fırının yüzey alanı (ft²)

U = Toplam ısı transfer katsayısı (Btu/(hft²°F))

Toplam ısı transfer katsayısı U 'nun hesaplama denklemi denklem 2.28'de gösterilmiştir.

$$U = \frac{1}{1/h_1 + x/k + 1/h_2} \quad (2.28)$$

Yukarıdaki denklemde,

h_1 = İç tabaka katsayı (Btu/h ft² °F)

h_2 = Dış tabaka katsayısı (Btu/h ft² °F)

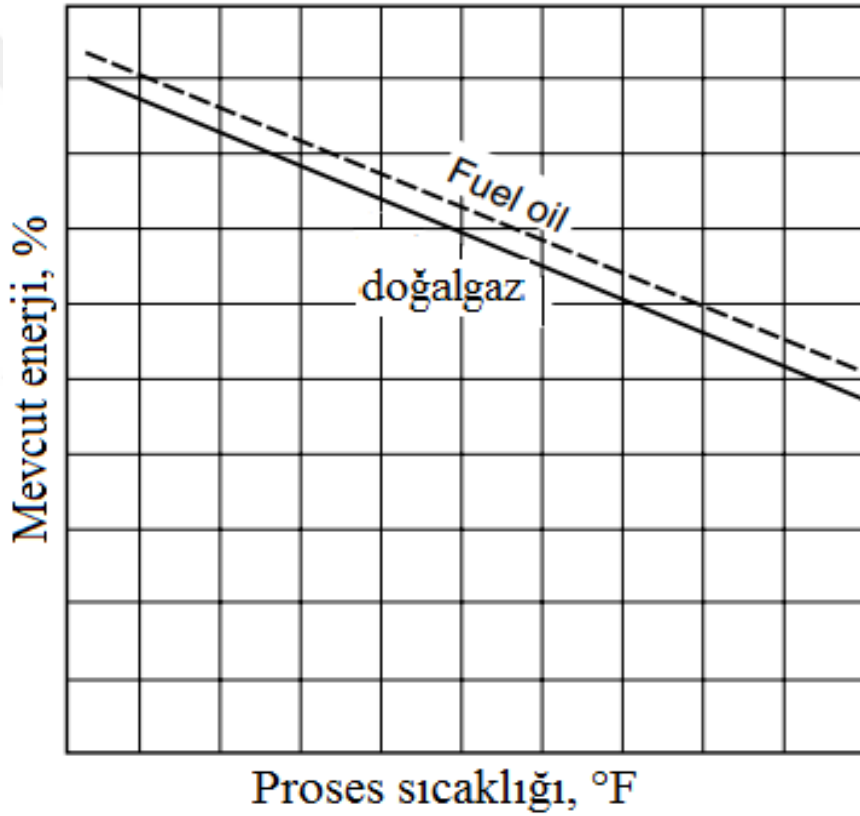
k = Panel ısı iletkenliği (Btu/h ft² °F)

x = Panel kalınlığı (ft)

Isı girişı, hem gizli hem de ölçülebilen mevcut yüzde enerjiden hesaplanır. Bu formül denklem 2.29’da gösterilmiştir.

$$Brüt\ Btu/h = \frac{Btu/h}{\% mevcut\ enerji} \quad (2.29)$$

Yakıt gazı veya yağdan elde edilen toplam enerji, artan fırın egzoz sıcaklığı ile azalacaktır, ancak azalma miktarı yanma sistemine ve gaz için hammadde kaynağına bağlıdır. Bu durum Şekil 2.59’da gösterilmiştir.



Şekil 2.59 Mevcut ısı enerjisinin yakıt yağı ve doğal gaz için egzoz sıcaklığına bağımlılığı (Piotrak 1981, 1982).

Bir gaz veya elektrikli fırının seçiminde ilk adım, her iki enerji kaynağı için de verilen hesaplamaların yapılmasıdır.

2.5.3.2 Elektrikli Isıtma Fırını

Elektrikli ısıtma gaza göre bir takım avantajlara sahiptir. Bunlar daha düşük fırın maliyeti ve daha yüksek fırın verimliliğini içerir çünkü egzoz kayıpları, gözetimsiz çalışmaya izin veren avantajlı düzenlemeler, daha düşük bakım maliyetleri, geliştirilmiş sıcaklık homojenliği, elektrik elemanlarının değiştirilmesinin kolaylığı ve daha geniş çalışma sıcaklığı aralığıdır (Bullend ve Bacon 1982).

Elektrikli ısıtma, elektrik akımının metalik veya metalik olmayan bir iletkenin akışına bağlıdır. Bir malzemenin ısıtma hızı, malzemenin mevcut yoğunluğuna ve özgül direncine bağlıdır (direncin iletkenlik ile ters ilişkilidir).

Elektrikle ısıtılan bir fırın tasarlanırken, ekipmanların performansını etkileyen üç değişken dikkate alınmalıdır (Schwartz ve Hexemer 1995):

1. Kullanılan malzemelerin elektriksel özellikleri
2. Kullanılan malzemelerin enerji sönümlene kabiliyeti
3. Fırın atmosferi

Günümüzde öncelikli olarak ısıtma elemanı yapımı için kullanılan dört malzeme vardır: nikel-krom (80Ni, 20Cr), demir-krom-alüminyum, silisyum karbür ve molibden disilis (MoSi_2) (Trinks vd. 1967,1978).

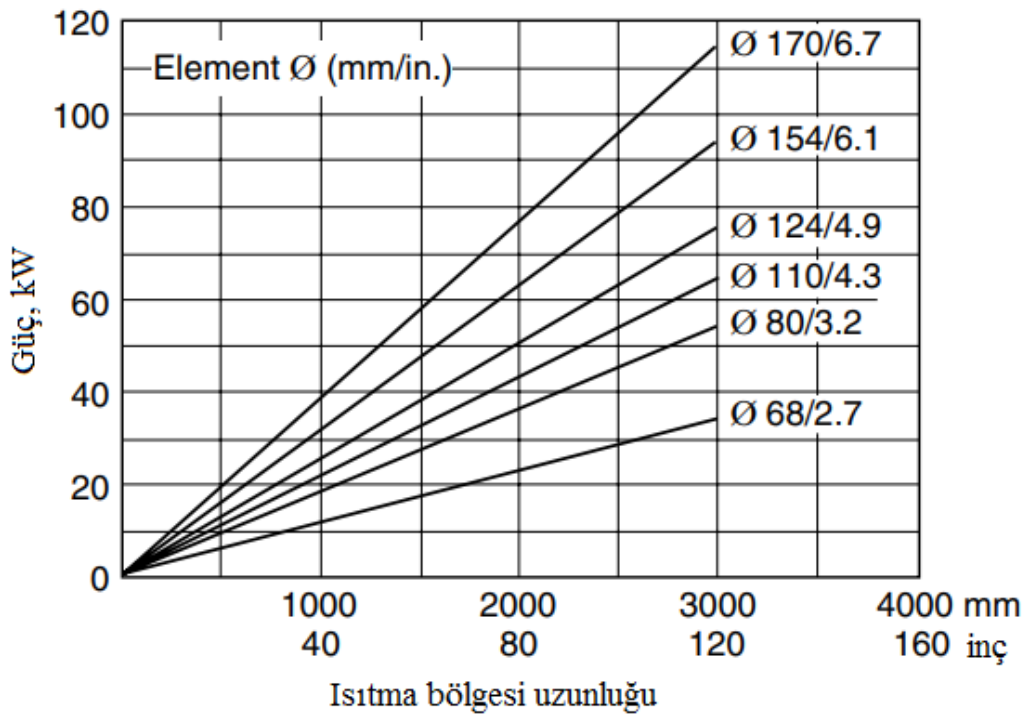
İndirgenmiş fırın atmosferi dışında, düz karbonlu çelik malzemeler 426 °C üzerindeki sıcaklıklarda kullanılamaz ve bu nedenle ısıtma işlem uygulamalarında nadiren kullanılır. Bu sınırlamalar nedeniyle, ısıtma işlem fırınlarında düz karbon çeliklerinden yapılmış elemanlar kullanılmaz (Trinks ve Mawhinney 1967).

Yüksek sıcaklıkta fırın ısıtması için nikel-krom (Ni-Cr) esaslı elektriksel direncin alaşımları geliştirilmiştir. Bu tip alaşımlar, 1200 °C sıcaklığa ulaşan fırınlarda kullanım için uygundur.

Daha fazla kullanım ömrü ve daha yüksek maksimum çalışma sıcaklıkları elde etmek için demir, krom ve alüminyum (Fe–Cr–Al) alaşımlar geliştirilmiştir ve Kanthal ticari ismiyle piyasada bulunmaktadır (Trinks ve Mawhinney 1967). Alüminyum alaşımlı metaller, fırınlarda kimyasal etkenlere karşı dayanıklı bir koruyucu tabaka oluşturmak için kullanılır. Kanthal malzemeleri, reaktif atmosferler kullanan elektrikli fırınlarda en sık kullanılan elemanlardır.

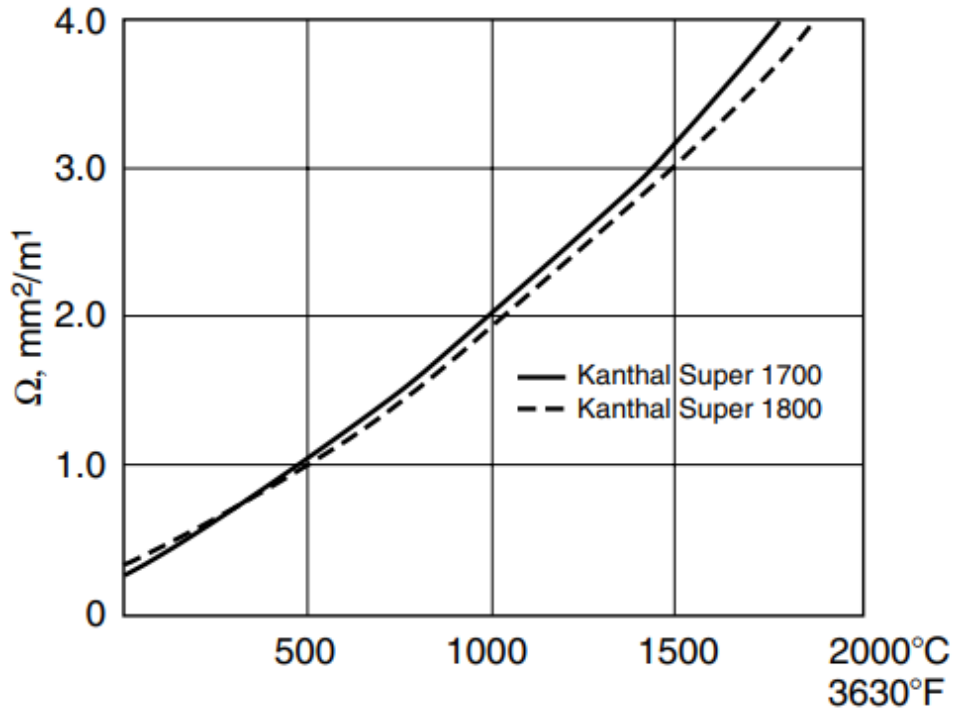
Kanthal malzemeleri 1400 °C'ye kadar sıcaklıklarda kullanılabilir. Kanthal yüksek sıcaklıklarda daha iyi sürünme mukavemeti ve daha uzun kullanım ömrü sağlar ve kimyasal etkenlere karşı daha dayanıklıdır.

Malzemenin kesit alanıyla doğru orantılı olarak enerji sönümleyebilme özelliği artar. Bu durum Şekil 2.60'da 900 °C fırın sıcaklığında bir Kanthal malzemesi için gösterilmiştir.



Şekil 2.60 900 °C fırın sıcaklığında olası yükleme (Thelning 1984).

Bir Kanthal malzemesi için Şekil 2.60'da gösterildiği gibi, bir ısıtma elemanının direnci sıcaklık ile artar. Şekil 2.60'da gösterilen eğriler her malzeme sınıfı için farklıdır bu yüzden ısıtma elemanı temin edilirken bu bilgiler üreticiden istenmelidir.

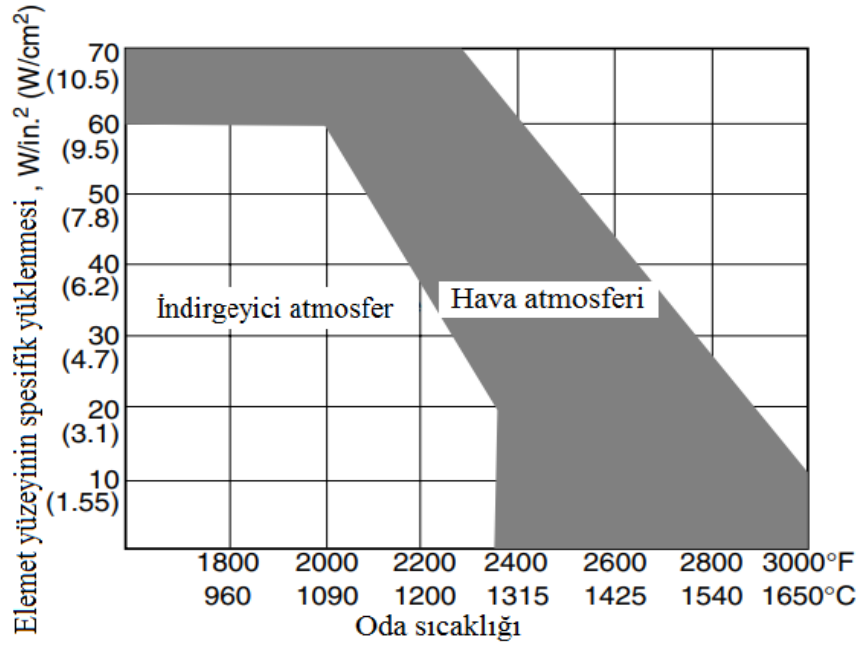


Şekil 2.61 Kanthal süper 1700 ve 1800'ün sıcaklığa göre direnç değerleri (Schwartz ve Hexemer 1995).

Refrakter olarak kullanılan grafit ve silisyum karbür gibi bazı malzemeler yüksek sıcaklıklarda elektrik iletkenleri olarak kullanılabilir. Gevrekleşmeye maruz kalsalar da, ısıtım fırınlarında silisyum karbür malzemeler kullanılabilir (Piwtorak vd. 1981).

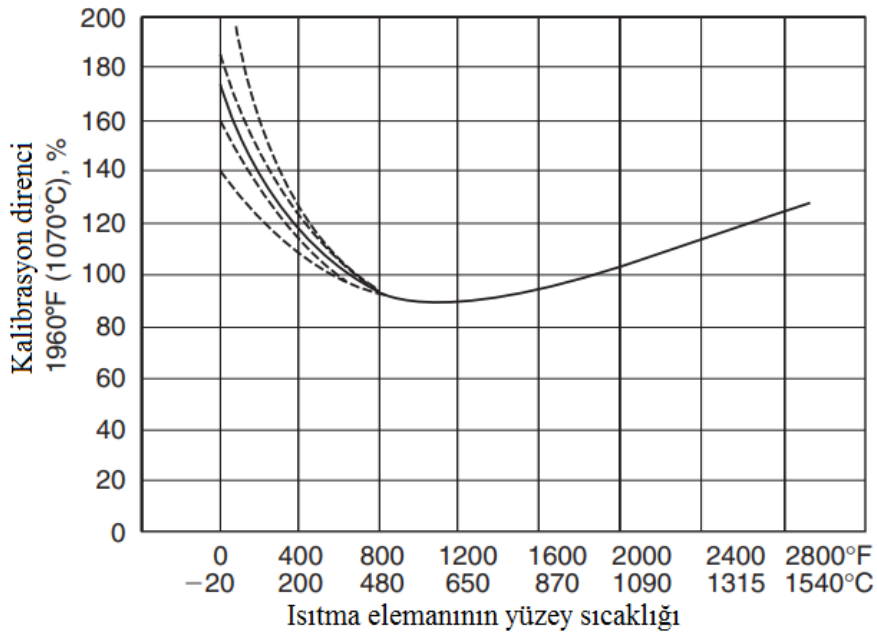
Silisyum karbür malzemeler Global ticari adı ile bilinir ve nispeten kimyasal olarak dayanıklı yüksek yoğunluklu silisyum karbür kristallerinden üretilmiştir. Bununla birlikte, Ni-Cr alaşımları yüksek sıcaklıklarda üstün mekanik özellikler sergiler. Silisyum karbür malzemelerinin avantajları arasında yaşlanma ile direnç değişikliklerinin yavaşlığı, geniş kullanım sıcaklığı aralığı, yüksek enerji sönümlene özelliği ve uzun kullanım ömrü (6 aydan 2 yıla kadar) bulunur (Schwartz ve Hexemer 1995).

Şekil 2.62 global elemanlarının oksitleyici hava ortamlarında daha yüksek enerji sönümlene özelliği sergilediğini göstermektedir. Global malzemeler bazı endotermik atmosferlerde kullanıldığında karbon biriktirebilir. Aşırı karbon ihtivası, atmosferik gazın yenilenmesini önleyerek ve artık karbonu yakmak için periyodik olarak hava üflenir. Yüksek sıcaklık bölgesi aşırı nem ve karbonlu gazlardan arındırılmalıdır (Schwartz ve Hexemer 1995).



Şekil 2.62 Küresel ısıtma elemanları için önerilen yükleme (Thelning 1984).

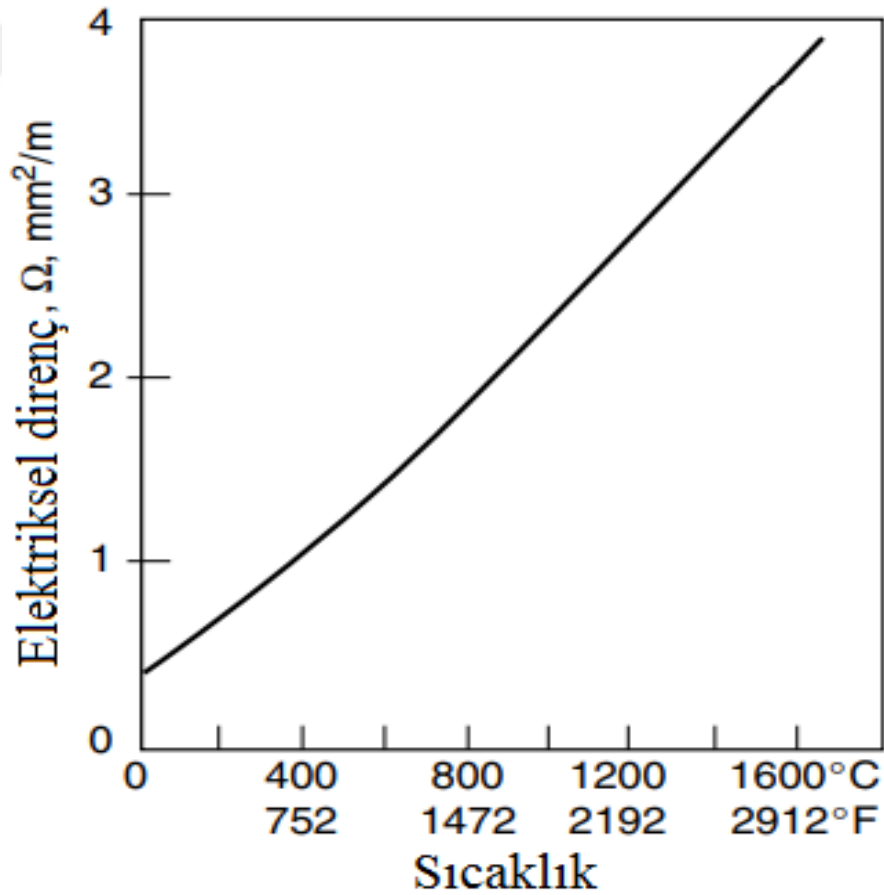
Glober malzemelerin elektriksel direnç özellikleri Şekil 2.63’de özetlenmiştir. Elektrik direnci, yaklaşık 650 °C’ye kadar artan sıcaklık ile azalır. Bu sıcaklığın üstünde sıcaklık ile artar. Şekil 6.23’de gösterilen farklı negatif direnç değerleri, silisyum karbürdeki safsızlıkların etkisinden kaynaklanmaktadır (Schwartz ve Hexemer 1995).



Şekil 2.63 Globar ısıtma elemanları için elektriksel direnç ve yüzey sıcaklığı grafiği (Schwartz ve Hexemer 1995).

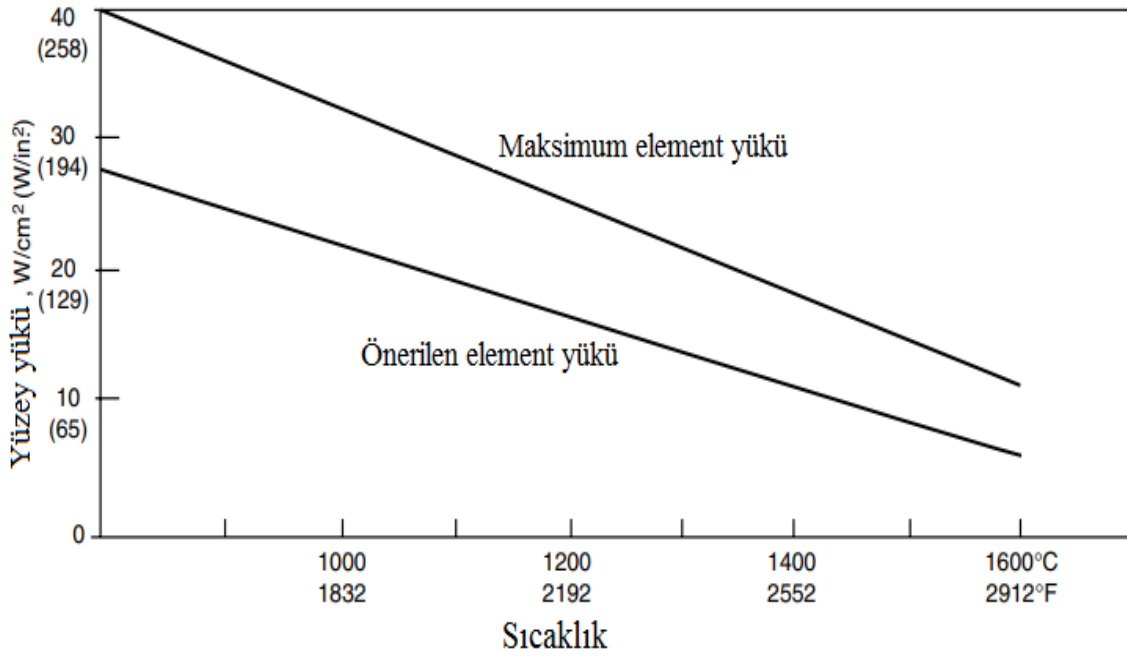
Bir başka ısıtma elemanı malzemesi molibden disilis (MoSi_2)'dir. Bu elemanlar genellikle MoSi_2 'nin %90'ını ve metalik ve seramik ilavelerin %10'unu içerir (Oare ve Eklund 1978). Hem yüksek sıcaklık hem de düşük sıcaklık işlemleri için fırınlarda kullanılırlar ve saf hidrojen ve amonyak atmosferleri ile kullanım için uygundur (Bullen ve Bacon 1982).

Bir MoSi_2 alaşımı için elektriksel direnç eğrisi Şekil 2.64'de verilmiştir. Daha önce gösterilen Kanthal ve Global malzemelerinde olduğu gibi, elektrik direnci genellikle artan sıcaklık ile artar (Oare ve Eklund 1978).



Şekil 2.64 Molibden disilis ısıtma elemanları için elektriksel direnç eğrisi (Thelning 1984).

Sıcaklığa göre malzemelerin enerji sönümlemesi Şekil 2.65'de verilmiştir, bu da yüksek sıcaklıkta nispeten yüksek yüklerin mümkün olduğunu gösterir (Oare ve Eklund 1978).



Şekil 2.65 Molibden disilis ısıtma elemanları için önerilen yükleme (Thelning 1984).

Bir fırın atmosferinde MoSi_2 980 °C üzerindeki sıcaklıklarda oksijenle reaksiyona girerek silisyum dioksit (SiO_2) tabakası oluşturur ve oluşan bu tabaka malzemeyi kimyasal etkilere karşı korur.

Fırın tasarımında elektrik elemanlarının seçimi 13 adımda gerçekleştirilir. Her adım için gerekli denklemler Çizelge 4.6'da verilmiştir. Optimal fırın tasarımı bu süreçten çok daha karmaşık olmasına ve uygun bir mühendislik danışmanı ile gözden geçirilmesi gerekmesine rağmen, bu hesaplamalar bir elektrik fırını için olası tasarım gereksinimlerine ilk yaklaşımı sağlar.

Thomander (1978) Kanthal elemanlarını kullanarak elektrikli fırın tasarımı için tasarım ve uygulama önerilerini gözden geçirmiştir. Bu önerilerden bazıları şunlardır:

1. Fırının her bir parçası için uygun refrakter malzeme kullanılmalıdır. Genellikle bir elektrikli fırın için düşük demir içeriği tuğla veya düşük elyaf modülü (1 mcf) refrakter malzeme kullanılır. Tuğla refrakter, 1200 °C'de en az 4×10^4 V/cm'lik bir elektrik direnci göstermelidir. Tuğla kesitinden geçen voltaj kaybı, mümkünse 25 V/cm'den az olmalıdır.

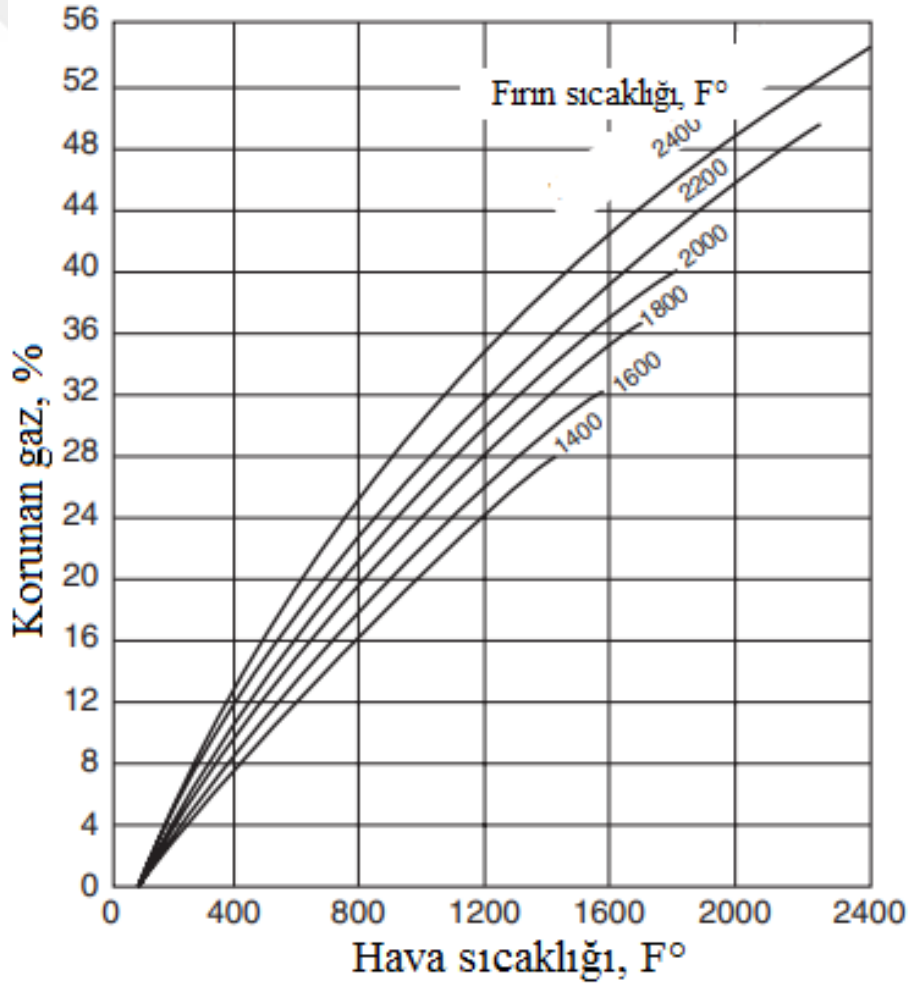
2. Tel çapı enerji yüklemesine bağlıdır ve elemandan optimum ömür elde etmek için uygun boyut kullanılmalıdır. Genellikle en az 3 mm (0,12 inç) tel kalınlığı kullanılır.
3. Tel genellikle düşük amper uygulamaları için kullanılır.
4. Spiral çapı, 1000 °C'den büyük fırın sıcaklıkları için tel çapının dört veya altı katı ve 1000 °C altındaki fırın sıcaklıklarında tel çapının dört veya yedi katı olmalıdır.
5. Şerit elemanları için kalınlık en az 1.5-2.5 mm olmalıdır (0.59-0.09 inç).
6. Terminal alanı, tellerin kopma potansiyelini en aza indirmek için ısıtma bölgesinin yaklaşık üç katı olmalıdır. Duvarın alanı en az ısıtma bölgesi kadar büyük olmalıdır.
7. Elektrikli fırın verimliliği genellikle %50-80 olarak kabul edilebilir. Bununla birlikte bu yaklaşım küçük bir yük ve büyük bölme ile ilgili güç gereksinimlerini hesaplamak için yetersiz olabilir.
8. Malzeme yükleme fırın duvar yapısı, atmosfer, sıcaklık ve yük kapasitesine bağlıdır (Barton 1981).

2.5.4 Gaz Yakıtlı Fırımlar

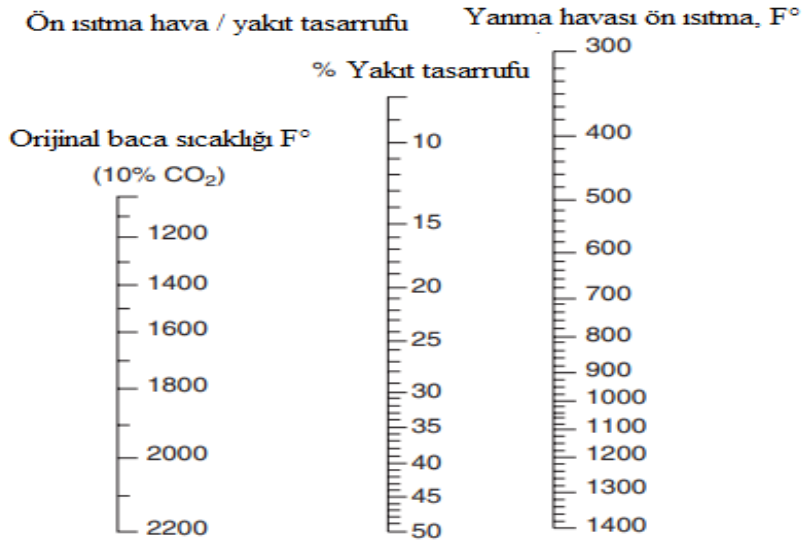
Elektrikle ısıtılan fırınlar çok daha verimli (> %85) olabilsen de, daha az verimli (%50-70) gazla çalışan fırından daha pahalı olabilirler (Andrews 1993).

Örneğin 1981 tarihli bir makalede gazla çalışan bir fırının işletme maliyeti, aynı ısı işlem uygulamalarını gerçekleştiren bir elektrikli fırının işletme maliyeti ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, gazla çalışan fırının çalıştırılan elektrikli fırının yaklaşık %80'ine mal olduğunu göstermiştir. Gazla çalışan fırının işletme maliyeti yaklaşık olarak düşürülebilir. Yanma havasının baca gazları ile önceden ısıtıldığı bir ısı geri kazanım işlemi ile elektrikli fırınlarından %30 daha az maliyet sağlanabilir. Bu durum büyük dört sıralı itici fırınlar için pratik ve uygun maliyetli olsa da, daha küçük parçalar ve orta sıcaklık fırınları için durum böyle olmaz. Bu işlemin yakıt tasarrufunun bir örneği Şekil 2.66'da gösterilmiştir. Yanma havası ön ısıtma işlemi ile yakıt tasarrufunun hesaplanması için Şekil 2.67'de bir grafik verilmiştir.

Daha yakın tarihli bir çalışmada, gazla çalışan bir fırının işletme maliyetinin elektrik fırını işletme maliyetinin yaklaşık %8'ine düşürülebileceği gösterilmiştir. Ayrıca, gaz kullanımı bir takım ek avantajlara sahiptir. Örneğin, ısıtma işlemine daha kullanışlı bir ısı girişi kullanmak mümkündür, gaz kullanımı ısı işlem süreci hızını artırır, doğal gaz güvenli ve temiz bir yakıttır, fırın dönüşümleri hızlı ve düşük maliyetlidir ve herhangi bir ısı işlem ekipmanının gaz-elektrik dönüşümleri kolayca gerçekleştirilir. Bu dönüşümün dezavantajları şunlardır: Dönüşüm kesintisi üretim kaybına neden olur, baca kanallarının takılması gereklidir, ekipmanın etrafında sıcaklıklar daha yüksektir, alev güvenlik kontrollerinin kurulması gereklidir ve eğitimli operatör gereklidir (Andrews 1993).



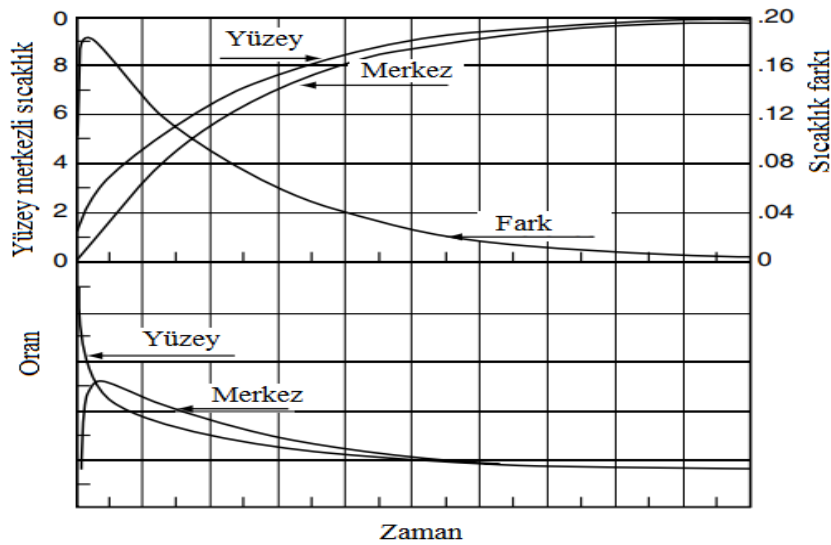
Şekil 2.66 Egzoz gazı geri kazanımıyla birlikte potansiyel yakıt tasarrufu (Andrews 1993).



Şekil 2.67 Yanma havasının ön ısıtılmasından beklenen yakıt tasarrufunu belirlemek için kullanılan grafik (Thelning 1984).

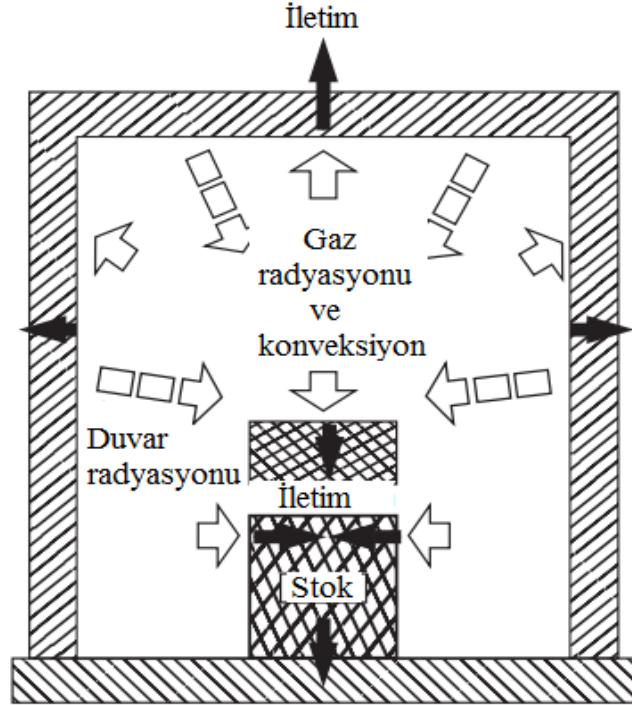
2.5.5 Isı Transferi

İş parçası bir fırında ısıtıldığında oluşan ısı transfer süreci Şekil 2.68’de gösterilmiştir. Genellikle ısı transfer hızı başlangıçta hızlıdır ve parçanın merkezinin sıcaklığı yüzey sıcaklığına yaklaştıkça azalır ve bu da fırın sıcaklığını daha hızlı bir şekilde elde eder. İdeal fırın tasarımı, ısıtma işlemi sırasında termal gradyanları en aza indirirken termal dengeye mümkün olduğunca çabuk ulaşılmasına izin verir.



Şekil 2.68 Sıcaklık artışı ve ısıtma oranlarının zamana göre ilişkisi (Paschkis ve Persson 1960).

Fırınlarda ısı transferi konveksiyon, radyasyon ve iletim ile gerçekleşir. Bu ısı transfer modlarının fırın ısıtmasında uygulanması Şekil 2.69'da gösterilmiştir.



Şekil 2.69 Fırın ısı transfer süreci (Hibbard 1987).

2.5.5.1 Konveksiyonla Isı Transferi

Bir fırında ısı akısı (q), mesafede artan bir değişim (dx) ile sıcaklık değişimine (dT) bağlıdır. Bu durum denklem 2.30'da gösterilmiştir.

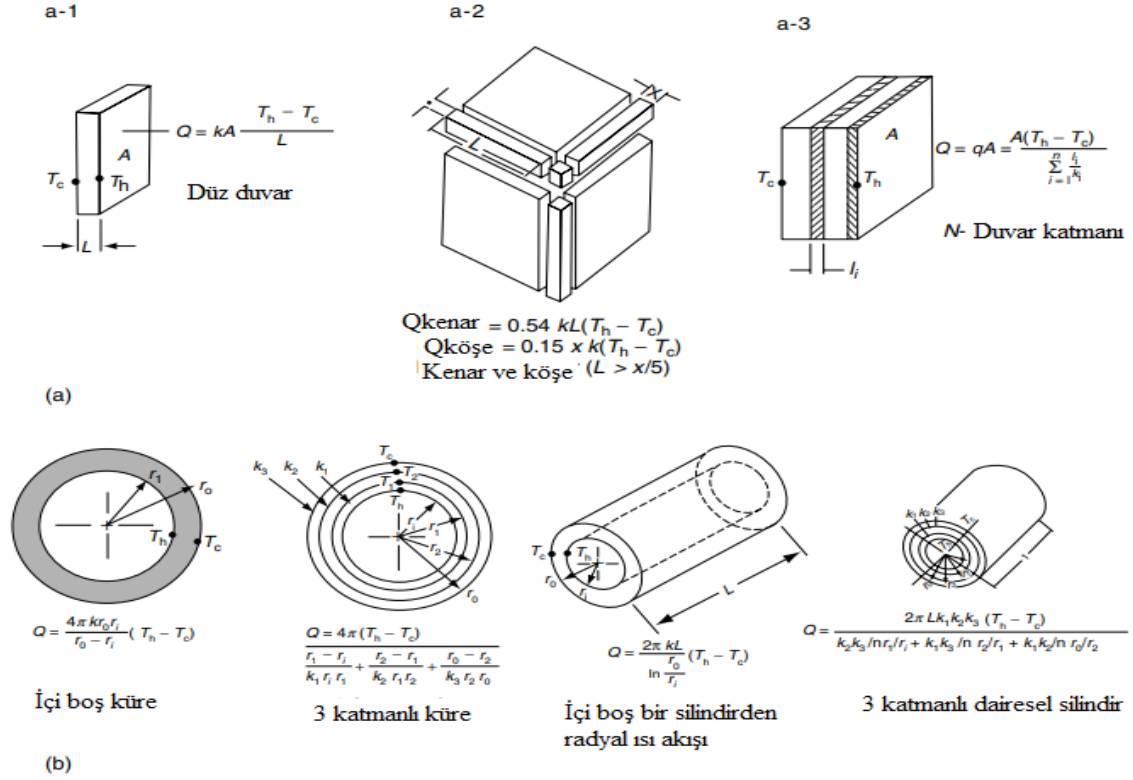
$$q = -K \frac{dT}{dx} \quad (2.30)$$

Isı akısı (q), toplam güç (Q) ile ilgilidir. Bu durum denklem 2.31'de verilmiştir.

$$Q = Aq \quad (2.31)$$

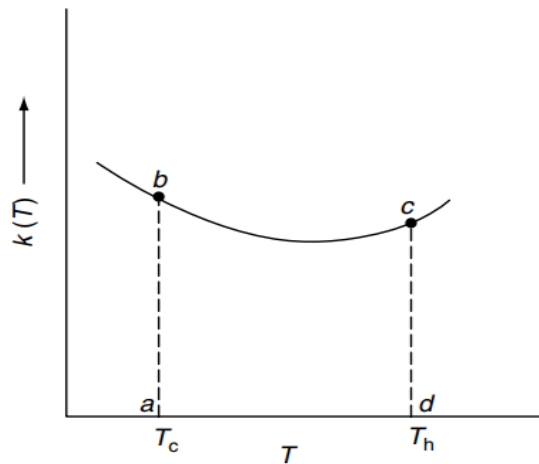
Burada a , parçanın toplam alanıdır. Toplam güç (Q) öncelikli olarak toplam alan ile ısı akısının değişimini hesaplar.

Şekil 2.70 ekipmandaki güç kayıplarını belirlemek için birleştirilebilen basit şekillerin verileri aracılığıyla aktarılan toplam gücün hesaplanmasını göstermektedir.



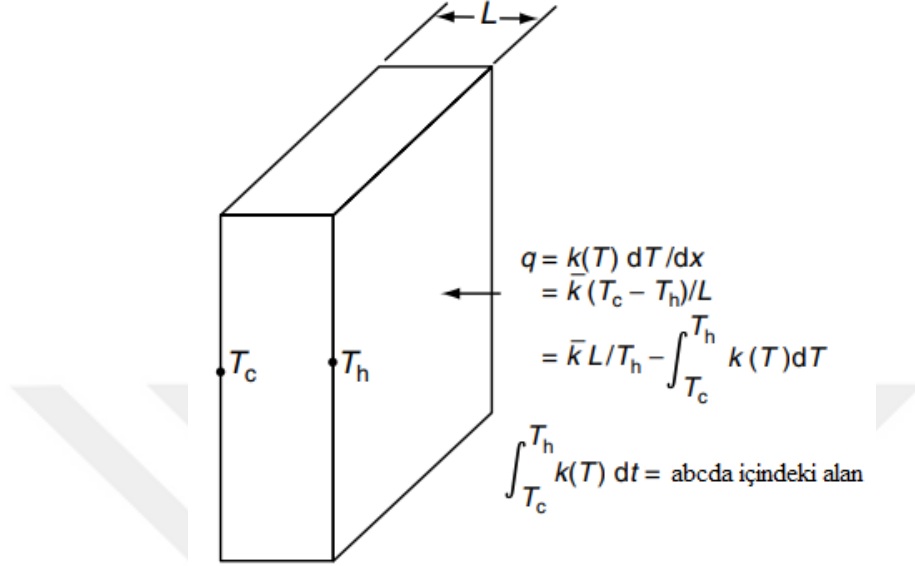
Şekil 2.70 Isıl işlemdе yaygın olarak karşılaşılan şekiller için ısı transfer denklemleri (Thelning 1984).

Isı iletkenliğinin sıcaklık ile değişimi Şekil 2.71'de gösterilmiştir.

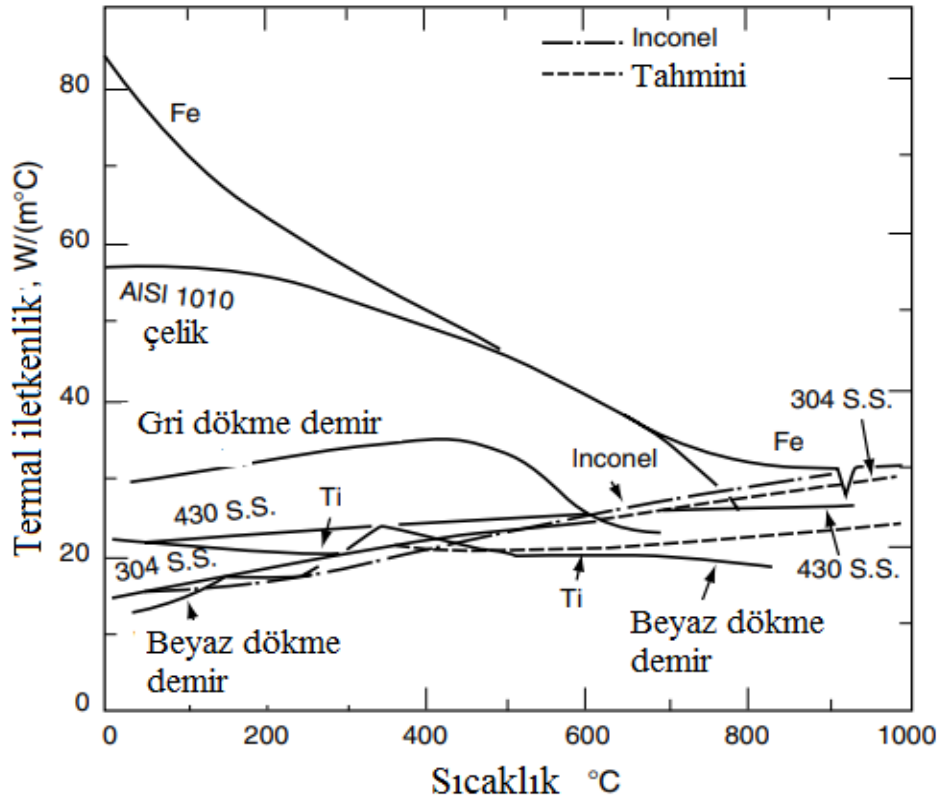


Şekil 2.71 Isı iletkenliğinin sıcaklık ile değişimi (Thelning 1984).

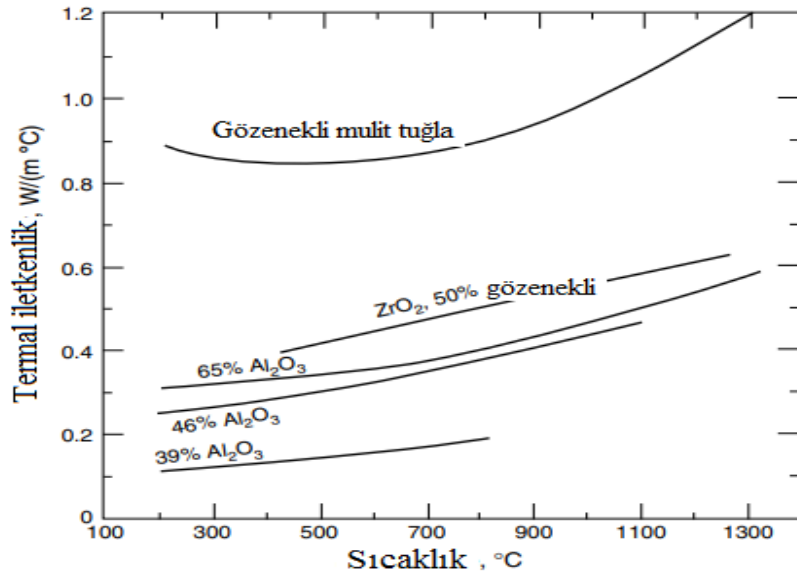
Isı iletkenliğinin sıcaklık ile değişimi bilindikten sonra, düz bir duvardan aktarılan ısı, Şekil 2.72’de gösterildiği gibi tahmin edilebilir.



Şekil 2.72 Düz bir duvar için ısı akısının hesaplanması (Thelning 1984).



Şekil 2.73 Bazı demir alaşımları ve inconel için termal iletkenlik ve sıcaklık diyagramı (Thelning 1984).



Şekil 2.74 Çeşitli refrakter malzemelerin ısı iletkenliği (Thelning 1984).

Çeşitli metallerin ve refrakter malzemelerin sıcaklığa göre ısı iletkenliği sırasıyla Şekil 2.73 ve Şekil 2.74’de gösterilmiştir. Doğal konveksiyonda sıvı akış özellikleri için ortalama ısı transfer katsayısı denklem 2.32 kullanılarak hesaplanabilir (Adams 1954).

$$\bar{h} = \frac{k}{L} C \left[\frac{g\beta(T_s - T_b)L^3}{\nu^2} N_{Pr} \right] m = \frac{k}{L} C (N_{Gr} N_{Pr})^m \quad (2.32)$$

Yukarıdaki denklemde,

k = Isıl iletkenlik

L =Uzunluk

L =Çap

g =Yerçekimi sabiti

β =Hacimsel termal genleşme katsayısı

T_s =Yüzey sıcaklığı

T_b =Kenar tabakasının kalınlığı

ν =Kinematik viskozite

N_{Pr} =Prandtl sayısı (N_{Pr} , ν/a)

N_{Gr} =Grashof sayısı (N_{Gr} , $g\beta(T_s - T_b) x^3/\nu^2$)

C , m =Dikey düzlemler ve silindirler için katsayı sabiti

Düzgün borulardan laminar ($N_{Pr} < 2300$) akış için, ortalama ısı transfer katsayısı denklemi denklem 2.33'de verilmiştir.

$$\bar{h} = \frac{k}{d} \left[3.66 + \frac{0.0668(d/L)N_{Re}N_{Pr}^3}{1+0.04[(d/L)N_{Re}N_{Pr}]^{2/3}} \right] \quad (2.33)$$

Yukarıdaki denklemde,

L =Boru uzunluğu

d =Dairesel borular için iç çap

Düzgün borulardan türbülanslı akış için ısı transfer katsayısı denklemi denklem 2.34'de verilmiştir.

$$\bar{h} = 0.023 \frac{k}{d} N_{Re}^{0.8} N_{Pr}^n \quad (2.34)$$

Yukarıdaki denklemde,

$N_{Re} > 4000$ ve

$n= 0.4$ ısıtma için ve 0.3 soğutma için

Bir silindir boyunca gaz akışı için ortalama ısı transfer katsayısı denklemi denklem 2.35'de gösterilmiştir (Holman 1968).

$$\bar{h} = C \frac{k}{d} N_{Re}^n C \frac{k}{d} \left(\frac{vd}{v} \right)^n \quad (2.35)$$

Yukarıdaki denklemden ortalama katman sıcaklığı (T_f) denklem 2.36'da gösterilmiştir (Holman 1968).

$$T_f = \frac{T_s + T_b}{2} \quad (2.36)$$

2.5.5.2 Radyasyonla Isı Transferi

Radyant ısı transferi, yayılan veya emilen radyasyon miktarına, radyasyonun dalga boyuna, yüzeyin sıcaklığına ve fiziksel durumuna bağlıdır.

T_1 ve T_2 'de iki yüzey arasındaki radyant ısı transferi (Q) oranı denklem 2.37'de gösterilmiştir (Holman 1968).

$$Q = A_1 F_{12} \delta (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.37)$$

Yukarıdaki denklemde,

A =Alan (m^2)

δ =Stefan-Boltzmann sabiti

F_{12} =Yayma kuvveti

δ radyasyon ısı transfer katsayısı (h_r) denklem 2.38 ile hesaplanabilir.

$$h_r = F_{12} \delta (T_1^3 + T_1^2 T_2 + T_1 T_2^2 + T_2^3) \quad (2.38)$$

Radyatif ısı kaybının en büyük kaynaklarından biri, fırın kapısı açıldığında ve ısı kaybı oranı denklem 2.39 ile hesaplanabilir (Britz 1975).

$$q = 0.173 A e \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right] \quad (2.39)$$

Yukarıdaki denklemde,

A =Kapı açıklığının geçerli alanı

e =Radyasyon kuvveti

T_0 =Havanın mutlak sıcaklığı ($^{\circ}C$)

2.5.5.3 İletimle Isı Transferi

İletimle ısı transferi (q) oranı, termal iletkenlik k , sıcaklık T ve ısı kaynağından X olan mesafeye bağlıdır. Bu durum denklem 2.40'da gösterilmiştir.

$$q = k \frac{dT}{dX} \quad (2.40)$$

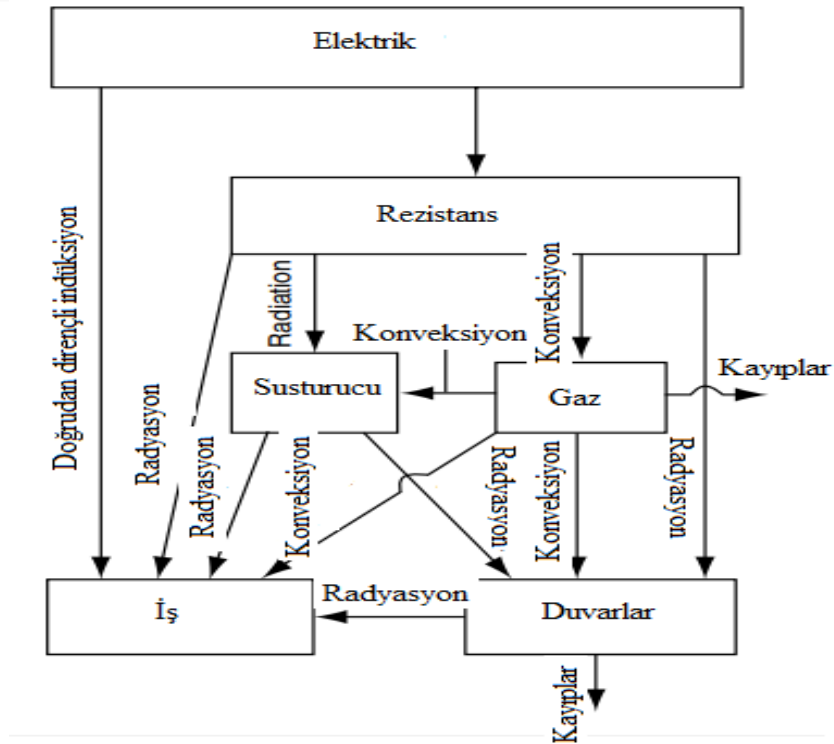
Düz yüzeyler veya ince tabakalar için ısı transferi denklem 2.41'de verilmiştir.

$$q = \frac{k}{t} (T_1 - T_2) \quad (2.41)$$

Yukarıdaki denklemde,

t = Malzeme kalınlığı (mm)

Şekil 2.75, elektrikle ısıtılmış bir fırın için bu ısı transfer işlemlerinin açıklayıcı bir özetini sağlar.



Şekil 2.75 Çeşitli fırın bileşenleri için ısı transfer süreçlerinin özeti (Nicholson vd. 1966). Isıtılmış parça içindeki ısı transferi diferansiyel denklemden modellenenir.

Bu modelleme denklem 2.42’de gösterilmiştir (Hibbart 1987).

$$\rho C \frac{\partial \theta}{\partial t} = k \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (2.42)$$

Yukarıdaki denklemde,

ρ =Yoğunluk

C =Özgül ısı

θ =Sıcaklık (°C)

k =Termal iletkenlik

x =Mesafe (cm)

Bu verilerin sıcaklığa bağlı olduğuna dikkat etmek önemlidir. Bu bağımlılık, herhangi bir fırın termal modelleme yaparken hesaba katılmalıdır.

Basit bir şeklin sıcaklık artışı, aşağıdaki bilgilerle inşa edilen heisler çizelgeleri kullanılarak tahmin edilebilir.

Basit bir şeklin sıcaklık artışı, aşağıdaki bilgilerle inşa edilen Heisler denklemleri kullanılarak tahmin edilebilir (Paschkis ve Persson 1960).

1. Isıl yayınma katsayısı (α) denklem 2.43’de gösterilmiştir.

$$\alpha = k/C_p \quad (2.43)$$

Yukarıdaki denklemde,

k =İletkenlik

C =Özgül ısı

p =Malzemenin yoğunluğu

2. Fourier numarası (N_{Fo}) denklem 2.44 kullanılarak hesaplanabilir.

$$N_{Fo} = \alpha T / L^2 \quad (2.44)$$

Yukarıdaki denklemde,

T = Isıtma süresi

L = Şeklin kritik boyutu

3. Bağlı sınır direnci (m) denklem 2.45 kullanılarak hesaplanabilir.

$$m = k/hL \quad (2.45)$$

Yukarıdaki denklemde,

h = Sınır iletkenliği

4. Sıcaklık fonksiyonu (TF) denklem 2.46 ile hesaplanabilir.

$$TF = (t_f - t)/(t_f - t_i) \quad (2.46)$$

Yukarıdaki denklemde,

t_i = Parçanın başlangıç sıcaklığı

t_f = Sabit fırın sıcaklığı

t = Parçanın herhangi bir noktasındaki sıcaklık

2.5.6 Parçanın Isınma Süresi

.

Fırın içerisindeki iş parçasına dış yüzeyden ısı verildiğinde iş parçasının sıcaklığı belirli bir değere ulaşır. Bu durumda iş parçasının çekirdeğinde istenilen sıcaklığa ulaşma zamanının önceden bilinmesi önemlidir (Güventürk 2003).

Belirli bir ağırlıktaki iş parçasının istenilen sıcaklığa ulaşacağı süre denklem 2.47 kullanılarak hesaplanabilir.

$$Z = \frac{Gc}{Fa_{top}} \ln \frac{t_f - t_1}{t_f - t_2} \quad (2.47)$$

Yukarıdaki denklemde,

c = Isınan parçanın özgül ısısı (kJ/kgK)

F = İş parçasının ısı alan yüzeyinin alanı (m²)

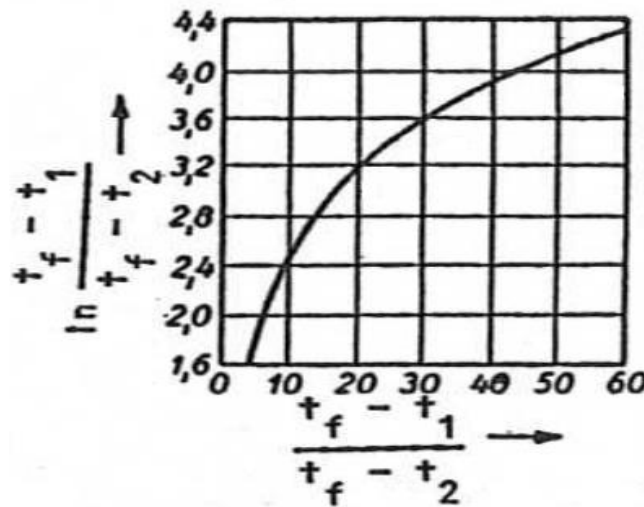
t_f = Fırın sıcaklığı (°C)

a_{top} = Fırından iş parçasına geçen ısı için toplam ısı geçme katsayısı (kJ/m²hK)

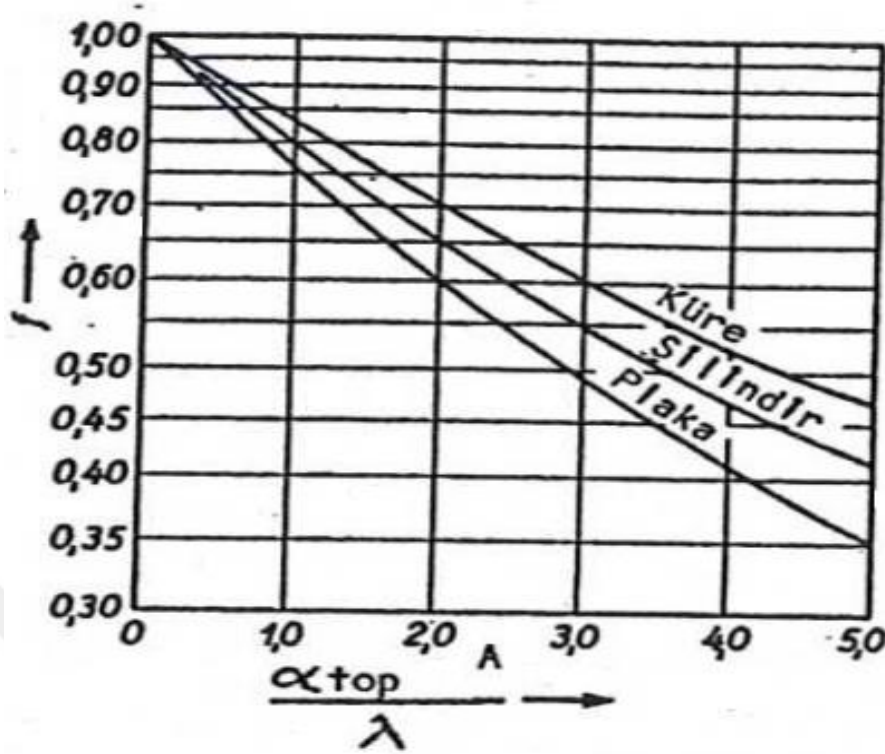
Elde edilen bu değer iş parçasının sıcaklığına bağlıdır ve ısınma süresinde de sürekli artar. Bu sebepten, ortalama sıcaklık t_m denklem 2.48 kullanılarak hesaplanır.

$$t_m = t_f - \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{t_f - t_1}{t_f - t_2}} \quad (2.48)$$

Şekil 2.76'dan, yukarıdaki eşitlikte bulunan $\frac{t_f - t_1}{t_f - t_2}$ değerinin tabi logaritması okunabilir.



Şekil 2.76 Isıtma süresinin hesaplanmasında yararlanılan diyagram (Topbaş 1991).



Şekil 2.77 Çeşitli formda parçaların ısınma sürelerinin hesaplanmasında yararlanılan diyagram (Topbaş 1991).

Öncelikle Şekil 2.76'daki logaritmik değere ulaşılır ardından denklem 2.48'den t_m hesaplanarak, a_{top} belirlenir. Bulunan sonuçlar sonrasında denklem 2.47'den ısınma süresi hesaplanabilir.

2.6 Refrakter Malzemeler

Refrakter malzemeler, sıcaklığa dayanıklı malzemeler olarak tanımlanır. Refrakter malzemeler 538 °C üstündeki sıcaklıklarda uzun süre çalışabilir. Refrakterler:

- Yapay olarak hammaddeden tek madde olarak üretilir.
- Doğal olarak oksitlerden meydana gelir.

Endüstride tavlama ve indüksiyon eritme fırınlarında, ısıtılma fırınlarında, pota yapımında, termo elemanların muhafazasında, silikat endüstrisinde ve elektrikli ısıtıcıların izolasyon malzemesi olarak kullanılır (Heine 1996).

2.6.1 Magnezyum Bileşimleri

Refrakter malzemeler aside dayanıklı beş bileşime sahiptir (Heine 1996):

1. Magnezyum oksit (MgO).
2. Cr_2O_3 gibi krom içeren malzemelerle kombinasyon halinde magnezyum oksit. Krom ana bileşen ise, o zaman krom-manyezit olarak adlandırılır. Magnezyum baskın bileşen ise, o zaman manyezit-krom olarak adlandırılır.
3. Spinel ile kombinasyon halinde magnezyum (magnezyum alüminyum silikat).
4. Magnezyum, karbonun refrakter agregaları birbirine bağlayan zift şeklinde olduğu %2,5 veya %4,5 karbon ile kombinasyon halinde.
5. Yaklaşık olarak eşit miktarda $MgCO_3$ ve $CaCO_3$ 'ten oluşan dolomit.

2.6.2 Alüminyum Oksit İçeren Bileşimler

Refrakter bileşimlerin bir başka sınıfı, %47,5'den fazla Al_2O_3 içeren yüksek alümina malzemelerdir (Nemenyi ve Bennett 1995).

1. Bileşik olarak %71,8 Al_2O_3 ve %28 SiO_2 olan mullit tuğla. Bu malzeme yüksek sıcaklıklarda mükemmel hacim stabilitesi ve mukavemetine sahiptir.
2. Kimyasal olarak bağlanmış alüminyum ortofosfat ($AlPO_4$) oluşturmak için tepki veren tuğla.
3. Alümina-krom oksit (Cr_2O_3) ve yüksek saflıkta alümina katı bir çözeltiden oluşan krom tuğla.
4. Alümina-reçine ile bağlanmış yüksek alümina grafit içeren bir bileşim olan karbon tuğlası.

2.6.3 Şamot Bileşimleri

Kompozisyon olarak, şamot sulu bir alüminyum silikattır ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$). Yüksek sıcaklıklarda dehidrasyondan sonra, artık malzeme %45,9 alümina ve %54,1 silika içermelidir.

2.6.4 Silika Refrakterler

Silika refrakterler yüksek sıcaklık (1693-1710 °C) eritme uygulamaları için kullanılır. 50 psi'ye kadar olan basınçlara dayanabilirler ve asit cürufuna kimyasal olarak dirençlidirler. Silika ateş tuğlasının iki ASTM sınıflandırması vardır: Tip A ve Tip B.

2.6.5 Monolitik Refrakterler

Monolitik refrakterler, neredeyse eklemsiz bir astar oluşturan kuru taneli veya uyumlu plastik malzemelerin özel karışımlarıdır. Plastik refrakter olarak sınıflandırılırlar; plastik refrakterlerden daha yoğun ve güçlü olan dolgu karışımları, bir fırın duvarına pnömatik olarak bağlanabilen püskürtme karışımları ve döküm ya da refrakter beton. Plastik refrakterler fireclay, yüksek alümina grafit, alümina-krom ve diğer malzemelerden hazırlanır (Johnson 1994).

2.7 Benzer Literatür Çalışmaları

Kang ve Rong (2004) “Modeling and simulation of load heating in heat treatment furnaces” başlıklı çalışmada bir ısıtma işlemi fırınının modellenmesi ve simülasyonu matematiksel ifadeler yardımıyla yapılmıştır. Nümerik metodla ısıtma işlemi açıklanmış ve bilgisayar ortamında matematiksel ifadeler ispatlanmıştır.

Ferguson vd. (2005) “Modeling heat treatment of steel parts” başlıklı çalışmada Dante adlı program kullanılarak çelik parçaların ısıtma işlemi sonrası sertlik değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Isıtma işlemi sonrasında parçalarda oluşan kalıntı gerilmeler ve bunların giderilmesi belirtilmiştir.

Zhang vd. (2007) “3-D Numerical analysis on heating process of loads within vacuum heat treatment furnace” başlıklı çalışmada PID sıcaklık kontrollü bir fırının nümerik ısı transferi modeli entegre edilmiştir. Isıtma işlemi fırınında ısı transferi simüle edilmiştir. Matematiksel ifadelerle ilgili olarak 3 boyutlu bir CAD programında da çalışma desteklenmiştir.

Bouvman vd (2005) “Heat transfer from typical loads within gas quenching furnace” başlıklı çalışmada gaz ısıtmalı su verme fırınında malzemelerin tabaka şeklinde yerleştirilmesi ile silindir şeklinde yerleştirilmesi arasındaki farklar incelenmiştir. Parçaların dizilimlerinin ısıtmayı nasıl etkilediği gözlemlenmiştir. Malzemelerin homojen ısınması için parçaların aralıklı konulması ve her yüzeyden sıcaklığa direkt maruz kalmasının daha faydalı olduğu sonucuna varılmıştır.

Abbassi ve Khoshmanesh (2007) “Numerical simulation and experimental analysis of an industrial glass melting furnace” başlıklı çalışmada endüstriyel cam ergitme fırınının Ansys programında analizi yapılmıştır. Yanma odası, cam tankı ve battaniyenin içinde olduğu bir model tasarlanmıştır. Basit nümerik hesapları yapıldıktan sonra bilgisayar ortamında analizi sonuçlandırılmıştır.

Çamdali vd. (2002) “Second law analysis of thermodynamics in the electric arc furnace at a steel producing company” başlıklı çalışmada çelik üretim prosesinde fırınların önemi anlatılmış ve fırınların çalışma prensibini matematiksel olarak açıklanmıştır. Termodinamiğin yasalarından faydalanan yazılan bu makalede ısı kayıplarından ve verimden bahsedilmiştir.

Acar (2001) 4 kW gücünde yüksek sıcaklık fırını tasarımını ve yapımını gerçekleştirmiştir. Fırın içi kullanılabilir hacim 5,4 litredir. Fırın içi sıcaklığı 115 dakikada 1200 °C’ye ulaşabilmektedir. Fırına ek olarak tasarlanan, sayısal göstergeli zaman oransal sıcaklık kontrol ünitesi ile fırın sıcaklığı istenilen sıcaklık değerine ayarlanabilmektedir.

Nakamura vd. (2003) “Transient Heat Transfer Analysis In Vacuum Furnaces Heated By Radiant Tube Burners” başlıklı çalışmada radyasyonla, iletimle ve taşınım ile olan ısı geçişleri açıklanmış ve grafik yardımıyla değişimler ortaya konulmuştur.

Akgün (2004) endüstride ve sağlık alanında sıkça kullanılan 10 kW gücünde ve 250° C maksimum sıcaklığa sahip bir fırının sıcaklık denetimini, mikroişlemci ve PI denetim algoritması kullanarak gerçekleştirmiştir. Bu sayede bir fırının sıcaklık kontrolünde ortaya çıkan iki temel problemde ilerleme kaydedilmiştir. Bunlar; PI’da meydana gelen osilasyonlar ve fırının içinde kullanılan malzemelere bağlı olarak sistem parametrelerindeki değişimlerdir.

Bayındır (2007) seramik ürün pişirilmesinde kullanılan elektrikli bir fırının kontrolünü tasarlamış ve uygulamasını gerçekleştirmiştir. Tasarlanan fırın, biblo gibi küçük seramik ürünlerin pişirilmesinde kullandığı için 100x50x50 cm ebatlarında yapmıştır. Sistemin otomasyonunda PLC kullanmıştır. Fırına ait sıcaklık değerlerini termokupllar yardımıyla alarak analog modül yardımıyla PLC’ye aktarmış ve elde edilen değerlere göre fırın sıcaklığını kontrol etmiştir. Ayrıca kontrol paneli yardımı ile istenilen sıcaklık değerini ve fırın içi sıcaklığının ekrandan izlenmesini sağlamıştır.

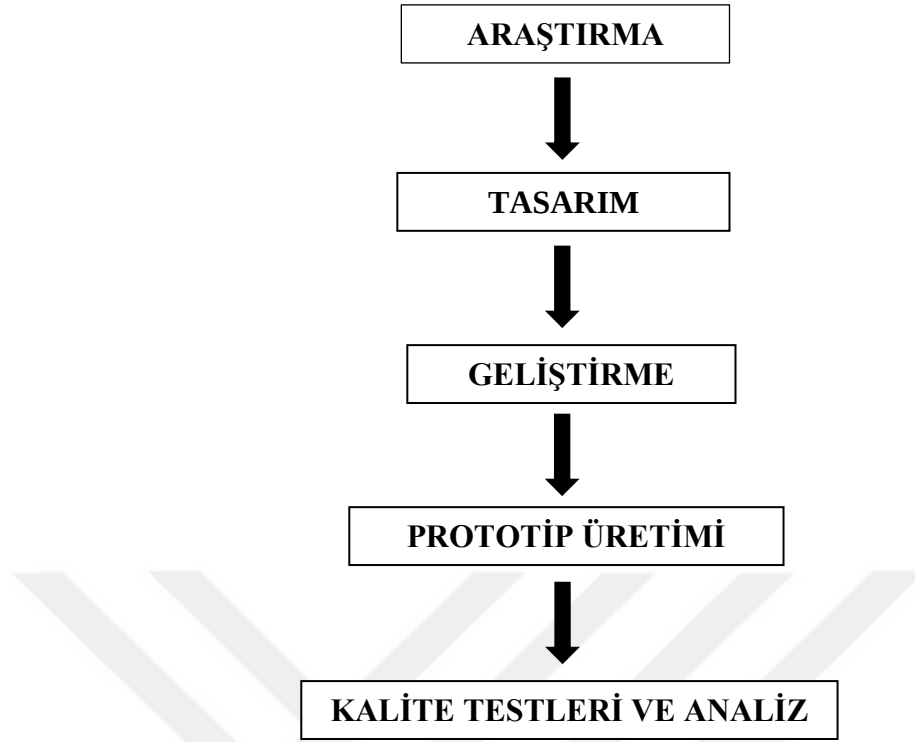
3. MATERYAL VE METOT

3.1 Tasarım

Fırının imalatına geçilmeden önce fırında uygulanacak bütün işlemlerin gereksinimleri belirlenerek, her koşulda yüksek verimde çalışabilmesi için gerekli gövde ve yalıtım özellikleri oluşturulup tasarım tamamlandıktan sonra imalat için hazır hale getirilmiştir. Isıl işlem fırınının tasarımını etkileyen birçok sınırlama vardır. Bu sınırlandırmalardan en önemlisi iş parçasının istenilen sıcaklığı öngörülen süre içerisinde ulaşabilmesidir. Sınırlandırmalar dikkate alındığında fırın boyutlandırılması ve yalıtımın özellikleri ısı transfer hesaplamaları sonucu elde edilen verilere göre belirlenerek nihai tasarım tamamlanmıştır.

3.1.1 Tasarım Özellikleri

Tasarım, herhangi bir ihtiyacın karşılanabilmesi için plan oluşturma yanısıra bir sorunun çözülmesi de olabilir. Mühendislikte tasarım süreci sadece çözüm bulmaktan ibaret değildir. Üretimi yapılacak ürünün estetik görünüşünün yanı sıra yeterli mukavemet, aşınmaya karşı direnç, düşük sürtünme, kolay imal edilebilirlik, minimum malzeme kullanımı ve kolay montaj gibi parametrelerdir. Bu parametrelerin yanı sıra fiziksel bir ürün elde edilecekse emniyetli, kullanışlı, işlevsel, üretilebilir, rekabet edebilir ve pazarlanabilir olması gerekir. Tasarım süreçlerinde mühendisi başarıya götüren en önemli unsurlardan biri bilgisayar ortamında tasarım kavramları hakkında yeterli derecede bilgi sahibi olmasıdır. Tasarım süreçleri Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1 Mühendislikte tasarım süreçleri (İnt.Kyn.7).

Tasarımı başlatan en önemli faktör kullanıcı ihtiyacıdır. İhtiyaç tanımlaması yapılırken genel ifadeler kullanılmalıdır. Problemin açıklanması, ihtiyacın tanımlanmasıyla ayrı kavramlardır. Problemin açıklanması; ihtiyacın detaylandırılmasıdır. Bu açıklamaya tasarım hedefleri, kısıtları, girdi ve çıktıları dahildir. Sorunun doğru bir şekilde ele alınması ve verilerle desteklenmesi mühendise çözüm arayışında avantaj sağlar.

Araştırmalar sonucunda taslak fikirlerin belirlenmesiyle ilk tasarım oluşur. Genelde tek bir tasarım yerine farklı seçenekler belirleyip bu seçenekler arasından seçim yapmak tercih edilmektedir.

İmal edilebilirliği de hesaba katıldıktan sonra öngörülen çözümler değerlendirilir ve uygun çözüm bulunur.

Son aşamada ise oluşturulan matematiksel modelleme üzerinden tasarım gereksinimleri değerlendirilir. Değerlendirme, süreç işleyişi açısından önemlidir ve genellikle prototip üretimini içerir.

Prototip üzerinden yapılan sorgulamalar;

- Problemin çözümü ne ölçüde sağlandı?
- Tasarımı yapılan ürün planlandığı gibi kullanışlı mı?
- Test sonuçlarına göre tasarım güvenilir mi?
- Üretim maliyeti planlandığı gibi düşük mü?
- Oluşacak arızalar geri çağırımlara neden olur mu?

Tasarımı ve prototip imalatı yapılacak olan ısıtma işlemi fırını, mekanik bir sistem olduğundan tasarım için gerekli program seçimi bu faktörler doğrultusunda yapılmıştır. Bu nedenle yapılan araştırmalar sonucunda tasarımın mekaniksel, mimari ve ürün görşelliğı gibi farklı alanlarda kullanılabilen 2 boyutlu, 3 boyutlu, yüzey ve katı modelleme gibi birden fazla modelleme türü bulunan CAD programı Solidworks'de yapılmasına karar verilmiştir. 3 boyutlu katı model tasarımı için Solidwork programının seçilmesinde tasarımda kullanılan makine elemanlarının, dünya standartları karşılıklarını kütüphanelerinde bulundurması etkin olmuştur. Programın parça kütüphanesinden istenilen standart bağlantı elemanlarına vb. ulaşarak tasarımda eksiksiz bir şekilde kullanılmıştır. Bu avantajlar sayesinde tasarım sürecinde karşılaşılabilecek zorluklar ve zaman kayıpları en aza indirgenmiştir.

Taslak çalışmasında ısıtma işlemi fırının nihai boyutlarına ve çalışma mekanizmasına karar verilmiştir. Taslak çalışmasının sonrasında fırının 3 boyutlu tasarımı yapıp, sistemde ki tüm parçalar modellenerek montaj işlemi yapılmıştır.

3.2 İmalat

Isıtma işlemi fırınının katı model tasarımı ve program üzerinde parça montajları yapıldıktan sonra ısı transfer hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Hesaplama sonuçlarına göre uygulanacak izolasyon malzemelerinin seçimi ve boyutlandırılması yapılmıştır. Fırın tasarımı tamamlandıktan sonra hareket halindeki parçaların birbiri ile uyumluluğı sanal ortamda doğrulanmıştır. Fırında tasarım ve ölçüsel sorunlar olmadığı kesinleştikten sonra imalat sürecine geçilmiştir.

3.2.1 Kullanılan Hammadde ve İmalat Türleri

Isıl işlem fırınının tasarım ve tasarımı doğrulama adımları tamamlandıktan sonra, fırına ait parçaların imalat resimleri hazırlanmıştır. İmalat resimleri teknik resim standartlarının yanında parça özelliklerine bağlı olarak ölçü, ölçü toleransı, yüzey-konum toleransları, kaynak bilgilerini üzerinde bulunduracak şekilde hazırlanmıştır.

Teknik resimler hazırlandıktan sonra imalat yöntemleri belirlenmiştir. Isıl işlem fırını imalatında kullanılan hammadde ve temin edilen parçalar:

- Farklı kalınlıklarda St52 çelik saclar
- Kare profiller
- Köşebentler
- Lama malzemeler
- Bağlantı elemanları (Cıvata,somun...)
- Farklı çaplarda makaralı tekerlek
- Mil malzemeleri
- Seramik board
- Seramik battaniye
- Ateş tuğlası
- Rezistans askı tuğlası
- Seramik boru
- Kanthal A1 rezistans teli
- Paslanmaz çelik terminal
- Termokupl

Tasarım tamamlandıktan sonra hammadde ve temin edilen parçalar sonrası üretimde kullanılan imalat türleri:

- Plazma kesim
- Torna işleme
- Cnc freze dik işleme

- Matkap delme işlemi
- Cnc abkant büküm
- Gaz altı kaynak
- Testere ile kesim
- Tesviye işlemi
- Montaj
- Boyama işlemi

3.2.2 Gövde İmalatı

Tasarımı gerçekleştirilen ısıtıl işlem fırını imalatı teknik resimler çıkarıldıktan sonra yapılmaya başlanmıştır. Isıl işlem fırınının gövde imalatında belirlenen ölçülere göre 6 mm'lik St 52 çelik sac kullanılmıştır.

Gövde imalatında kaynakla birleştirme işleminde meydana gelebilecek çarpılma ve distorsiyon durumları dikkate alınarak kaynak parametleri önceden belirlenip malzemeler sabit kalacak şekilde fiyktürler hazırlanarak gövde imalatı gerçekleştirilmiştir.

3.2.3 Yürüyen Taban İmalatı

Yürüyen taban imalatı yapımında tasarlanan parçalar cnc plazma kesim ile kesilmiştir. Sac kalınlığına göre uygun amper değeri ve kesim hızı ayarı parçaların kesim esnasında birebir ölçülerde imal edilmesi açısından çok önemlidir. Bu parçalar tasarlanırken taban sacı yük taşıyıcı bir sistem olduğu için mukavemet açısından fayda sağlayacak destek lamaları belirlenen ölçülerde kaynatılmıştır.

Taban sacı fırın içerisinde makaralı tekerlekler vasıtası ile hareket etmektedir. Tekerleğin fırın içerisindeki hareketini sağlayacak olan ray sistemi için fırın tabanına mil kaynatılmıştır. Tekerliğin taban sacına montajı standart boyutlardaki cıvatalar ile sağlanmıştır. Cıvata bağlantısı sayesinde mesafe ayarlanabilmekte ve yönlendirme sağlanabilmektedir.

Yük taşıyıcı taban sacı fırının bakım ve sevkiyat aşamaları göz önüne alınarak, sökülebilir bağlantı elemanı cıvata tercih edilmiştir. Bu şekilde montajın sökülebilir bir bağlantı ile yapılması gereksiz işçilik ve maliyet kayıplarını önlemektedir.

3.3 Mekaniksel Donanımlar

3.3.1 Profiller, Saclar, Lamalar ve Miller

Saclar cnc plazmada kesilerek fırının gövde imalatında ve yük taşıyıcı taban mekanizmasında kullanılmıştır. Kullanılan St 52 çelik sacın mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Lamalar gövde ve taban imalatında yükleme esnasında sacda meydana gelebilecek şekil değişikliklerine karşı mukavemet sağlaması amacıyla kaynaklı birleştirme yöntemiyle kullanılmıştır. Profiller ise rezistans askı tuğlalarının gövde yan duvarları üzerinde konumlandırılması için kullanılmıştır. Fırın içerisinde yapılacak yükleme ve boşaltma işlemlerini sorunsuz bir şekilde gerçekleştirmek için tekerleklerin üzerinde hareket edeceği ray sistemi mil kullanılarak yapılmıştır.

Çizelge 3.1 St 52 çelik mekanik özellikleri (İnt.Kyn.8).

Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HB)
345	570	35	160

3.3.2 Makaralı Ray Tekerleği

Isıl işlem fırınlarında kullanılan tekerlekler yükleme ve boşaltma mekanizmasının taşınması, yönlendirilmesi ve uygulanan kuvvetle ileri ve geri aktarma gibi birden fazla işlevi yerine getirmektedir. Fırın üzerinde tabana ileri ve geri hareketi verecek olan tekerlek için dış çap 60 mm’lik ve 100 mm’lik makaralı tekerlekler uygun görülmüştür.

Tasarım esnasında ısıya karşı dayanıklılığı ve yük taşıma değerleri göz önünde bulundurularak makaralı ray tekerleği tercih edilmiştir.

Fırının ray sisteminde kullanılan makaralı tekerlek özellikleri:

- Yüksek sıcaklıklarda iyi bir korozyon direnci.
- Kepli muhafazalı ray makarası.
- M12 4 delikli flanş.

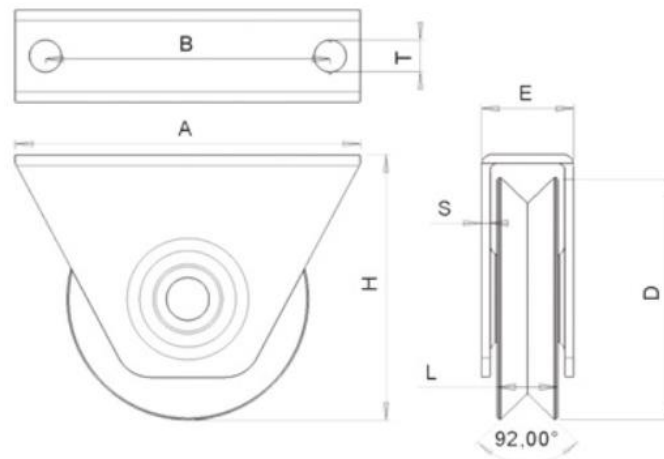
Fırın üzerinde kullanılan makaralı ray tekerleğine ait görsel Resim 3.1’de gösterilmiştir.



Resim 3.1 Makaralı ray tekerleği.

Doğukan firmasının katalog bilgilerine göre $\varnothing$ 60 mm ve $\varnothing$ 100 mm makaralı tekerleklere ait olan boyutsal değerler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Makaralı tekerlek ölçü değerleri (İnt.Kyn.9).



Çap (mm)	A (mm)	B (mm)	H (mm)	T (mm)	E (mm)	S (mm)	D (mm)	L (mm)
Ø 60	95	70	70	9	28	3	58	17
Ø 100	128	100	104	9	36	3	98	20

3.3.3 Terminal Seçimi

Fırın içerisinde kullanılacak olan terminallerin seçiminde göz önünde bulundurulması gereken birkaç kriter vardır. Bunlardan en önemlisi kullanılacak olan malzemenin sıcaklığa ve korozyona karşı yüksek dayanım göstermesidir. Bu kriterler göz önünde bulundurularak 310 paslanmaz çelik terminallerin kullanılmasına karar verilmiştir. Fırın içerisinde kullanılan 310 paslanmaz çelik terminaller Resim 3.2’de görülmektedir.



Resim 3.2 310 paslanmaz çelik terminal.

3.4 İzolasyon Ürünleri

Fırın imalatında kullanılan izolasyon ürünleri İzoref firmasından temin edilmiştir.

3.4.1 Seramik Elyaf Plaka (Board)

Fırın içerisinde ısı yalıtımını sağlamak amacıyla tasarım ve ısı transfer hesaplamalarına göre fırın duvarları, fırın tabanları ve fırın kapaklarında kullanılmıştır. 1430 °C’ye kadar kullanılabilme, düşük termal iletkenlik, hafiflik, kolay kesilebilme ve şekil verilebilme, aşınmaya karşı direnç ve düşük ısı depolaması nedeniyle ısıtılma işlemi fırını içerisinde ısı yalıtımını sağlamak amacıyla seramik elyaf plakalar kullanılmıştır. Fırın içerisinde kullanılan seramik elyaf plakalar Resim 3.3’de görülmektedir.

Seramik elyaf plakaların teknik özellikleri (İnt.Kyn.10):

- Sınıflandırma sıcaklığı: 1430 °C
- Kalınlık: 50 mm
- Yoğunluk: 300 kg/m³
- Kırılma Dayanımı: 0,5 MPa
- Isısal küçülme: %1,6
- Termal iletkenlik: 0,22 W/m°K



Resim 3.3 Seramik elyaf plaka (Board).

3.4.2 Seramik Elyaf Battaniye (Blanket)

Fırın duvarları, fırın tabanları ve fırın kapaklarında ısı yalıtımı sağlamak amacıyla seramik elyaf plakalarla beraber kullanılmıştır. Üretim ortamında oluşması muhtemel nemli, yağlı ortamlarda fiziksel özelliklerini koruyabilmesi kullanım kolaylığı sağlamıştır. Bunların yanında yüksek ısı yalıtımı, düşük ısı depolaması, termal şoklara karşı direnç ve yüksek sıcaklıklarda minimum küçülme gibi özellikleri vardır. Fırın içerisinde kullanılan seramik elyaf battaniler Resim 3.4’de görülmektedir.

Seramik elyaf battaniyelerin teknik özellikleri (İnt.Kyn.10):

- Sınıflandırma sıcaklığı: 1430 °C
- Kalınlık: 50 mm
- Yoğunluk: 100 kg/m³
- Isısal küçülme: %1,6
- Termal iletkenlik: 0,5 W/m°K



Resim 3.4 Seramik elyaf battaniye (Blanket).

3.4.3 Ateş Tuğlası

Hareketli fırın tabanında ısı yalıtımı sağlamak amacıyla ateş tuğlası kullanılmıştır. Fırın içerisinde işlem görecektir iş parçalarının taban üzerine yerleştirilmesinden dolayı diğer yalıtım malzemelerinden daha yüksek mukavemet özelliklerine sahip olduğu için taban kısmında ateş tuğlası tercih edilmiştir. Yüksek mukavemet özelliğinin yanı sıra yüksek sıcaklıklara karşı dayanım, yüksek termal şok dayanımı gibi üstün özellikleri tasarım ve imalat aşamalarında tercih edilmiştir. Fırın yürüyen taban mekanizmasında kullanılan ateş tuğlası Resim 3.5’de görülmektedir.

Ateş tuğlasının teknik özellikleri (İnt.Kyn.10):

- Kullanım sıcaklığı: 1430 °C
- Yükseklik, genişlik, kalınlık: 22 cm, 11 cm, 6 cm
- Yoğunluk: 800 kg/m³
- Termal iletkenlik: 2,51 W/m°K
- Soğuk baskı mukavemeti: 2,2 MPa
- Kırılma modülü: 15
- Genleşme: %0,48



Resim 3.5 Ateş tuğlası.

3.4.4 Rezistans Askı Tuğla

Rezistans askı tuğlaları fırın içerisinde spiral olarak sarılmış rezistansların dizilmesi amacıyla kullanılmıştır. Askı tuğlalarının uç bölümlerindeki gaga şekli seramik boruların oturmasına uygun bir şekilde imal edilmektedir. Yaklaşık 1400 °C’lerde kullanıma uygun olan askı tuğlalar gözenekli ve hafif olmaları nedeniyle enerjiden ve kütleden tasarruf edilmesine olanak sağlamıştır. Fırın içerisinde kullanılan rezistans askı tuğlaları Resim 3.6 ‘da görülmektedir. Rezistans askı tuğlalarının teknik özellikleri (İnt.Kyn.10):

- Klasifikasyon sıcaklığı: 1427 °C
- Yükseklik, genişlik, kalınlık: 22 cm, 7 cm, 7 cm
- Yoğunluk: 0,76 kg/m³
- Soğuk basma mukavemeti: 1,8 MPa



Resim 3.6 Rezistans askı tuğlası.

3.4.5 Seramik Taşıyıcı Boru

Fırının sorunsuz çalışmasında ve rezistans telin uzun süre kullanılabilmesinde rezistans taşıyıcı olarak fırın içerisinde seramik borular kullanılmıştır. Rezistansların güçlerinin ve yüzey yüklerinin hesaplanmasından sonra seramik boruların çapı belirlenmiştir. Seramik borunun seçiminde mukavemet ve termal şoklara karşı direnç özelliklerinin yanı sıra demir oksit içermemesi de seçimde bir başka önemli faktördür. Kullanılan seramik borunun demir oksit içermesi rezistansda ark oluşmasına ve dolayısıyla fırının çalışmasına engel olacağı için üretim kaybına neden olabilmektedir. Üretimi laser teknolojisiyle gerçekleştirildiğinden yüzey pürüzsüzlüğü ve düzgün silindirik yapısı son derece hassastır. Fırın içerisinde taşıyıcı olarak kullanılan seramik borular Resim 3.7’de görülmektedir. Seramik taşıyıcı boruların teknik özellikleri (İnt.Kyn.10):

- Yoğunluk: 2,90 kg/m³
- Çap: 35 mm
- Kırılma katsayısı: < 36 N/mm²
- Isısal küçülme: %1,5
- Porozite: %16



Resim 3.7 Seramik taşıyıcı boru.

3.4.6 Rezistans Teli

Fırın içerisinde ısıtma elemanı olarak Kanthal A1 kalite rezistans teli kullanılmıştır. Demir-krom-alüminyum alaşımından oluşan Kanthal A1 kalite rezistans telinin kullanım sıcaklığı 1400 °C'dir ve kararlı oksit tabakasına sahiptir. Tasarımı tamamlanan ısıtma fırınında çalışma sıcaklığı ve diğer parametreler belirlendikten sonra rezistans hesaplamaları yapılarak kullanılacak telin çapı, uzunluğu ve sarım sayısı bulunmuştur. Fırın ısıtma elemanı Kanthal A1 kalite rezistans teli Resim 3.8'de görülmektedir. Kanthal A1 kalite rezistans teli teknik özellikleri (İnt.Kyn.10):

- Çap: 4 mm
- Uzunluk: 3800 mm
- Sarım sayısı: 305
- Direnç: 0,114 ohm/mt



Resim 3.8 Kanthal A1 rezistans teli.

3.5 Tam Otomasyonlu Fırının Çalışmasında Oluşturulacak Algoritma İçin İmalat Çeliklerine Uygulanan Deneysel Çalışmalar

Metalurji ve malzeme mühendisliğinin en çok etkileşim halinde bulunduğu imalat sektörlerinde yaygın olarak kullanılan imalat çelikleri için uygulanan deneysel çalışmalar iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

İlk aşamada cnc plazmada standartlara uygun şekilde hazırlanmış deney numunelerine suda, yağda ve tuzlu suda sertleştirme ısıt işlemleri ve ardından temperleme işlemleri uygulanmıştır. İkinci aşamada üç farklı ortamda sertleştirme ve temperleme işlemleri uygulanan deney numunelerinin metalografik, sertlik ve çekme dayanımı incelemeleri yapılmıştır.

Üç farklı ortamda uygulanan ısıt işlemler sonrası numunelerin mikroyapısında meydana gelen değişiklikler ve faz oranları optik mikroskop yardımıyla incelenmiştir. Sertlik sonuçları Brinell sertlik ölçüm cihazında incelenmiştir. Bu üç ortamda uygulanan ısıt işlemler sonucu numunelerin çekme ve akma mukavemetlerinde meydana gelen değişiklikler 600 kN otomatik çekme basma deney cihazında incelenmiştir.

3.5.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Deneyisel çalışma süreçlerinde kullanılan malzemeler, ısıt işlemlerinde kullanılan malzemeler ve ısıt işlemler sonrası incelemelerde kullanılan deney cihazları olarak sınıflandırılmıştır.

Deneylerde kullanılan malzemeler, ısıt işlem uygulanacak çelikler ve ısıt işlem sertleştirme ortamlarından oluşmaktadır. Isıt işlemler sonrası incelemelerde kullanılan laboratuvar malzemelerini kapsamaktadır.

3.5.1.1 Deneylerde Kullanılan Çelik Malzemeler

Metalografik ve mekanik deneylerde kullanılan malzemeler; üretim sektöründe en yaygın kullanılan imalat çelikleridir. Bunlar:

- AISI 1040
- AISI 1045
- AISI 1050
- St 52
- St 60

Deneylerde kullanılan çelik malzemelerin kimyasal bileşimleri Çizelge 3.3’de, ısıt işlemleri bilgileri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Deneylerde kullanılan çelik malzemelerin kimyasal bileşimleri (İnt.Kyn.11).

Malzeme Cinsi	Kimyasal Bileşim (% Ağırlık)				
	Karbon (C)	Silisyum (Si)	Mangan (Mn)	Fosfor (Pmax)	Sülfür (Smax)
AISI 1040	0.40-0.50	0.25-0.35	0.60-0.90	0.04	0.05
AISI 1045	0.42-0.50	0.15-0.35	0.50-0.80	0.045	0.045
AISI 1050	0.45-0.55	0.15-0.35	0.50-0.80	0.045	0.045
AISI St 52	0.15-0.20	0.20-0.40	1.20-1.50	0.040	0.040
AISI St 60	0.36-0.44	0.25-0.30	0.20-0.50	0.050	0.050

Çizelge 3.4 Deneylerde kullanılan çelik malzemelerin ısıt işlemleri bilgileri (İnt.Kyn.11).

Malzeme Cinsi	Sıcak Şekillendirme Sıcaklığı (°C)	Yumuşatma Tavlama Sıcaklığı (°C)	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Sertleştirme (°C)		Meneviş Sıcaklığı (°C)
				Su	Yağ	
AISI 1040	850-1100	650-700	850-890	820-850	830-860	550-660
AISI 1045	850-1100	650-700	840-880	820-850	830-860	540-680
AISI 1050	850-1050	650-700	825-865	820-850	830-860	540-680
AISI St 52	850-1100	680-720	880-920	880-900	890-950	550-650
AISI St 60	850-1100	680-720	860-900	880-900	890-950	550-650

3.5.1.2 Isıl İşlem Soğutma Ortamları

Deneylerde soğutma ortamı olarak üç farklı ortam seçilmiştir. Bunlar:

- Su
- Yağ
- Tuzlu su

Sorunsuz bir ısıtım işlem süreci için malzeme cinsine göre soğutma ortamının belirlenmesi çok önemlidir. İdeal soğutma ortamı, başlangıç soğuma hızının olabildiğince yüksek, malzemedeki distorsiyonun önlenmesi için de düşük sıcaklıklarda soğuma hızının düşük olmasını sağlamalıdır. Su ve tuzlu su çözeltileri gibi soğutma sıvıları, buhar filmi devresindeki soğuma hızının yüksek olmasını sağlarlar. Fakat, bu soğuma hızları düşük sıcaklıklarda da devam ettiğinden, malzemede şekil bozukluklarına veya çatlamaya neden olurlar. Geleneksel soğutma yağlarıyla uzun bir buhar filmi evresi ve düşük soğuma hızına sahip kısa bir buhar taşınımı evresi elde edilir. Böylelikle çarpılma ve çatlama riski minimum seviyeye düşürülür. Soğutma ortamı olarak yağ kullanıldığında en uygun soğuma hızları, 50 °C – 65 °C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleşir.

Bazı soğutma ortamlarının soğutma hızları Şekil 3.2’de verilmiştir.

Su Verme Ortamı	Soğuma hızı ölçüm sıcaklıkları (°C)					
	740		650		680-480	
	Banyo sıcaklıkları (°C)					
	24	52	24	52	24	52
	Soğuma hızı (°C/s)					
%10' luk tuzlu su	212	164	212	181	213	159
Musluk suyu	117	26	124	65	122	98
Gulf süper su verme yağı	44	47	94	100	75	76
Yavaş su verme yağı (%10 yağ-%90 su)	20	17	17	14	22	24
Durgun hava	3	-	2	-	2	-
Erimiş tuz	90		72		37	

Şekil 3.2 Değişik soğutma ortamlarında su verme esnasında elde edilen soğuma hızları (Tayan ve Başkaya 2001).

Soğutma ortamını karıştırmak ya da soğutulan iş parçasını karıştırıcı gibi hareket ettirmek soğutma hızını artırır. Bu işlem sayesinde, iş parçasının yüzeyinde oluşan buhar filminin anında yok olmasına, böylelikle iş parçasının soğuma hızında artışa neden olur. Su verme ortamlarının bazı durumlardaki soğutma şiddetleri Şekil 3.3’de verilmiştir.

Su verme yöntemi	Su verme ortamı		
	Yağ	Su	Tuzlu su
Durgun ortamda, parça hareketsiz	0,25-0,30	0,9-1,0	2,0
Hafif sirkülasyon veya az hareket	0,30-0,35	1,0-1,1	
Hızlı sirkülasyon	0,50-0,80	1,6-2,0	
Orta halli sirkülasyon	0,35-0,40	1,2-1,3	2,0-2,2
İyi sirkülasyon	0,40-0,50	1,4-1,5	
Çok hızlı sirkülasyon	0,80-1,10	4,0	5,0

Şekil 3.3 Bazı soğutma ortamlarının değişik soğutma yöntemleri sonucunda elde edilen soğutma şiddetleri (Tayan ve Başkaya 2001).

3.5.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Isıtma işlemleri İzomsa marka 150 kVA gücündeki yüzey sertleştirme amaçlı indüksiyon ısıtma cihazında yapılmıştır. Isıtma işleminde kullanılan indüksiyon cihazı Resim 3.9’da görülmektedir.



Resim 3.9 Sertleştirme işlemi için numunelerin ısıtılmasında kullanılan İzomsa marka indüksiyon makinası.

Sertleştirilen numunelerin metalografik incelemelere hazırlanmasında, kesme işlemi Onalkon Model Q-2 metalografi numune kesme cihazı ile kesilip zımparalama ve yüzey parlatma işlemine hazır hale getirilmiştir. Kesme işleminde kullanılan metalografi numune kesme cihazı Resim 3.10’da görülmektedir.



Resim 3.10 Numunelerin kesilmesinde kullanılan Onalkon Model Q-2 metalografi numune kesme cihazı.

Kesilen numunelerin zımparalanması ve yüzey parlatılmasında Metkon Forcipol marka parlatma cihazı kullanılmıştır. Parlatma işlemi yapılan numuneler %5 nital ile dağlanıp yüzeyi kurutularak mikroyapı incelemesi için hazır duruma getirilmiştir. Zımparalama ve yüzey parlatma işlemlerinde kullanılan parlatma cihazı Resim 3.11’de görülmektedir.



Resim 3.11 Numune zımparalama ve yüzey parlatma işlemlerinde kullanılan Metkon Forcipol marka parlatma cihazı.

Metalografik incelemeler Metkon İMM 901 marka optik mikroskopta Clemax Pro Görüntü analiz yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Metalografik incelemelerde kullanılan optik mikroskop Resim 3.12’de görülmektedir.



Resim 3.12 Mikroyapı incelemelerinde kullanılan Metkon İMM 901 marka optik mikroskop.

Mikroyaları incelenmiş metalografi örneklerinin sertlik ölçümlerinde Bms Digirock-Rbov marka sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümlerinde kullanılan sertlik ölçüm cihazı Resim 3.13’de görülmektedir.



Resim 3.13 Sertlik ölçümlerinde kullanılan Bms Digirock-Rbov marka sertlik ölçüm cihazı.

Deney malzemelerinin çekme testi incelemeleri UTEST 600 kN otomatik çekme basma deney cihazında yapılmıştır. Çekme testi incelemelerinde kullanılan çekme deney cihazı Resim 3.14’de görülmektedir.



Resim 3.14 Çekme testi deneylerinin yapıldığı Utest marka çekme cihazı.

Isıl işlem sonrası temperleme işlemi İzoref marka fırında yapılmıştır. Temperleme ısııl işleminin yapıldığı fırın Resim 3.15’de görülmektedir.



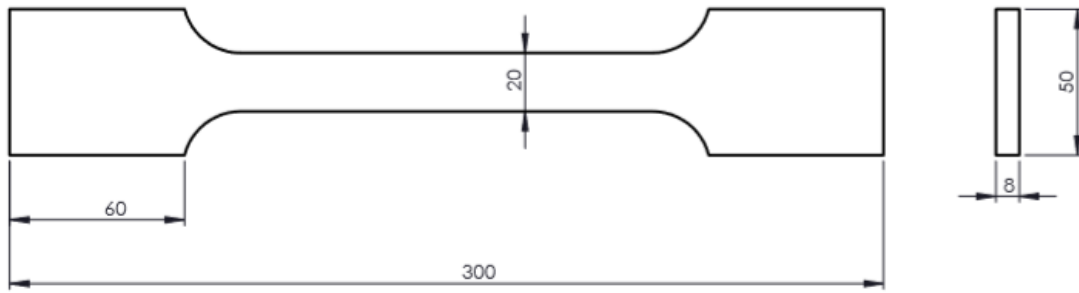
Resim 3.15 Temperleme ısııl işleminin yapıldığı numune fırını.

3.5.3 Deneylerin Yapılışı

Deneyisel çalışmalar, ısıtma işlemi yapılacak numunelerin hazırlanması, sertleştirme ısıtma işleminin yapılması, temperleme işleminin yapılması, sertleştirme ve temperleme sonrası metalografik, sertlik ve çekme dayanımı incelemelerin yapılması aşamalarından oluşturulmuştur.

3.5.3.1 Isıl İşlem Yapılacak Numunelerin Hazırlanması

Deneylerde kullanılan 8 mm kalınlığa sahip numunelerin teknik resmi Şekil 3.4’de görülmektedir. Numuneler cnc plazmada kesildikten sonra cnc freezede ısıtma işleme hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.4 Isıl işlem yapılacak numunelerin teknik resmi (İnt.Kyn.12).

3.5.3.2 Su Verme Ortamlarının Hazırlanması

Hazırlanan numelerin ısıtma işleminden sonra soğutulması için üç farklı soğutma tankı hazırlanmıştır. Hazırlanan soğutma tanklarının içerisi su, yağ ve tuzlu su ile doldurulmuştur.

3.5.3.3 Isıl İşlemler

Kimyasal bileşimleri Çizelge 3.3’de verilen çelik numuneler, Çizelge 3.4’deki sertleştirme ısıtma işlemi için gerekli sıcaklıklara indüksiyon cihazında ısıtılmıştır. Isıtma işleminden sonra üç farklı soğutma ortamında su verme işlemlerine tabi tutulmuştur.

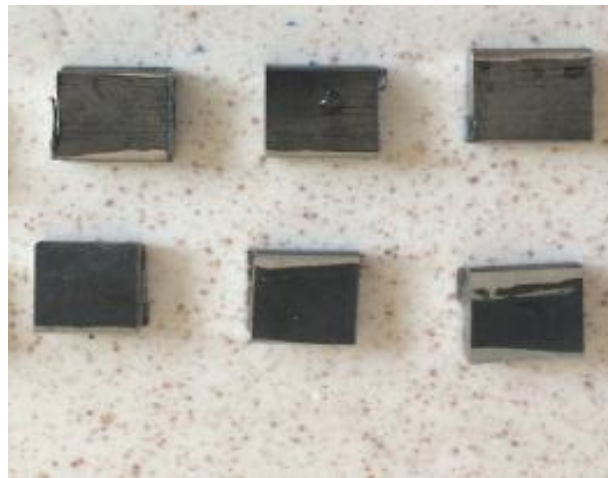
Sertleştirme sonrasında numunelerin temperleme işlemleri Çizelge 3.4’de verilen sıcaklıklarda kalınlığa göre belirlenen sürelerde fırında tutulduktan sonra havada soğumaya bırakılmıştır. Sertleştirme ve temperleme ısı işlemleri uygulanan numuneler Resim 3.16’da görülmektedir.



Resim 3.16 Isıl işleme tabi tutulan çelik numuneler.

3.5.3.4 Metalografik Çalışmalar

Isıl işleme tabi tutulan malzemelerin iç yapılarının tespiti için metalografik çalışmalar yapılmıştır. Çekme deneyi yapıldıktan sonra kırılan numuneler kesme cihazında zımparalama ve yüzey parlatma için hazır hale getirilmiştir. Mikroyapı incelemesi yapılacak numuneler Resim 3.17’de görülmektedir.



Resim 3.17 Zımparalama ve yüzey parlatma işlemi için hazırlanan çelik numuneler.

Numuneler sırasıyla 60-120-240-360-400-600-800-1000-1200'lük zımparalarla kesit yüzeyleri hazırlandıktan sonra, 0,25 µm'lik elmas pastayla parlatılmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra numune yüzeyleri alkol ile temizlenerek kurutulmuştur. Parlatılan yüzeyler %5 nital çözeltisi ile dağlanmışır. Mikroyapı incelemeleri Metkon İMM 901 marka optik mikroskopta yapılmıştır.

3.5.3.5 Sertlik Deneyleri

Hazırlanan metalografi numunelerin sertlik ölçümleri Bms Digirock-Rbov sertlik cihazında yapılmıştır. Sertlik ölçümleri, brinell uç ile 187.5 kgf yük uygulanarak, numunelerin üç farklı bölgesinde brinell cinsinden alınmıştır. Elde edilen değerlerin ortalamasından her numune ve işlem koşulu için HB sertlik değerleri belirlenmiştir.

3.5.3.6 Çekme Deneyleri

Metalografik ve sertlik deneyleri yapılan malzemelerin çekme dayanımları Utest marka çekme deneyi cihazında belirlenmiştir. Deneyler ASTM E8 standartlarına göre hazırlanan kalınlığı 8 mm olan deney numuneleri ile yapılmıştır. Çekme deneyi maksimum 600 kN yük kapasiteli çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde lama numuneler için düz çene aparatları kullanılmıştır.

4. BULGULAR

Tez çalışması tasarım, metalografi ve mekanik deneyler, ısı transfer hesaplamaları, otomasyon ve imalat olmak üzere beş ana aşamadan oluşmaktadır. Tasarım aşamasında fırın elektrikli ve birçok ısı işlem uygulamalarının gerçekleştirilebileceği şekilde düşünülmüştür. Bu beş ana başlık detaylandırılarak incelenmiştir.

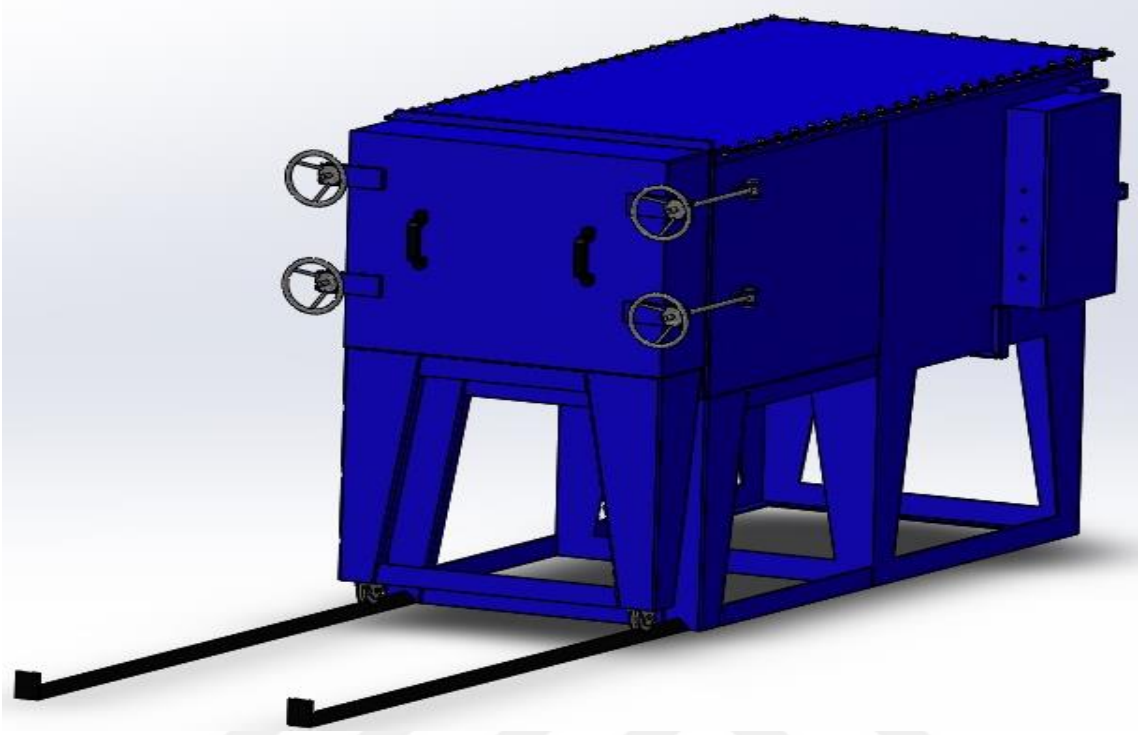
4.1 Nihai Tasarım

Fırın tasarımında gerilim giderme tavlama, normalizasyon, izotermal tavlama, yumuşatma tavlama, rekristalizasyon tavlama, sertleştirme ve temperleme gibi birçok ısı işlem prosesinin gerçekleştirilebileceği şekilde kullanımı dikkate alınmıştır. Tasarımda dikkate alınan kısıtlamalar ve özellikler şunlardır:

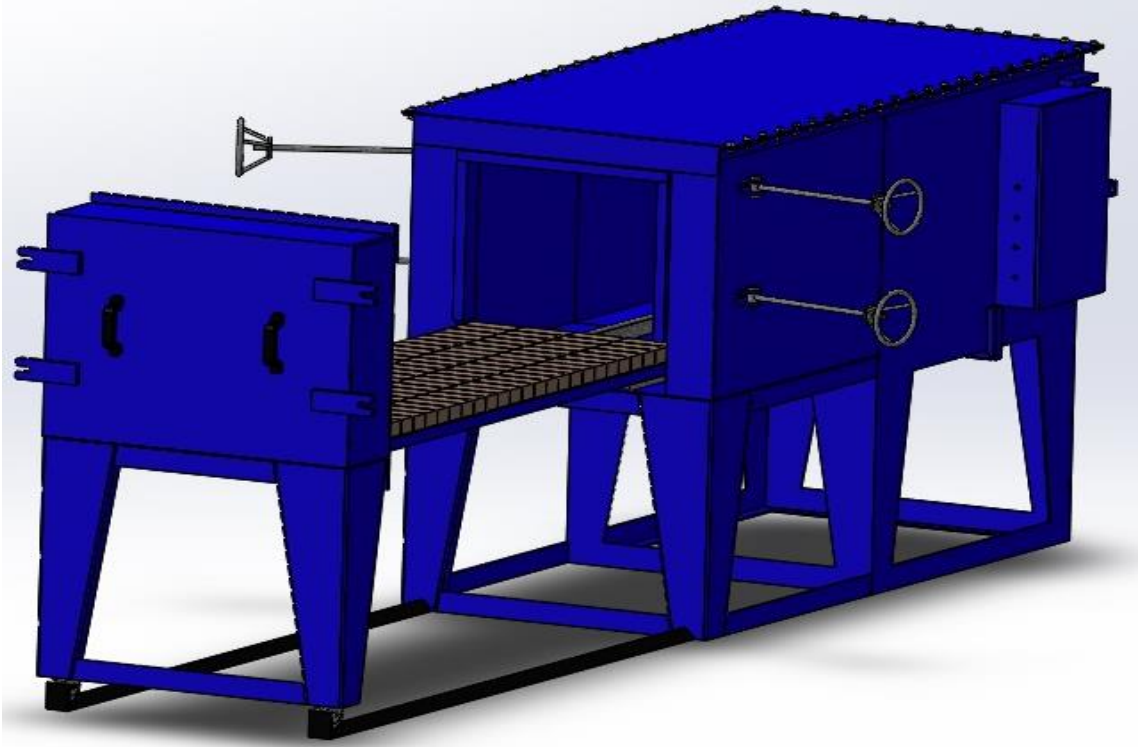
- Birçok ısı işlem prosesinin uygulanabilirliği açısından sıcaklık aralığı geniş tutulmalı.
- Isı işlem prosesinde meydana gelebilecek tüm işlem hataları minimize edilmeli.
- Uygulanan yalıtım ile ısı kaybını minimuma indirerek verimli ve homojen ısı dağılımı sağlanmalı.
- Gerçekleştirilecek prosesler tamamen otomatik ve kullanımı kolay olmalı.
- Yükleme ve boşaltma esnasında yürüyen taban düzgün hareket sağlayabilmeli.
- Montaj, sökülebilir bağlantı ile gerçekleştirilerek gereksiz işçilik ve maliyet kayıpları önlenmeli.
- Refrakter malzemelerin ısınma ısısı fırının çalışma sıcaklığına dayanabilmeli.

Fırın tasarımı tamirata kolay ve kısa sürede olabilecek şekilde projelendirilmiştir. Fazla zorlanan ve kırılma dayanımı düşük olan ateş tuğlaları fırın sökülmeden değiştirilebilecek şekilde planlanmıştır. Fırın içerisinde kullanılan tüm yalıtım malzemeleri uygun görülen destek elemanları ile sabitlenmiştir.

Bu kısıtlamalar ve istekler doğrultusunda Şekil 4.1’de fırın tasarımı gösterilmiştir.



(a)



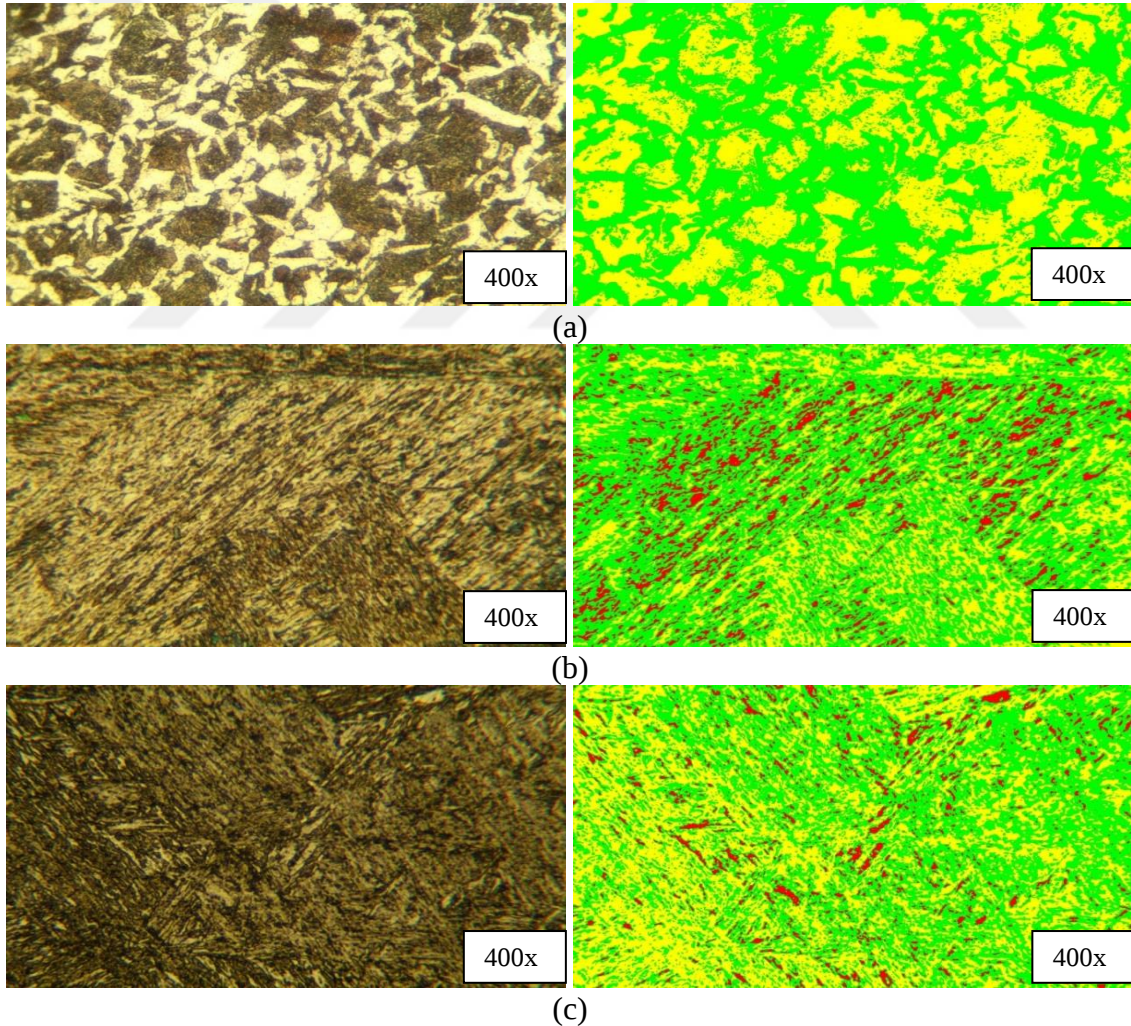
(b)

Şekil 4.1 Isıl işlem fırını render görüntüsü.

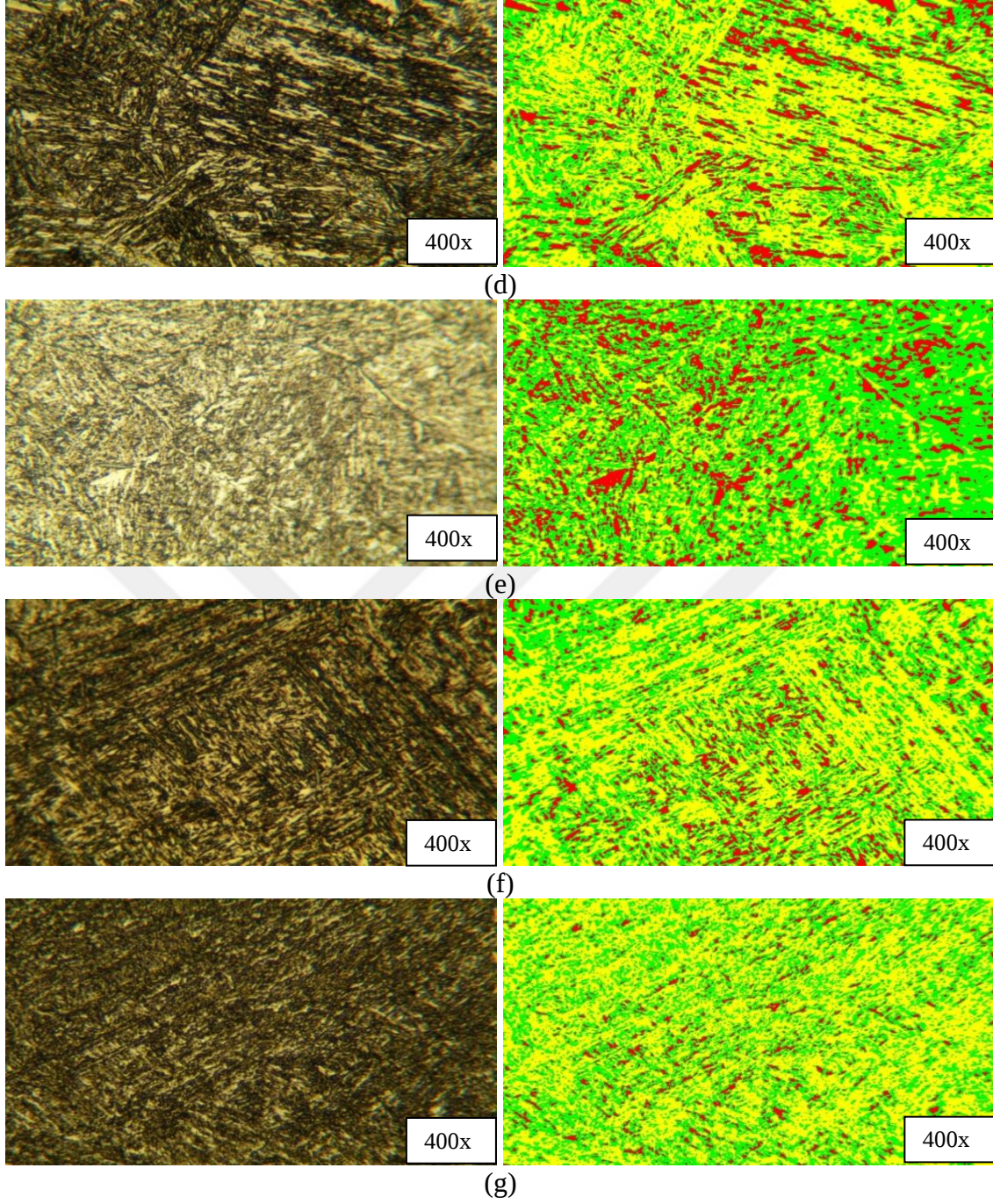
4.2 Deneysel Sonuçlar ve Değerlendirme

4.2.1 Mikroyapı İncelemesi

1040 kalite çelik sacın ham, suda soğutma, tuzlu suda soğutma, yağda soğutma ve temperlenmiş haldeki mikroyapı fotoğrafları ve faz analizi fotoğrafları Resim 4.1’de verilmiştir. Bu işlemler sonucu oluşan mikroyapıdaki faz sayısı ve faz oranları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.2’de 1040 malzeme için ısıtma işlemi prosesi bilgileri kullanılarak matematiksel fonksiyonlar sonucu oluşturulan ZSD diyagramı ve farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri görülmektedir.



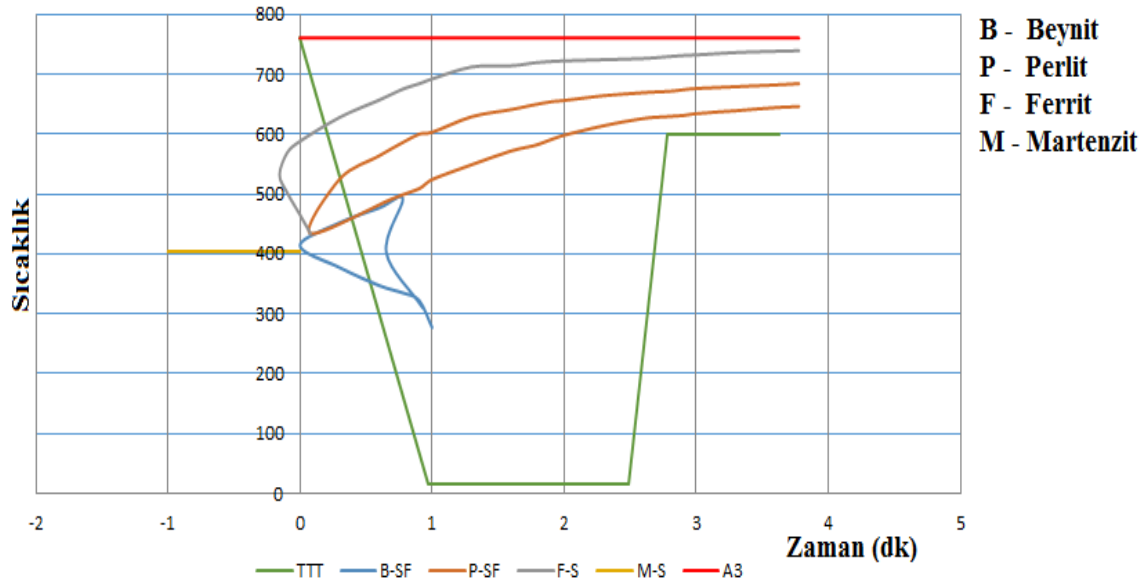
Resim 4.1 1040 çelik mikroyapı ve faz analizi fotoğrafları. (a) Ham hali. (b) Suda soğutma sonrası. (c) Suda soğutma ve temperleme sonrası. (d) Tuzlu suda soğutma sonrası. (e) Tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası. (f) Yağda soğutma sonrası. (g) Yağda soğutma ve temperleme sonrası. Büyütme 400x.



Resim 4.1 (Devam) 1040 çelik mikroyapı ve faz analizi fotoğrafları. (a) Ham hali. (b) Suda soğutma sonrası. (c) Suda soğutma ve temperleme sonrası. (d) Tuzlu suda soğutma sonrası. (e) Tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası. (f) Yağda soğutma sonrası. (g) Yağda soğutma ve temperleme sonrası. Büyütme 400x.

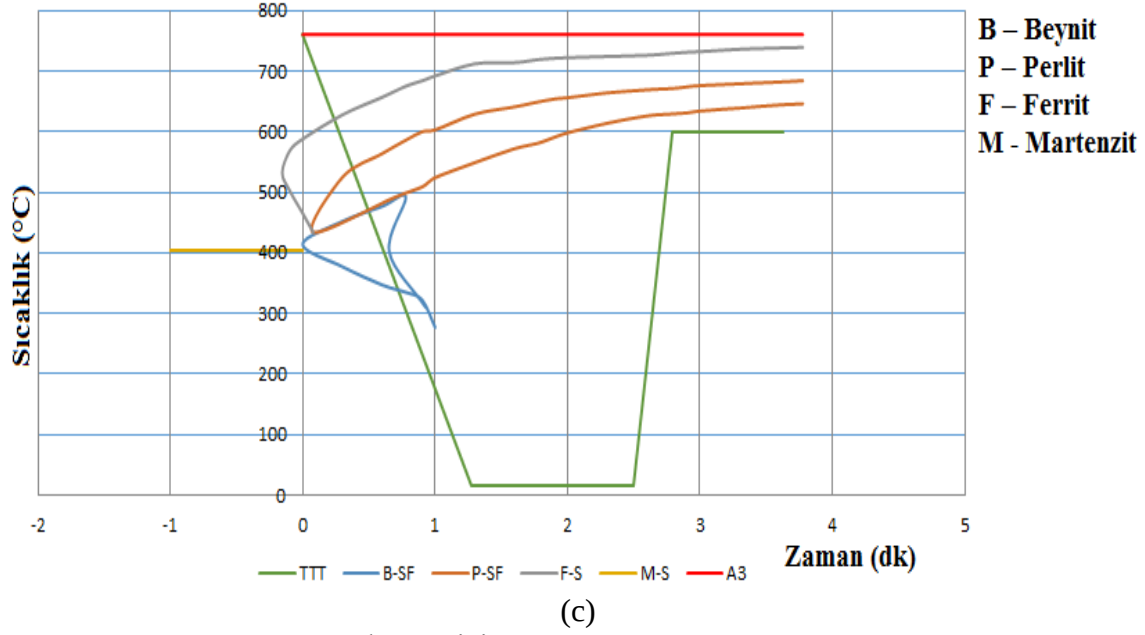
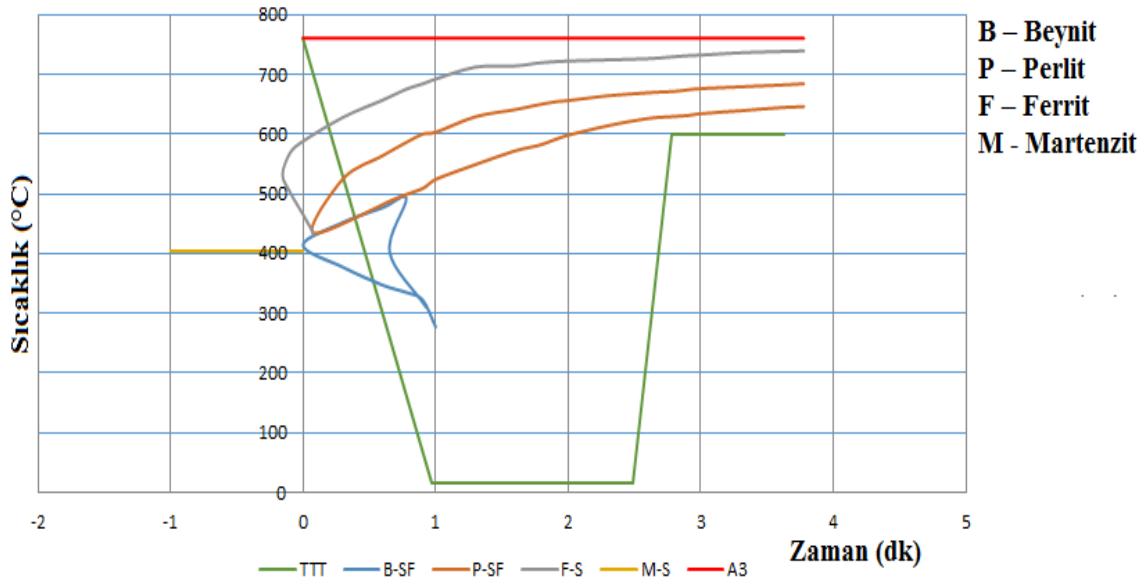
Çizelge 4.1 1040 malzeme ham hali ve uygulanan ısı işlemler sonrası faz sayısı ve faz oranları.

1040 malzeme	Faz Sayısı	Ferrit Oranı (%)	Perlit Oranı (%)	Beynit Oranı (%)	Martenzit Oranı (%)	Sorbit Oranı (%)
Ham	2	55	45	-	-	-
Suda soğutulmuş	3	12	50	-	38	-
Suda soğutulmuş ve temperlenmiş	3	6	52	-	-	42
Tuzlu suda soğutulmuş	3	15	37	-	48	-
Tuzlu suda soğutulmuş ve temperlenmiş	3	18	57	-	-	25
Yağda soğutulmuş	3	25	50	-	25	-
Yağda soğutulmuş ve temperlenmiş	3	18	60	-	-	22



(a)

Şekil 4.2 1040 malzeme için ısı işlemlerini kullanarak matematiksel fonksiyonlar sonucu oluşturulan ZSD diyagramı ve farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri. (a) Suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (b) Tuzlu suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (c) Yağda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri.



Şekil 4.2 (Devam) 1040 malzeme için ısıtma işlemi prosesi kullanılarak matematiksel fonksiyonlar sonucu oluşturulan ZSD diyagramı ve farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri. (a) Suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (b) Tuzlu suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (c) Yağda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri.

1040 malzeme ham hali faz analizi fotoğrafında görülen yeşil renkli taneler ferrit, sarı renkli taneler ise perlitir. Resimde perlitin, ferrit matrisine homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Yapıda %55 ferrit ve %45 perlit fazı bulunmaktadır.

1040 malzeme suda soğutma sonrası oluşan mikroyapı incelendiğinde 1040 çelik ZSD diyagramına göre malzeme soğurken sırasıyla ferrit, perlit ve martenzit bölgesini kesmiştir. Faz analizi resminde görülen sarı renkli taneler martenzit, yeşil renkli taneler perlit, kırmızı renkli taneler ise ferrittir. Oluşan bu yapıda %12 ferrit, %50 perlit ve %38 martenzit fazı bulunmaktadır.

1040 malzeme suda soğutma ve temperleme sonrası oluşan mikroyapı incelendiğinde faz analizi resminde görülen yeşil renkli taneler perlit, sarı renkli taneler martenzit kırmızı renkli taneler ise ferrittir. Oluşan bu yapıda %6 ferrit, %52 perlit ve %42 sorbit fazı bulunmaktadır.

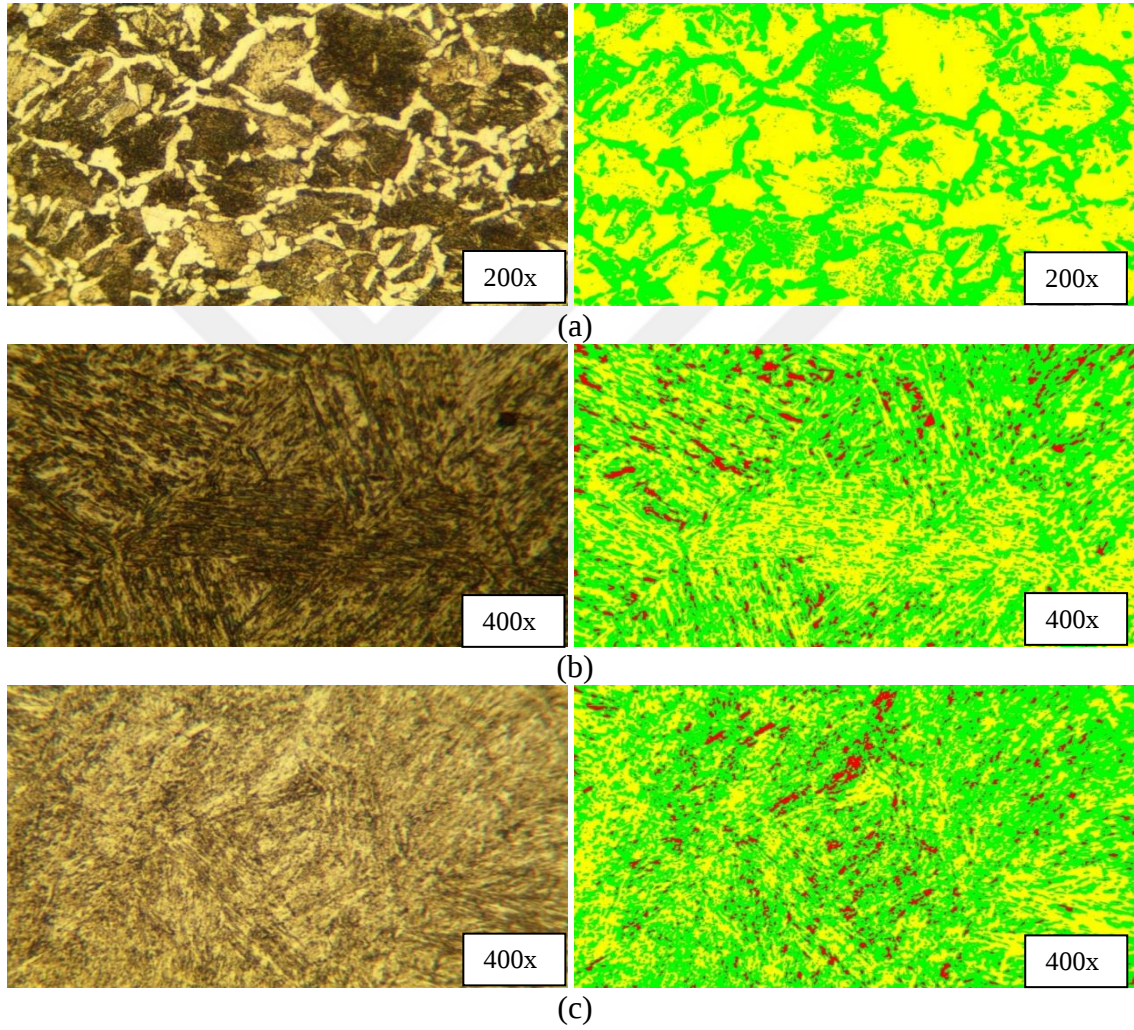
1040 malzeme tuzlu suda soğutma sonrası ZSD diyagramına göre martenzit bölgesi kesilmiştir. Mikroyapı incelendiğinde faz analizi resminde görülen sarı renkli taneler martenzit, yeşil renkli taneler perlit, kırmızı renkli taneler ise ferrittir. Yapıda %15 ferrit, %37 perlit ve %48 martenzit fazı bulunmaktadır.

1040 malzeme tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası oluşan mikroyapıda faz analizi resminde görülen yeşil renkli taneler perlit, sarı renkli taneler martenzit ve kırmızı renkli taneler ferrittir. Beynitik tanelerin bir kısmının temperleme sonrası perlitte dönüştüğü görülmektedir. Yapıda %18 ferrit, %57 perlit ve %25 martenzit fazı bulunmaktadır.

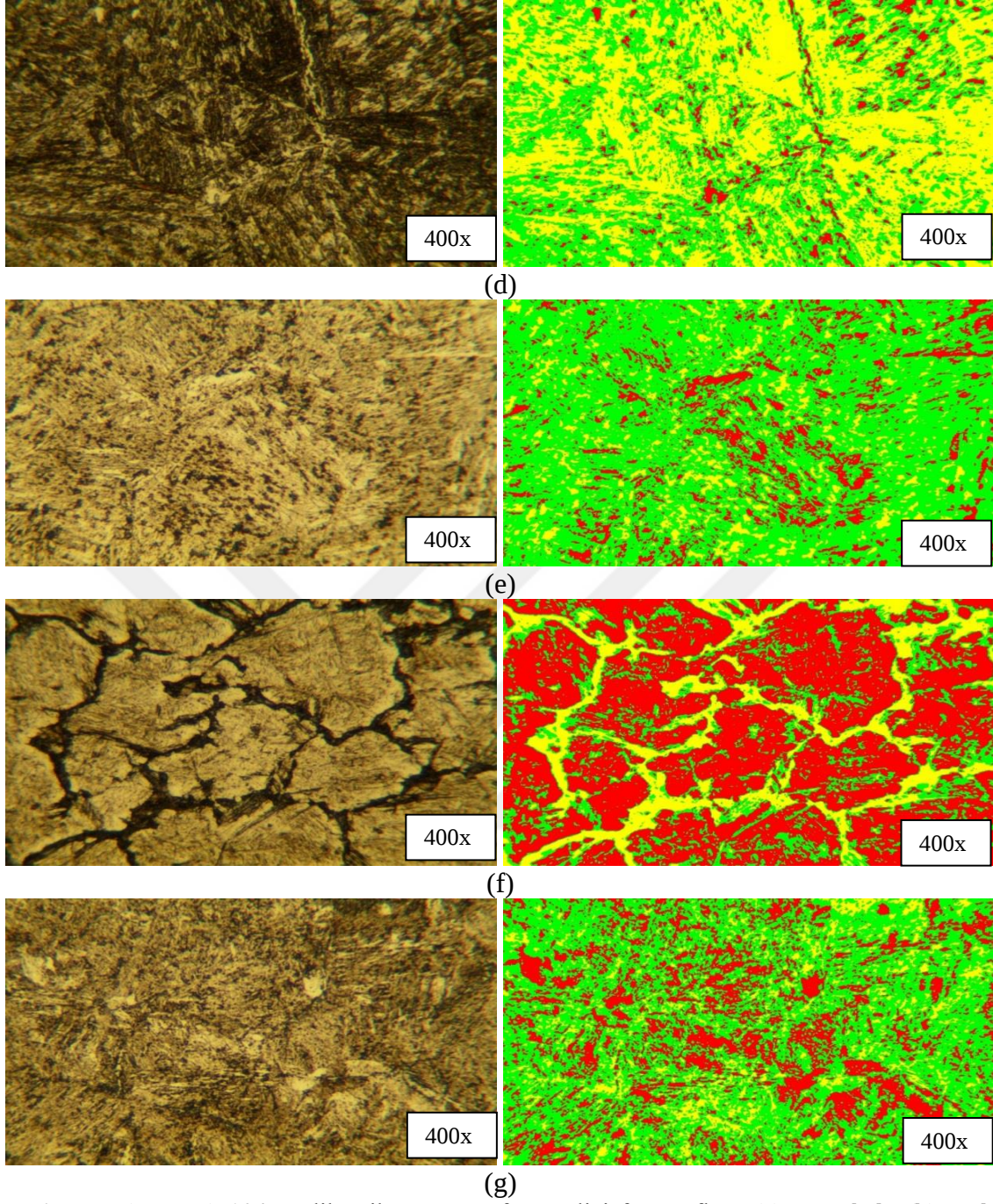
1040 malzeme yağda soğutma işleminden sonra oluşan mikroyapıda ZSD diyagramına göre malzeme soğurken ferrit, perlit ve martenzit bölgelerini kesmiştir. Faz analizi resminde görülen sarı renkli taneler beynit, yeşil renkli taneler perlit, kırmızı renkli taneler ise ferrittir. Yapıda %25 ferrit, %50 perlit ve %25 martenzit fazı bulunmaktadır.

1040 malzeme yağda soğutma ve temperleme sonrası oluşan mikroyapıda faz analizi resminde görülen sarı renkli taneler martenzit, kırmızı renkli taneler ise ferrittir. Temperleme ile daha homojen bir mikroyapı elde edilmiştir. Yapıda %18 ferrit, %60 perlit ve %22 sorbit fazı bulunmaktadır.

1045 kalite çelik sacın ham, suda soğutma, tuzlu suda soğutma, yağda soğutma ve temperlenmiş haldeki mikroyapı fotoğrafları ve faz analizi fotoğrafları Resim 4.2’de verilmiştir. Bu işlemler sonucu oluşan mikroyapıdaki faz sayısı ve faz oranları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.3’de 1045 malzeme için ısıtma işlem prosesi bilgileri kullanılarak matematiksel fonksiyonlar sonucu oluşturulan ZSD diyagramı ve farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri görülmektedir.



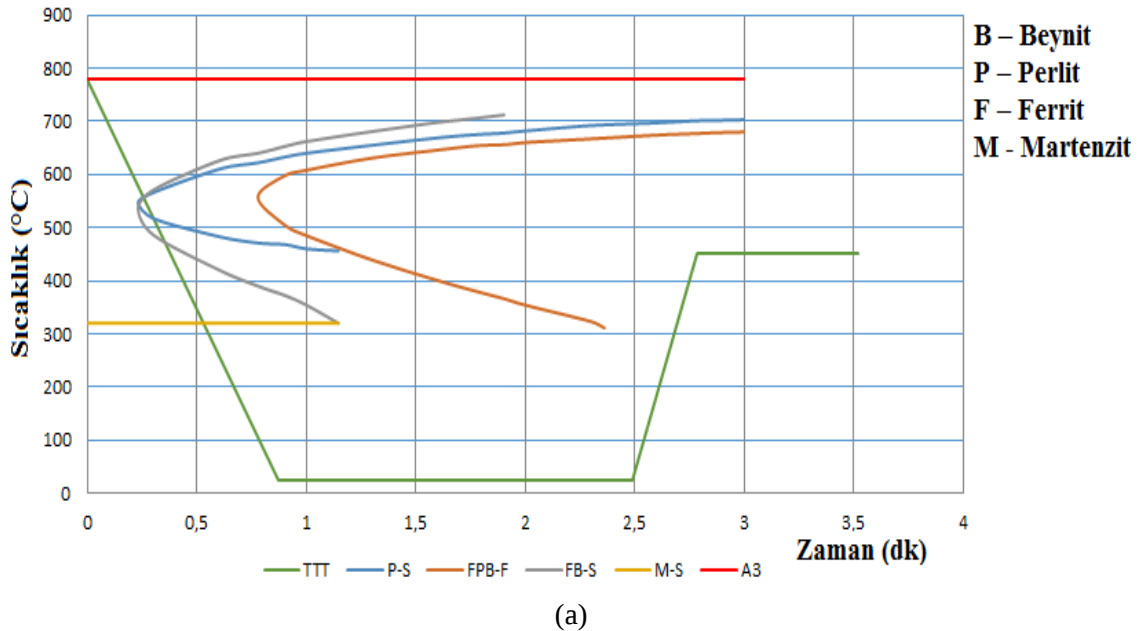
Resim 4.2 1045 çelik mikroyapı ve faz analizi fotoğrafları. (a) Ham hali. (b) Suda soğutma sonrası. (c) Suda soğutma ve temperleme sonrası. (d) Tuzlu suda soğutma sonrası. (e) Tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası. (f) Yağda soğutma sonrası. (g) Yağda soğutma ve temperleme sonrası. Büyütme 200x ve 400x.



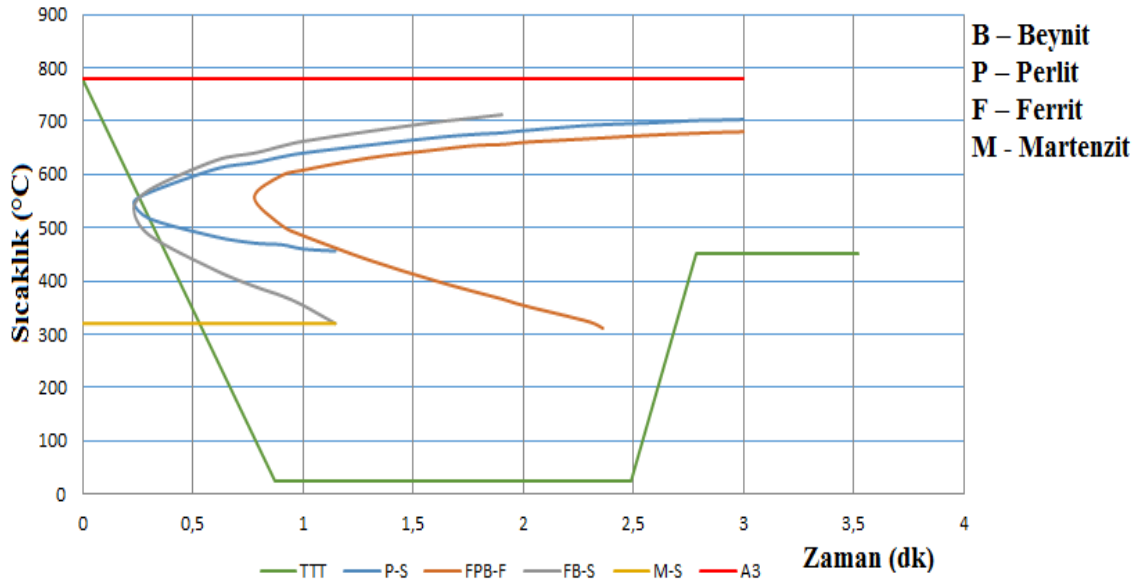
Resim 4.2 (Devam) 1045 çelik mikroyapı ve faz analizi fotoğrafları. (a) Ham hali. (b) Suda soğutma sonrası. (c) Suda soğutma ve temperleme sonrası. (d) Tuzlu suda soğutma sonrası. (e) Tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası. (f) Yağda soğutma sonrası. (g) Yağda soğutma ve temperleme sonrası. Büyütme 200x ve 400x.

Çizelge 4.2 1045 malzeme ham hali ve uygulanan ısı işlemler sonrası faz sayısı ve faz oranları.

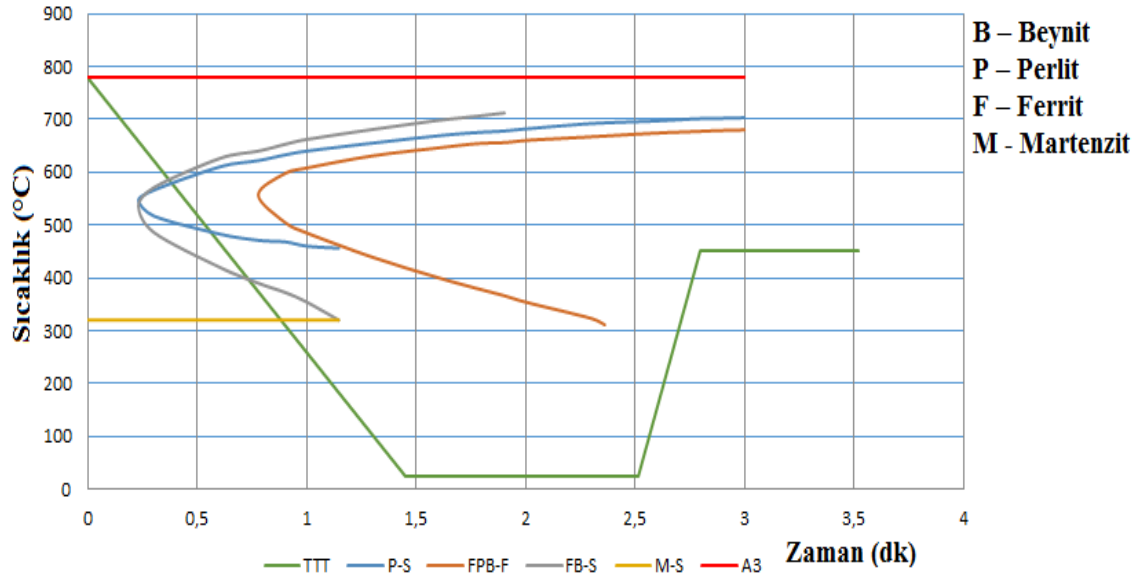
1045 malzeme	Faz Sayısı	Ferrit Oranı (%)	Perlit Oranı (%)	Beynit Oranı (%)	Martenzit Oranı (%)	Sorbit Oranı (%)
Ham	2	57	43	-	-	-
Suda soğutulmuş	3	6	54	-	40	-
Suda soğutulmuş ve temperlenmiş	3	7	58	-	-	35
Tuzlu suda soğutulmuş	3	6	51	-	53	-
Tuzlu suda soğutulmuş ve temperlenmiş	3	15	74	-	-	11
Yağda soğutulmuş	3	64	22	-	14	-
Yağda soğutulmuş ve temperlenmiş	3	29	60	-	-	11



Şekil 4.3 1045 malzeme için ısı işlemleri bilgileri kullanılarak matematiksel fonksiyonlar sonucu oluşturulan ZSD diyagramı ve farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri. (a) Suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (b) Tuzlu suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (c) Yağda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri.



(b)



(c)

Şekil 4.3 (Devam) 1045 malzeme için ısıtma işlemi bilgileri kullanılarak matematiksel fonksiyonlar sonucu oluşturulan ZSD diyagramı ve farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri. (a) Suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (b) Tuzlu suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (c) Yağda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri.

1045 malzeme ham hali faz analizi fotoğrafında görülen yeşil renkli taneler ferrit, sarı renkli taneler ise perlitir. Resimde perlitin, ferrit matrisine homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Yapıda %57 ferrit ve %43 perlit fazı bulunmaktadır.

1045 çelik ZSD diyagramına göre malzeme soğurken ferrit, perlit ve martenzit bölgelerini kesmiştir. Bu yüzden faz analizi resminde görülen sarı renkli taneler martenzit, yeşil renkli taneler perlit, kırmızı renkli taneler ise ferrittir. Ferrit oranının az martenzit oranının fazla olması sertliğin yükselmesine neden olan etmenlerden birisidir. Yapıda %6 ferrit, %54 perlit ve %40 martenzit fazı bulunmaktadır.

1045 malzeme suda soğutma ve temperleme sonrası oluşan mikroyapıda faz analizi resminde görülen yeşil renkli taneler perlit, sarı renkli taneler sorbit(temperlenmiş martenzit), kırmızı renkli taneler ise ferrittir. Temperleme sonrası daha homojen bir yapı elde edilmiştir. Yapıda %7 ferrit, %58 perlit ve %35 sorbit fazı bulunmaktadır.

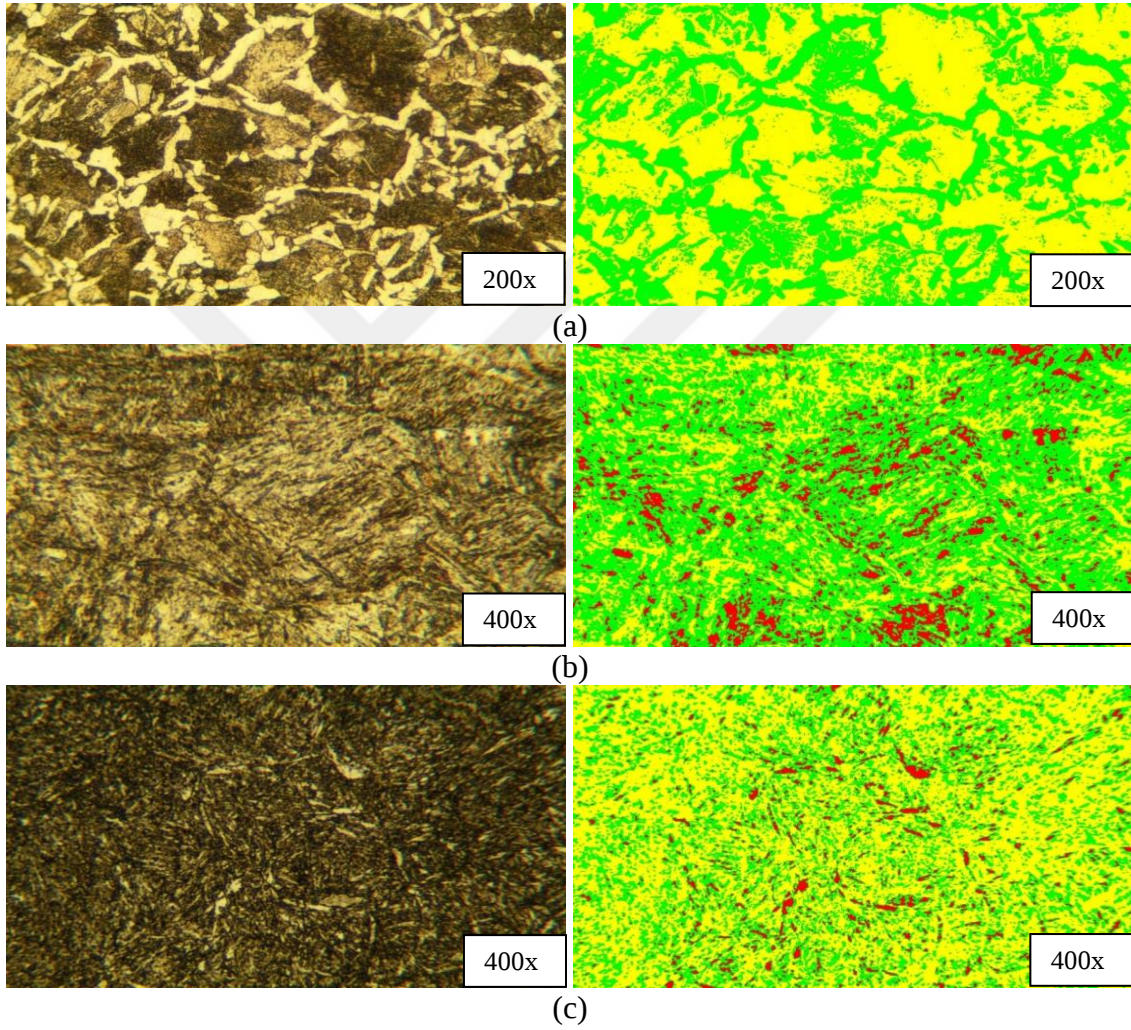
1045 malzeme tuzlu suda soğutma esnasında ZSD diyagramına göre malzeme soğurken sırasıyla ferrit, perlit ve martenzit bölgelerini kesmiştir. Bu yüzden faz analizi resminde görülen sarı renkli taneler martenzit, yeşil renkli taneler perlit ve kırmızı renkli taneler ferrittir. Yapıda %6 ferrit, %41 perlit ve %53 martenzit fazı bulunmaktadır.

1045 malzeme tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası oluşan mikroyapıda faz analizi resminde görülen yeşil renkli taneler perlit, sarı renkli taneler sorbit, kırmızı renkli taneler ise ferrittir. Temperleme sonrası martenzit fazı sorbit fazına dönüşmüştür. Yapıda %15 ferrit, %74 perlit ve %11 sorbit fazı bulunmaktadır.

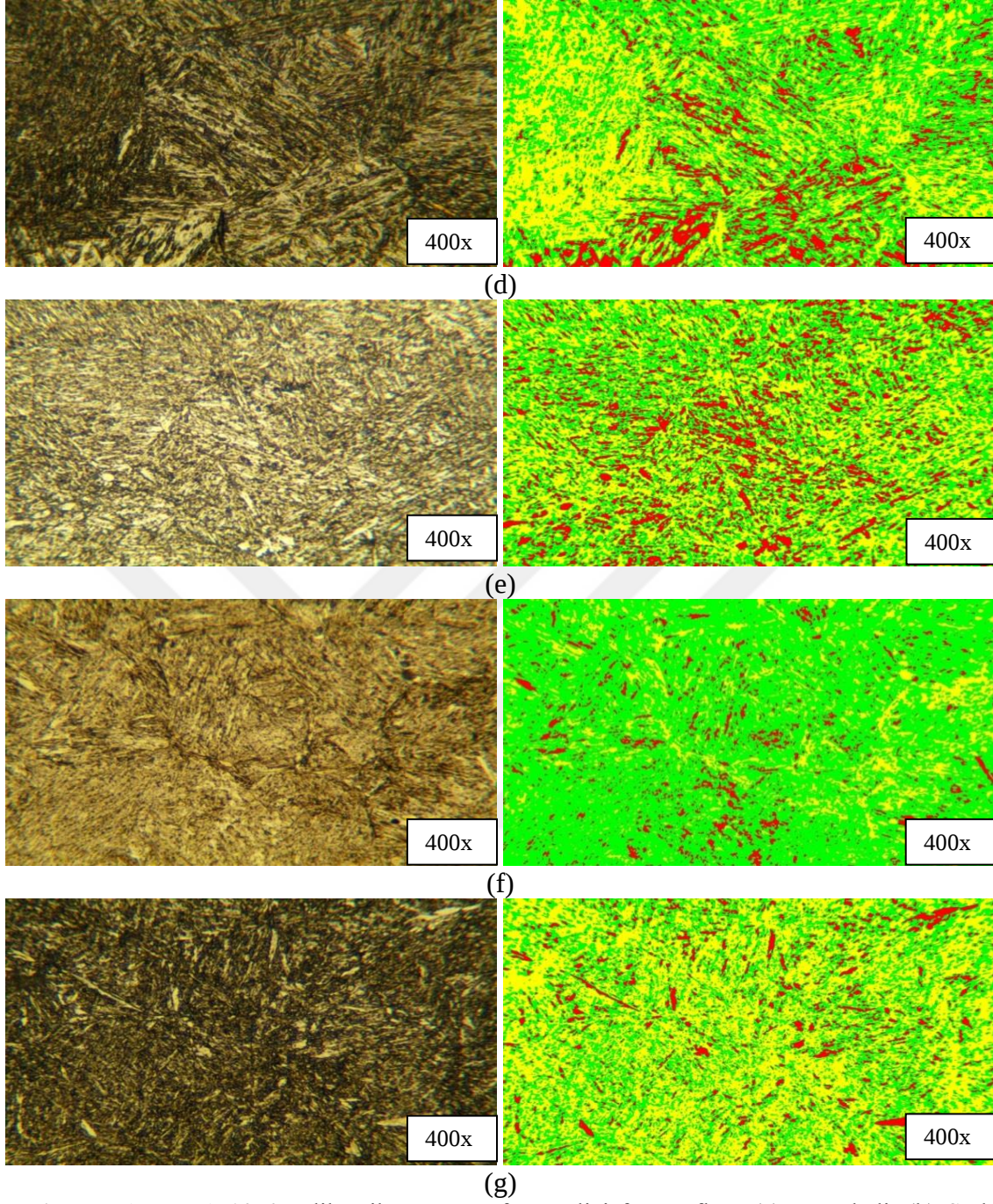
1045 malzeme yağda soğutma esnasında ZSD diyagramına göre malzeme soğurken ferrit, perlit ve martenzit bölgelerini kesmiştir. Bu yüzden faz analizi resminde görülen sarı renkli taneler martenzit, yeşil renkli taneler perlit ve kırmızı renkli taneler ferrittir. Yağda soğuma diğer ortamlara göre daha yavaş gerçekleştiği için oluşan martenzit oranı daha azdır. Yapıda %64 ferrit, %22 perlit ve %14 martenzit fazı bulunmaktadır.

1045 malzeme yağda soğutma ve temperleme sonrası oluşan mikroyapıda faz analizi resminde görülen yeşil renkli taneler perlit, sarı renkli taneler sorbit, kırmızı renkli taneler ise ferrittir. Temperleme sonrası martenzit fazı sorbit fazına dönüşmüştür. Ayrıca temperleme ile büyük ferritik taneler ile tane sınırlarında ki sementit fazları parçalanarak perlitik dönüşümünü tamamlamıştır. Yapıda %29 ferrit, %60 perlit ve %11 sorbit fazı bulunmaktadır.

1050 kalite elik sacın ham, suda soğutma, tuzlu suda soğutma, yağda soğutma ve temperlenmiş haldeki mikroyapı fotoğrafları ve faz analizi fotoğrafları Resim 4.3’de verilmiştir. Bu işlemler sonucu oluşan mikroyapıdaki faz sayısı ve faz oranları Tablo 4.3’de verilmiştir. Şekil 4.4’de 1050 malzeme için ısıt işlemler prosesi bilgileri kullanılarak matematiksel fonksiyonlar sonucu oluşturulan ZSD diyagramı ve farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri görülmektedir.



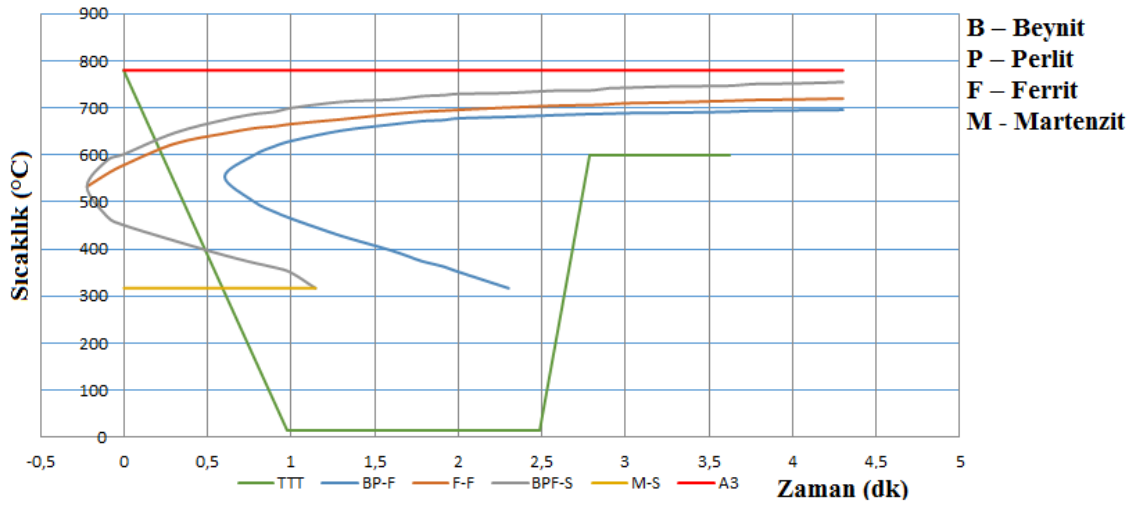
Resim 4.3 1050 elik mikroyapı ve faz analizi fotoğrafları. (a) Ham hali. (b) Suda soğutma sonrası. (c) Suda soğutma ve temperleme sonrası. (d) Tuzlu suda soğutma sonrası. (e) Tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası. (f) Yağda soğutma sonrası. (g) Yağda soğutma ve temperleme sonrası. Büyütme 200x ve 400x.



Resim 4.3 (Devam) 1050 çelik mikroyapı ve faz analizi fotoğrafları. (a) Ham hali. (b) Suda soğutma sonrası. (c) Suda soğutma ve temperleme sonrası. (d) Tuzlu suda soğutma sonrası. (e) Tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası. (f) Yağda soğutma sonrası. (g) Yağda soğutma ve temperleme sonrası. Büyütme 200x ve 400x.

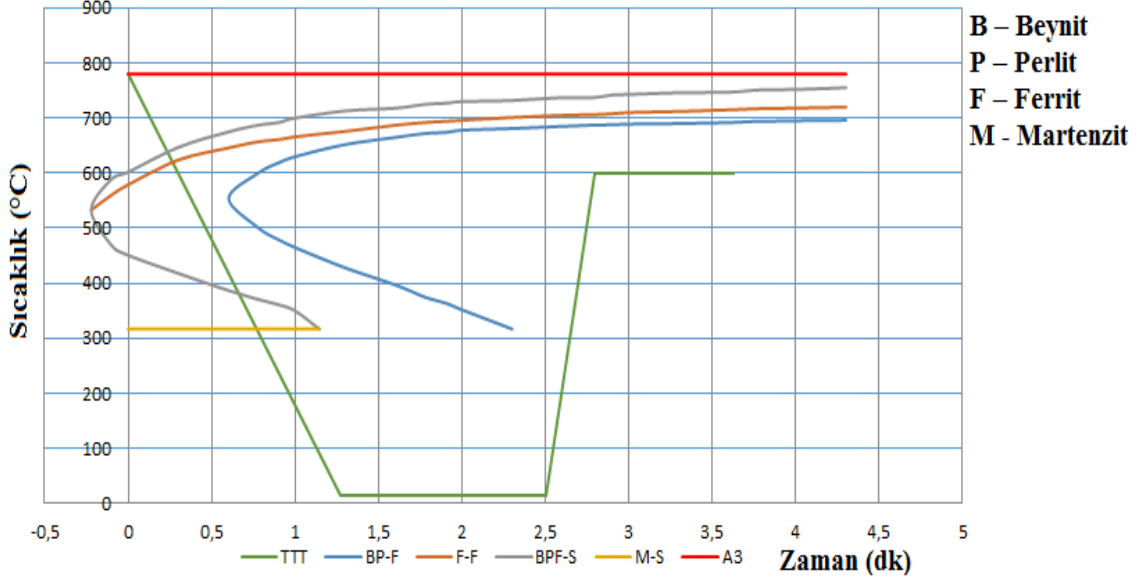
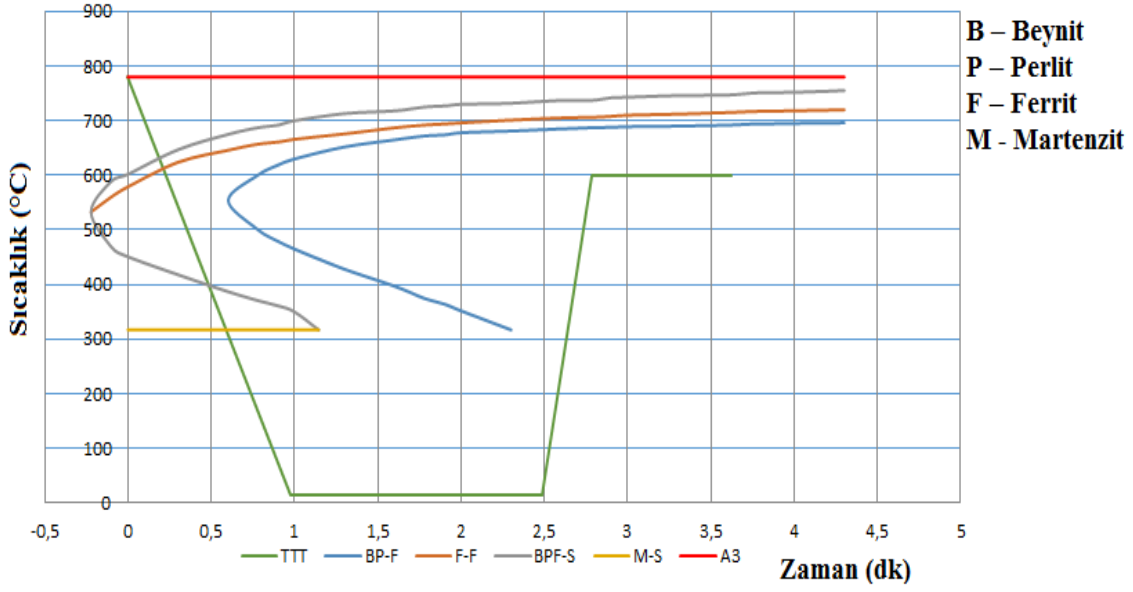
Çizelge 4.3 1050 malzeme ham hali ve uygulanan ısı işlemleri sonrası faz sayısı ve faz oranları.

1050 malzeme	Faz Sayısı	Ferrit Oranı (%)	Perlit Oranı (%)	Beynit Oranı (%)	Martenzit Oranı (%)	Sorbit Oranı (%)
Ham	2	42	58	-	-	-
Suda soğutulmuş	3	12	60	-	28	-
Suda soğutulmuş ve temperlenmiş	3	5	35	-	-	60
Tuzlu suda soğutulmuş	3	18	47	-	35	-
Tuzlu suda soğutulmuş ve temperlenmiş	3	5	35	-	-	60
Yağda soğutulmuş	3	7	78	-	15	-
Yağda soğutulmuş ve temperlenmiş	3	8	44	-	-	48



(a)

Şekil 4.4 1050 malzeme için ısı işlem prosesi bilgileri kullanılarak matematiksel fonksiyonlar sonucu oluşturulan ZSD diyagramı ve farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri. (a) Suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (b) Tuzlu suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (c) Yağda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri.



Şekil 4.4 (Devam) 1050 malzeme için ısıtma işlemi bilgileri kullanılarak matematiksel fonksiyonlar sonucu oluşturulan ZSD diyagramı ve farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri. (a) Suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (b) Tuzlu suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (c) Yağda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri.

1050 malzeme ham hali faz analizi fotoğrafında görülen yeşil renkli taneler ferrit, sarı renkli taneler ise perlitir. Resimde perlitin, ferrit matrisine homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Yapıda %42 ferrit ve %58 perlit fazı bulunmaktadır.

1050 elik ZSD diyagramına göre malzeme soğurken ferrit, perlit ve martenzit bölgelerini kesmiştir. Bu yüzden faz analizi resminde görülen sarı renkli taneler martenzit, yeşil renkli taneler perlit, kırmızı renkli taneler ise ferrittir. Yapıda %12 ferrit, %60 perlit ve %28 martenzit fazı bulunmaktadır.

1050 malzeme suda soğutma ve temperleme sonrası oluşan mikroyapıda faz analizi resminde kırmızı renkli taneler ferrit, sarı renkli taneler sorbit, yeşil renkli taneler ise perlittir. Temperleme sonrası martenzit fazı sorbit fazına dönüşmüştür. Yapıda %5 ferrit, %35 perlit ve %60 sorbit fazı bulunmaktadır.

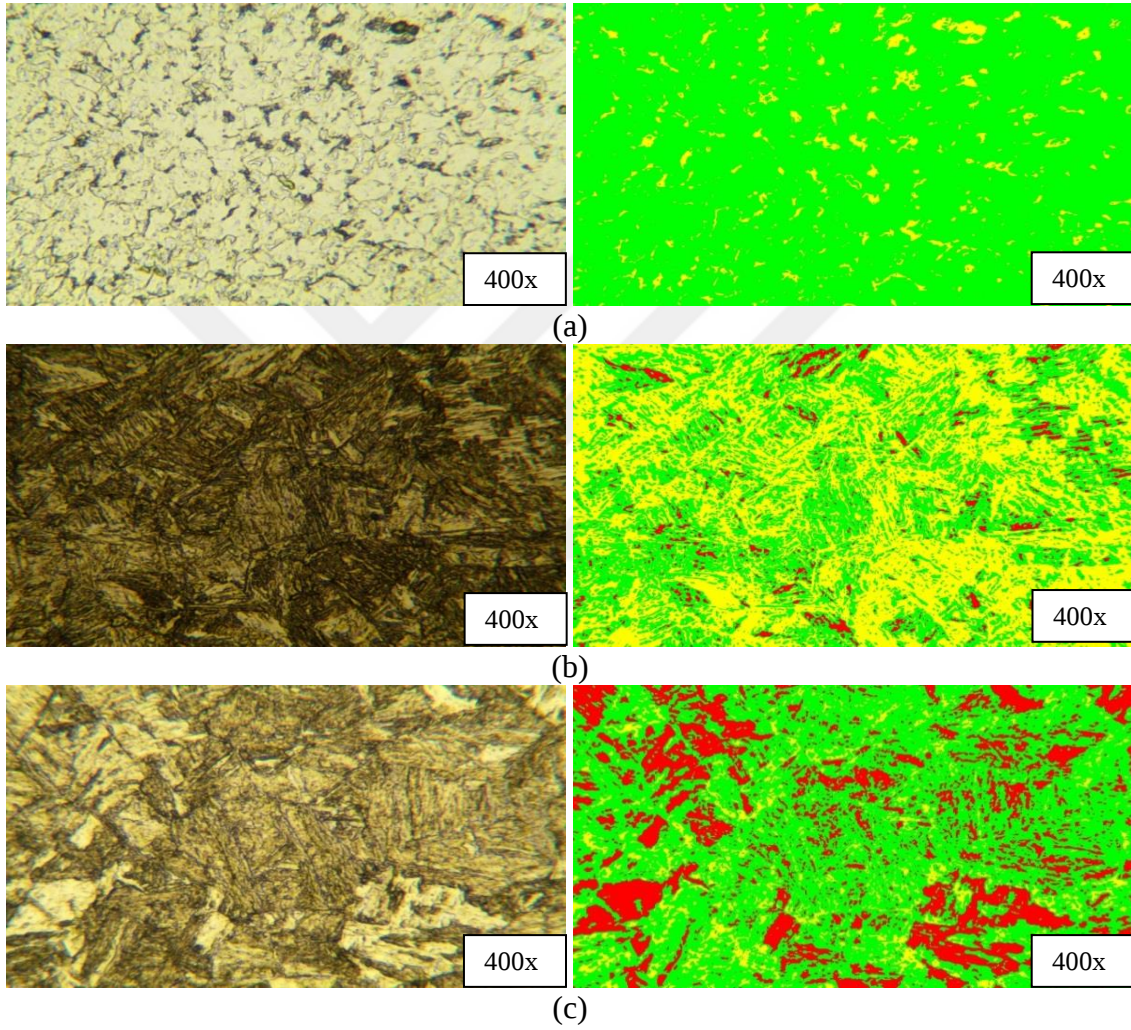
1050 malzeme tuzlu suda soğutma sonrası oluşan mikroyapı incelendiğinde 1050 elik ZSD diyagramına göre malzeme soğurken ferrit, perlit ve martenzit bölgelerini kesmiştir. Faz analizi resminde görülen sarı renkli taneler martenzit, kırmızı renkli taneler ferrit, yeşil renkli taneler ise perlittir. Yapıda %18 ferrit, %47 perlit ve %35 martenzit fazı bulunmaktadır.

1050 malzeme tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası mikroyapı incelendiğinde faz analizi resminde görülen kırmızı renkli taneler ferrit, sarı renkli taneler sorbit ve yeşil renkli taneler perlittir. Temperleme sonrası martenzit fazı sorbit fazına dönüşmüştür. Ayrıca yapının daha homojen olduğu görülmektedir. Yapıda %5 ferrit, %35 perlit ve %60 sorbit fazı bulunmaktadır.

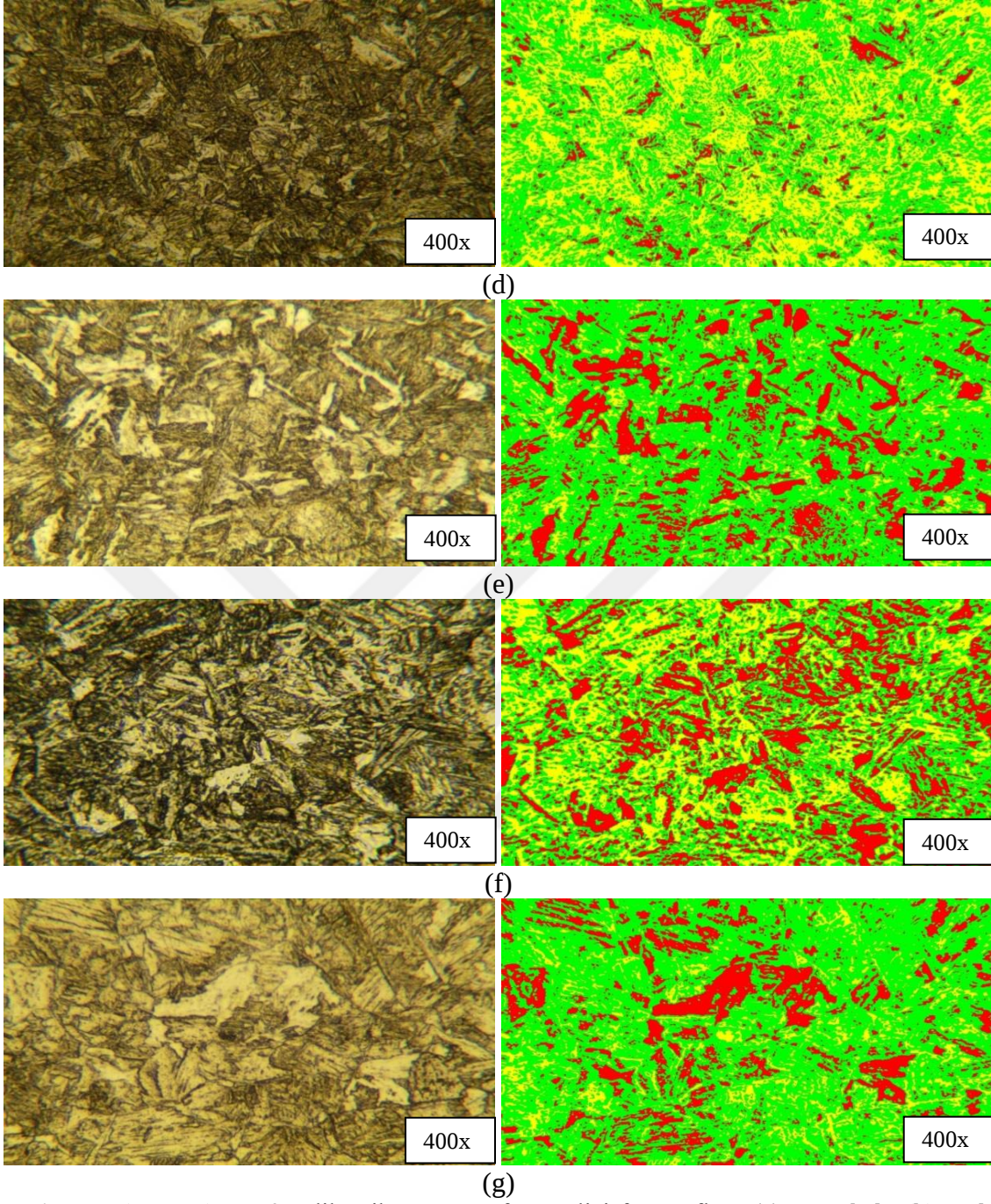
1050 malzeme yağda soğutma sonrası oluşan mikroyapı incelendiğinde 1050 elik ZSD diyagramına göre malzeme soğurken ferrit, perlit ve martenzit bölgelerini kesmiştir. Faz analizi resminde görülen sarı renkli taneler martenzit, yeşil renkli taneler perlit, kırmızı renkli taneler ise ferrittir. Yapıda %7 ferrit, %78 perlit ve %15 martenzit fazı bulunmaktadır.

1050 malzeme yağda soğutma ve temperleme sonrası faz analizi resminde görülen kırmızı renkli taneler ferrit, sarı renkli taneler sorbit ve yeşil renkli taneler perlittir. Temperleme sonrası martenzit fazı sorbit fazına dönüşmüştür. Yapıda %8 ferrit, %44 perlit ve %48 sorbit fazı bulunmaktadır.

St 52 kalite çelik sacın ham, suda soğutma, tuzlu suda soğutma, yağda soğutma ve temperlenmiş haldeki mikroyapı fotoğrafları ve faz analizi fotoğrafları Resim 4.4’de verilmiştir. Bu işlemler sonucu oluşan mikroyapıdaki faz sayısı ve faz oranları Çizelge 4.4’de verilmiştir. Şekil 4.5’de St 52 malzeme için ısıtma işlemi prosesi bilgileri kullanılarak matematiksel fonksiyonlar sonucu oluşturulan ZSD diyagramı ve farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri görülmektedir.



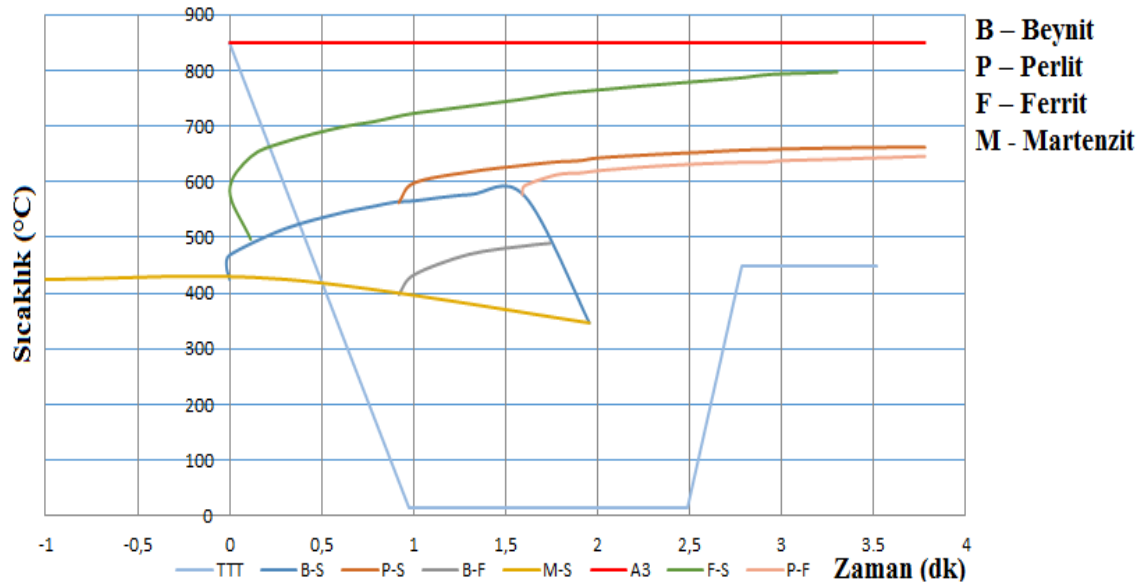
Resim 4.4 St 52 çelik mikroyapı ve faz analizi fotoğrafları. (a) Ham hali. (b) Suda soğutma sonrası. (c) Suda soğutma ve temperleme sonrası. (d) Tuzlu suda soğutma sonrası. (e) Tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası. (f) Yağda soğutma sonrası. (g) Yağda soğutma ve temperleme sonrası. Büyütme 400x.



Resim 4.4 (Devam) St 52 çelik mikroyapı ve faz analizi fotoğrafları. (a) Ham hali. (b) Suda soğutma sonrası. (c) Suda soğutma ve temperleme sonrası. (d) Tuzlu suda soğutma sonrası. (e) Tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası. (f) Yağda soğutma sonrası. (g) Yağda soğutma ve temperleme sonrası. Büyütme 400x.

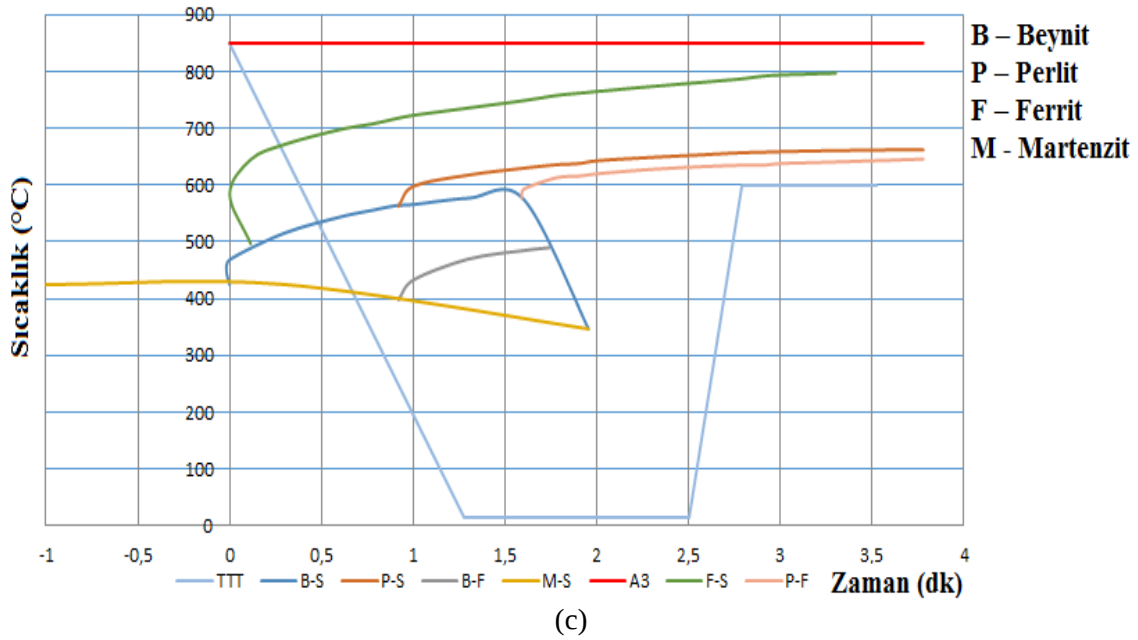
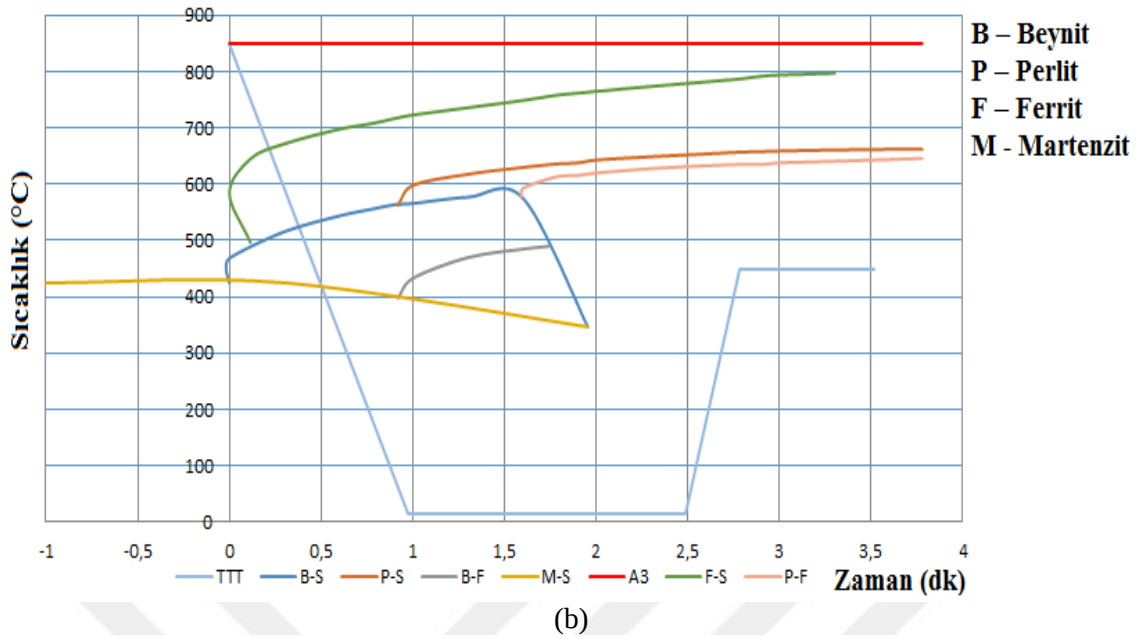
Çizelge 4.4 St 52 malzeme ham hali ve uygulanan ısı işlemler sonrası faz sayısı ve faz oranları.

St 52 malzeme	Faz Sayısı	Ferrit Oranı (%)	Perlit Oranı (%)	Beynit Oranı (%)	Martenzit Oranı (%)	Sorbit Oranı (%)
Ham	2	73	27	-	-	-
Suda soğutulmuş	3	4	-	43	53	-
Suda soğutulmuş ve temperlenmiş	3	27	-	64	-	9
Tuzlu suda soğutulmuş	3	7	-	51	42	-
Tuzlu suda soğutulmuş ve temperlenmiş	3	25	-	66	-	9
Yağda soğutulmuş	3	30	-	45	25	-
Yağda soğutulmuş ve temperlenmiş	3	21	-	68	-	11



(a)

Şekil 4.5 St 52 malzeme için ısı işlemlerinin ZSD diyagramı ve farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri. (a) Suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (b) Tuzlu suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (c) Yağda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri.



Şekil 4.5 (Devam) St 52 malzeme için ısııl işlem proses bilgileri kullanılarak matematiksel fonksiyonlar sonucu oluşturulan ZSD diyagramı ve farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri. (a) Suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (b) Tuzlu suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (c) Yağda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri.

St 52 malzeme ham hali mikroyapısı incelendiğinde karbon oranının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Faz analizi fotoğrafında sarı renkli taneler perlit, yeşil renkli taneler ise ferrittir. Ayrıca ferrit tanelerinin oldukça ince ve homojen boyutlu olduğu görülmektedir. Yapıda %73 ferrit ve %27 perlit fazı bulunmaktadır.

St 52 malzeme suda soğutma sonrası oluşan mikroyapı incelendiğinde St 52 çelik ZSD diyagramına göre malzeme soğurken ferrit, beynit ve martenzit bölgelerini kesmiştir. Bu yüzden faz analizi resminde görülen sarı renkli taneler martenzit, yeşil renkli taneler beynit, kırmızı renkli taneler ise ferrittir. Yapıda %4 ferrit, %43 beynit ve %53 martenzit fazı bulunmaktadır.

St 52 malzeme suda soğutma ve temperleme sonrası oluşan mikroyapıda faz analizi resminde görülen yeşil renkli taneler beynit, sarı renkli taneler sorbit, kırmızı renkli taneler ise ferrittir. Temperleme sonrası martenzit fazı sorbit fazına dönüşmüştür. Ayrıca ferritin faz oranının ve tane boyutunun arttığı görülmektedir. Bu durum sertliğin düşmesine sebep olacaktır. Yapıda %27 ferrit, %64 beynit ve %9 martenzit fazı bulunmaktadır.

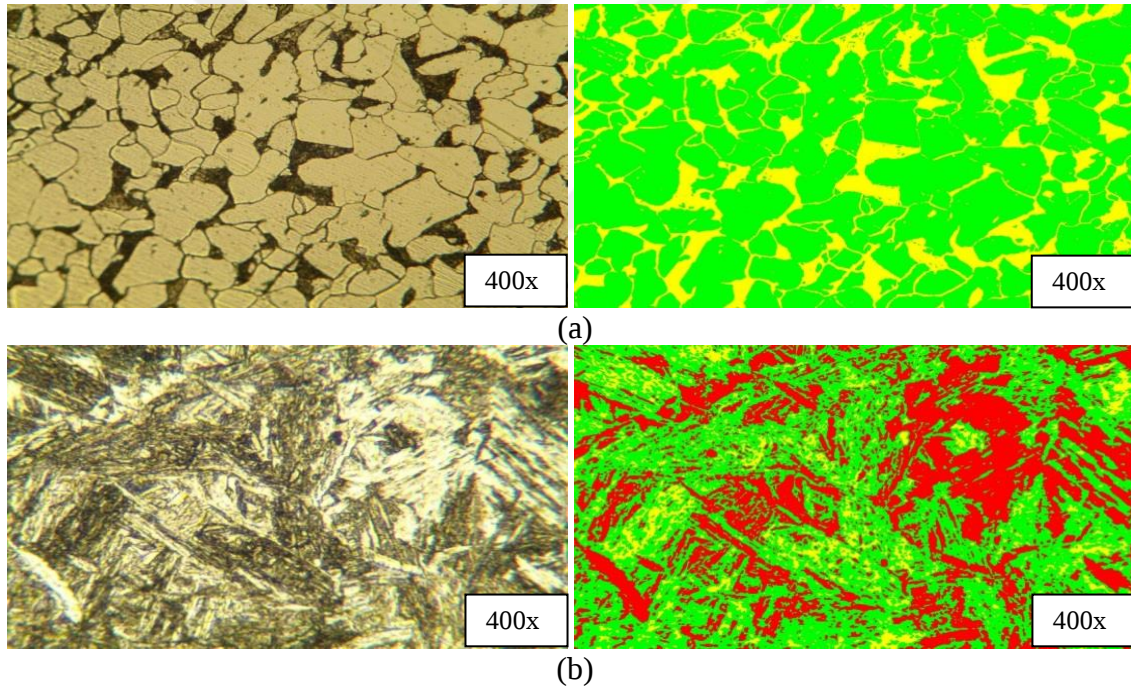
St 52 malzeme tuzlu suda soğutma sonrası oluşan mikroyapı incelendiğinde St 52 çelik ZSD diyagramına göre malzeme soğurken sırasıyla ferrit, beynit ve martenzit bölgelerini kesmiştir. Bu yüzden faz analizi resminde görülen sarı renkli taneler martenzit, yeşil renkli taneler beynit ve kırmızı renkli taneler ferrittir. Yapıda %7 ferrit, %51 beynit ve %42 martenzit fazı bulunmaktadır.

St 52 malzeme tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası faz analizi resminde görülen yeşil renkli taneler beynit, sarı renkli taneler sorbit, kırmızı renkli taneler ise ferrittir. Temperleme sonrası martenzit fazı sorbit fazına dönüşmüştür. Ferrit oranının artışı serlikte düşüşe sebep olacaktır. Yapıda %25 ferrit, %66 beynit ve %9 martenzit fazı bulunmaktadır.

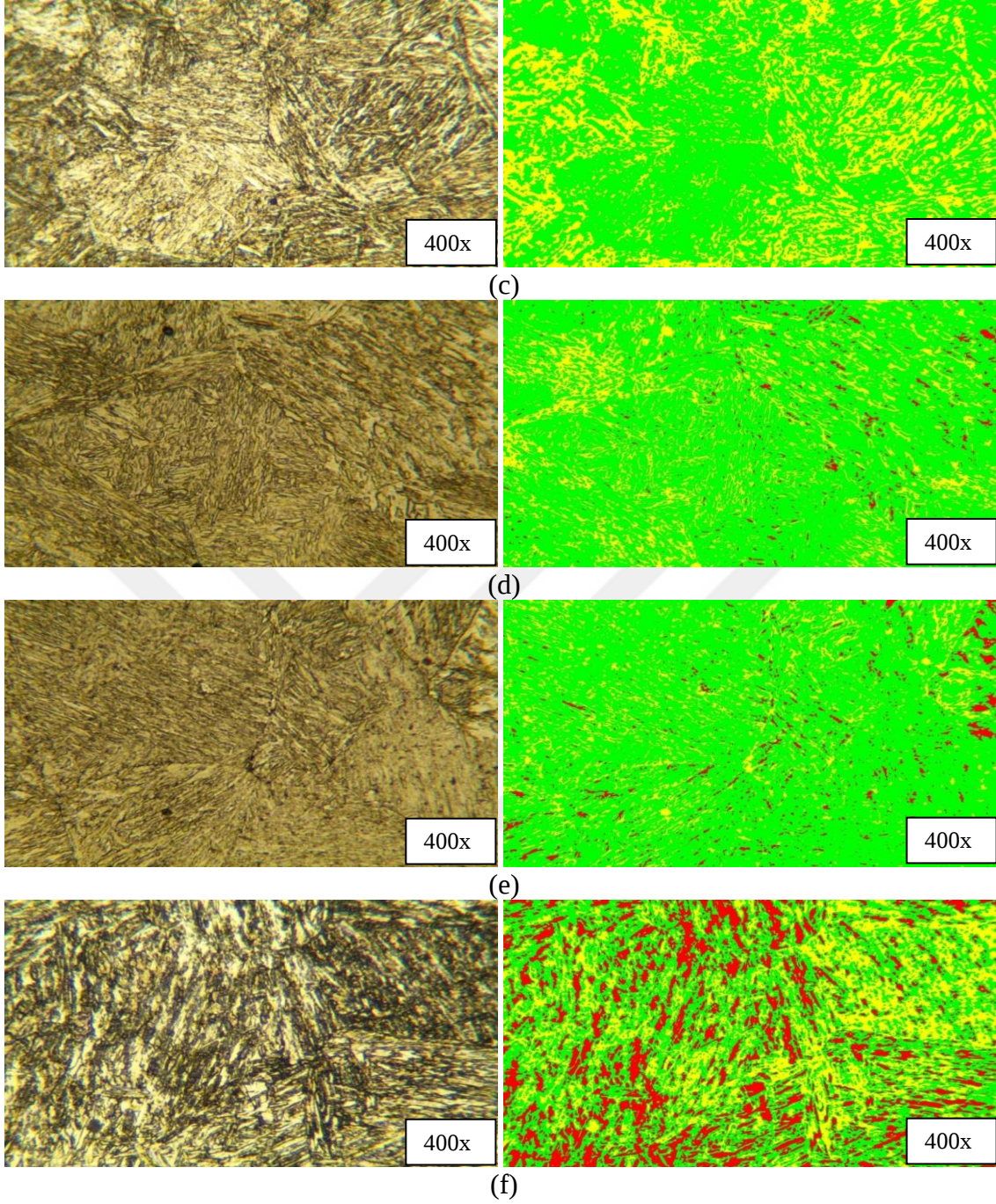
St 52 malzeme yağda soğutma sonrası oluşan mikroyapı incelendiğinde St 52 çelik ZSD diyagramına göre malzeme soğurken sırasıyla ferrit, beynit ve martenzit bölgelerini kesmiştir. Faz analizi resminde görülen sarı renkli taneler martenzit, yeşil renkli taneler beynit, kırmızı renkli taneler ise ferrittir. Soğuma daha yavaş gerçekleştiği için su ve tuzlu suda soğutmaya göre yağda soğutmada ferrit oranı daha fazladır. Yapıda %30 ferrit, %45 beynit ve %25 martenzit fazı bulunmaktadır.

St 52 malzeme yağda soğutma ve temperleme sonrası oluşan mikroyapı incelendiğinde faz analizi resminde görülen yeşil renkli taneler beynit, sarı renkli taneler sorbit ve kırmızı renkli taneler ferrittir. Temperleme sonrası martenzit fazı sorbit fazına dönüşmüştür. Ayrıca ferritin faz oranı ve tane büyüklüğünde ki artış sertlikte düşüşe sebep olacaktır. Yapıda %21 ferrit, %68 beynit ve %11 martenzit fazı bulunmaktadır.

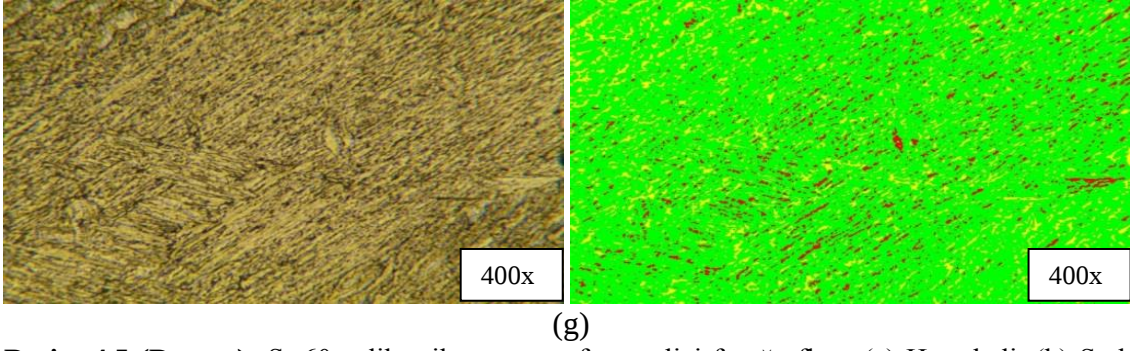
St 60 kalite çelik sacın ham, suda soğutma, tuzlu suda soğutma, yağda soğutma ve temperlenmiş haldeki mikroyapı fotoğrafları ve faz analizi fotoğrafları Resim 4.5’de verilmiştir. Bu işlemler sonucu oluşan mikroyapıdaki faz sayısı ve faz oranları Çizelge 4.5’de verilmiştir. Şekil 4.6’da St 60 malzeme için ısıtma işlem prosesi bilgileri kullanılarak matematiksel fonksiyonlar sonucu oluşturulan ZSD diyagramı ve farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri görülmektedir.



Resim 4.5 St 60 çelik mikroyapı ve faz analizi fotoğrafları. (a) Ham hali. (b) Suda soğutma sonrası. (c) Suda soğutma ve temperleme sonrası. (d) Tuzlu suda soğutma sonrası. (e) Tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası. (f) Yağda soğutma sonrası. (g) Yağda soğutma ve temperleme sonrası. Büyütme 400x.



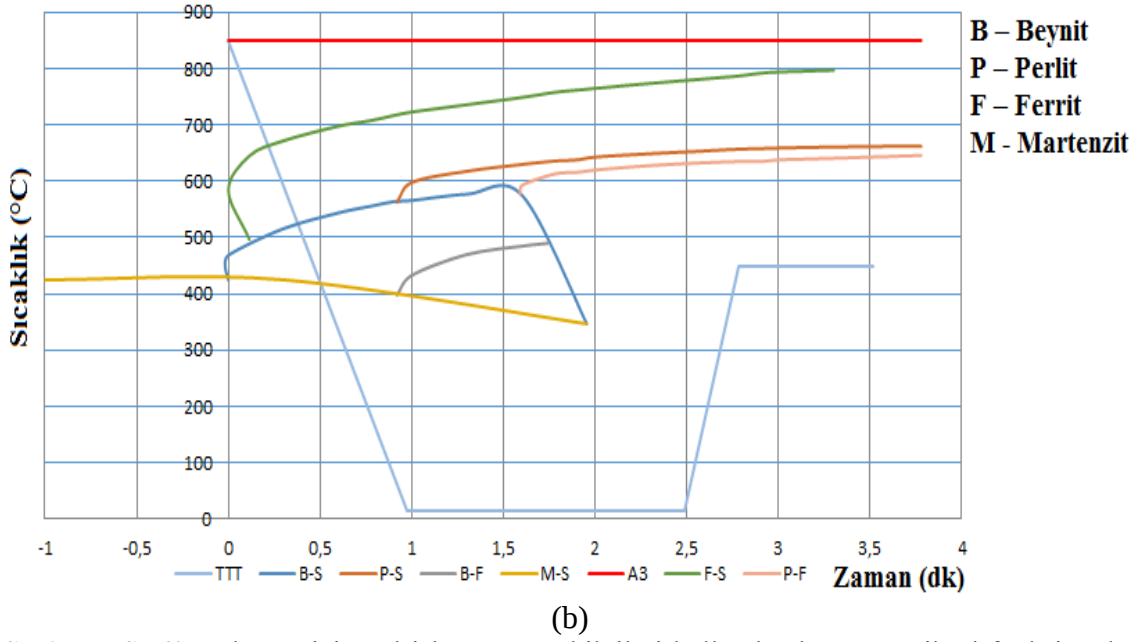
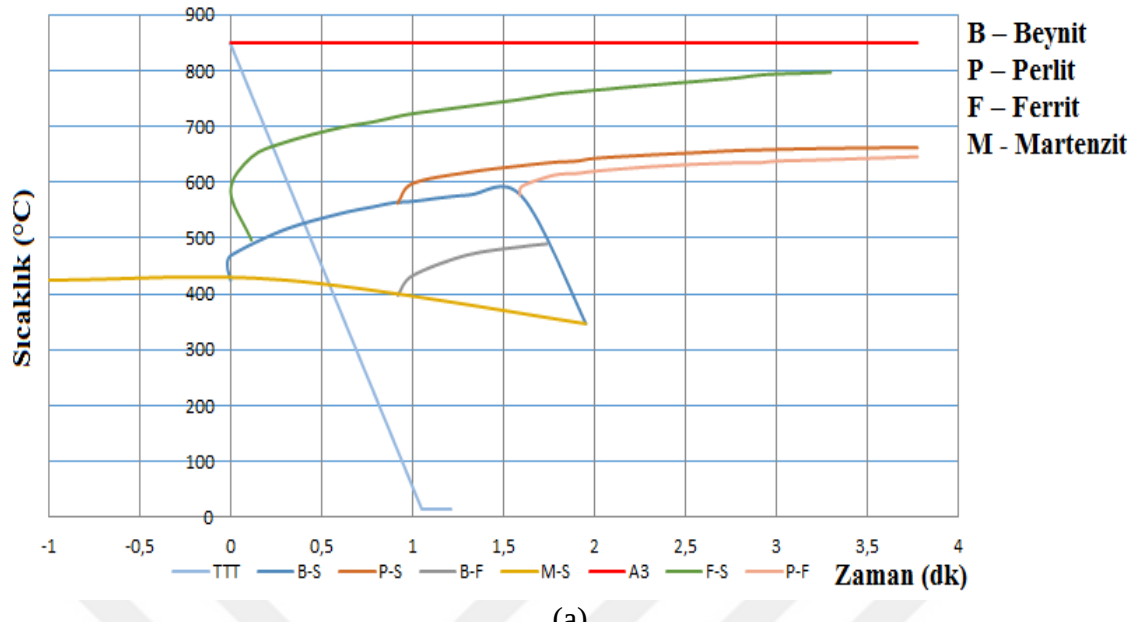
Resim 4.5 (Devam) St 60 çelik mikroyapı ve faz analizi fotoğrafları. (a) Ham hali. (b) Suda soğutma sonrası. (c) Suda soğutma ve temperleme sonrası. (d) Tuzlu suda soğutma sonrası. (e) Tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası. (f) Yağda soğutma sonrası. (g) Yağda soğutma ve temperleme sonrası. Büyütme 400x.



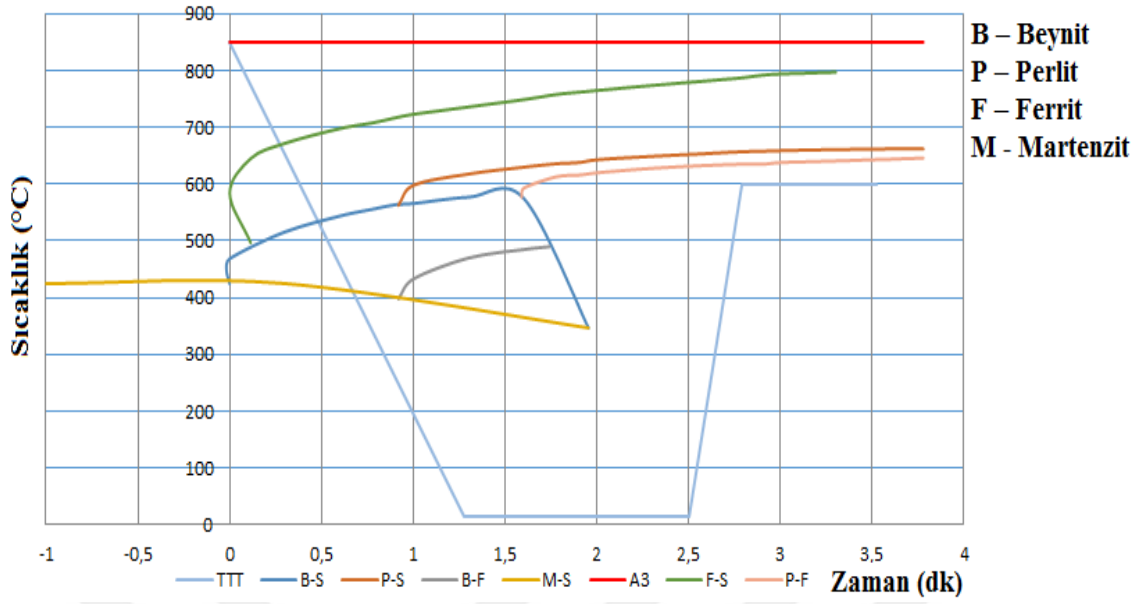
Resim 4.5 (Devam) St 60 çelik mikroyapı ve faz analizi fotoğrafları. (a) Ham hali. (b) Suda soğutma sonrası. (c) Suda soğutma ve temperleme sonrası. (d) Tuzlu suda soğutma sonrası. (e) Tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası. (f) Yağda soğutma sonrası. (g) Yağda soğutma ve temperleme sonrası. Büyütme 400x.

Çizelge 4.5 St 60 malzeme ham hali ve uygulanan ısı işlemler sonrası faz sayısı ve faz oranları.

St 60 malzeme	Faz Sayısı	Ferrit Oranı (%)	Perlit Oranı (%)	Beynit Oranı (%)	Martenzit Oranı (%)	Sorbit Oranı (%)
Ham	2	68	32	-	-	-
Suda soğutulmuş	3	3	-	43	54	-
Suda soğutulmuş ve temperlenmiş	3	25	-	64	-	11
Tuzlu suda soğutulmuş	3	5	-	51	44	-
Tuzlu suda soğutulmuş ve temperlenmiş	3	22	-	66	-	12
Yağda soğutulmuş	3	28	-	45	27	-
Yağda soğutulmuş ve temperlenmiş	3	18	-	73	-	9



Şekil 4.6 St 60 malzeme için ısıtma işlemi prosesi bilgileri kullanılarak matematiksel fonksiyonlar sonucu oluşturulan ZSD diyagramı ve farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri. (a) Suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (b) Tuzlu suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (c) Yağda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri.



Şekil 4.6 (Devam) St 60 malzeme için ısıtma işlemi sonrası farklı soğutma ortamlarında kesilen faz bölgeleri. (a) Suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (b) Tuzlu suda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri. (c) Yağda soğutma esnasında kesilen faz bölgeleri.

St 60 malzeme ham hali mikroyapısı incelendiğinde karbon oranının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Faz analizi fotoğrafında sarı renkli taneler perlit, yeşil renkli taneler ise ferrittir. Yapıda %68 ferrit ve %32 perlit fazı bulunmaktadır.

St 60 malzeme suda soğutma sonrası oluşan mikroyapı incelendiğinde St 52 çelik ZSD diyagramına göre malzeme soğurken ferrit, beyrit ve martenzit bölgelerini kesmiştir. Bu yüzden faz analizi resminde görülen sarı renkli taneler martenzit, yeşil renkli taneler beyrit, kırmızı renkli taneler ise ferrittir. Yapıda %3 ferrit, %43 beyrit ve %54 martenzit fazı bulunmaktadır.

St 60 malzeme suda soğutma ve temperleme sonrası oluşan mikroyapıda faz analizi resminde görülen yeşil renkli taneler beyrit, sarı renkli taneler sorbit, kırmızı renkli taneler ise ferrittir. Temperleme sonrası martenzit fazı sorbit fazına dönüşmüştür. Yapıda %25 ferrit, %64 beyrit ve %11 martenzit fazı bulunmaktadır.

St 60 malzeme tuzlu suda soğutma sonrası oluşan mikroyapı incelendiğinde St 52 çelik ZSD diyagramına göre malzeme soğurken sırasıyla ferrit, beynit ve martenzit bölgelerini kesmiştir. Bu yüzden faz analizi resminde görülen sarı renkli taneler martenzit, yeşil renkli taneler beynit ve kırmızı renkli taneler ferrittir. Yapıda %5 ferrit, %51 beynit ve %44 martenzit fazı bulunmaktadır.

St 60 malzeme tuzlu suda soğutma ve temperleme sonrası faz analizi resminde görülen yeşil renkli taneler beynit, sarı renkli taneler sorbit, kırmızı renkli taneler ise ferrittir. Temperleme sonrası martenzit fazı sorbit fazına dönüşmüştür. Ferrit oranının artışı sertlikte düşüşe sebep olacaktır. Yapıda %22 ferrit, %66 beynit ve %12 martenzit fazı bulunmaktadır.

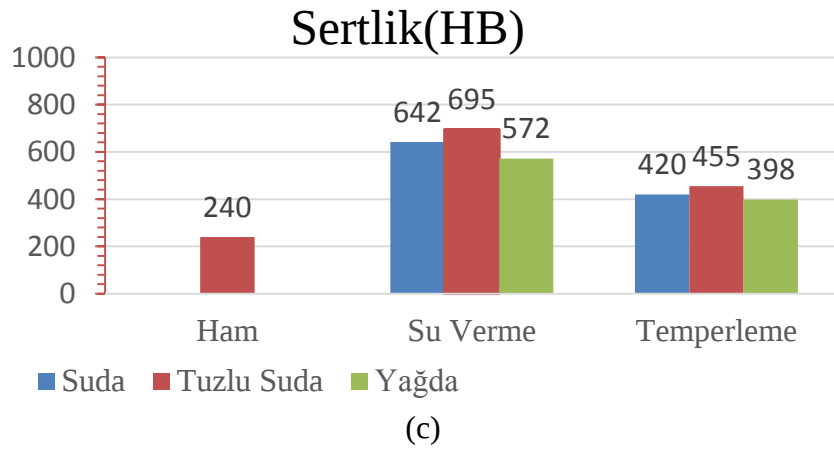
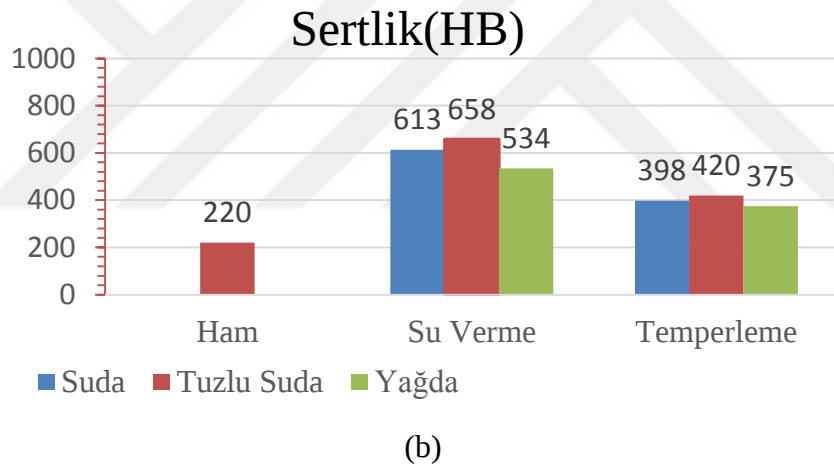
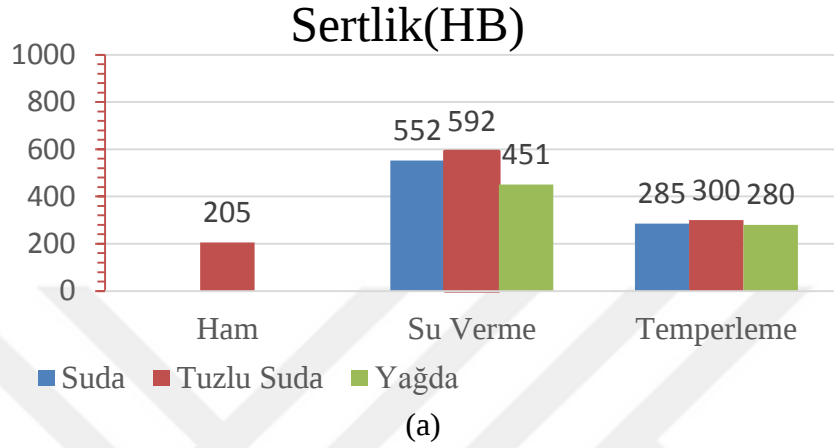
St 60 malzeme yağda soğutma sonrası oluşan mikroyapı incelendiğinde St 60 çelik ZSD diyagramına göre malzeme soğurken sırasıyla ferrit, beynit ve martenzit bölgelerini kesmiştir. Faz analizi resminde görülen sarı renkli taneler martenzit, yeşil renkli taneler beynit, kırmızı renkli taneler ise ferrittir. Soğuma daha yavaş gerçekleştiği için su ve tuzlu suda soğutmaya göre yağda soğutmada ferrit oranı daha fazladır. Yapıda %28 ferrit, %45 beynit ve %27 martenzit fazı bulunmaktadır.

St 60 malzeme yağda soğutma ve temperleme sonrası oluşan mikroyapı incelendiğinde faz analizi resminde görülen yeşil renkli taneler beynit, sarı renkli taneler sorbit ve kırmızı renkli taneler ferrittir. Temperleme sonrası martenzit fazı sorbit fazına dönüşmüştür. Ayrıca ferritin faz oranı ve tane büyüklüğünde ki artış sertlikte düşüşe sebep olacaktır. Yapıda %18 ferrit, %73 beynit ve %9 martenzit fazı bulunmaktadır.

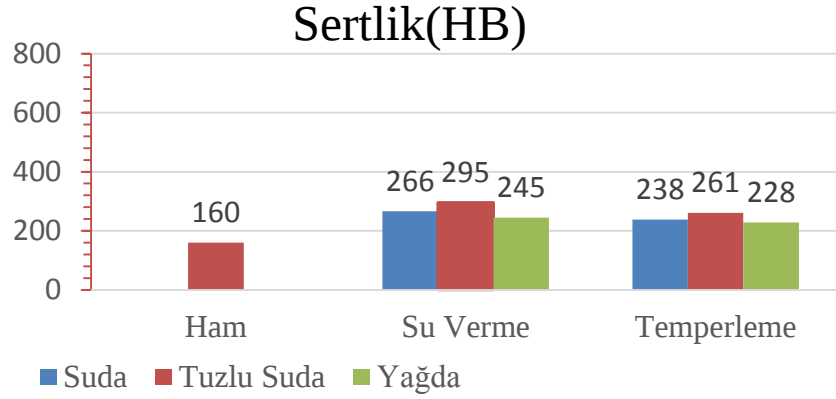
4.2.2 Sertlik Testi Sonuçları

Mikroyapı incelemelerinden sonra deney numuneleri görüntüsü alınan yüzeylerden rastgele 5 ayrı ölçüm yapılmış, bu ölçümlerin en düşük ve en yüksek değerleri dikkate alınmaksızın kalan 3 ölçümün ortalamaları bulunmuştur. Bms Digirock-Rbov sertlik cihazında deney malzemelerinin sertlik ölçümleri Brinell olarak (HB) elde edilmiştir.

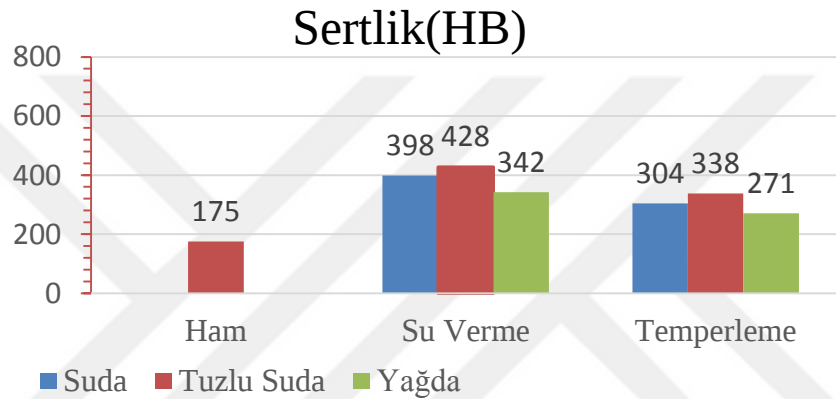
Şekil 4.7’de 1040, 1045, 1050, St 52 ve St 60 malzemeler için ham, suda soğutulmuş, suda soğutulmuş ve temperlenmiş, tuzlu suda soğutulmuş, tuzlu suda soğutulmuş ve temperlenmiş, yağda soğutulmuş, yağda soğutulmuş ve temperlenmiş hali sertlik değeri sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.7 Deneyde kullanılan malzemelerin ham ve ısıt işlemler sonrası sertlik değerleri. (a) 1040 malzeme. (b) 1045 malzeme. (c) 1050 malzeme. (d) St 52 malzeme. (e) St 60 malzeme.



(d)



(e)

Şekil 4.7 (Devam) Deneyde kullanılan malzemelerin ham ve ısıl işlemler sonrası sertlik değerleri. (a) 1040 malzeme. (b) 1045 malzeme. (c) 1050 malzeme. (d) St 52 malzeme. (e) St 60 malzeme.

Sonuçlar incelendiğinde karbon oranının artmasıyla sertlik değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Üç farklı ısıl işlem ortamında uygulanan soğutma sonucu en yüksek sertliğe tuzlu su ortamında ulaşılmıştır. En düşük sertlik sonuçları ise yağda gerçekleşmiştir. Soğutma sonrası uygulanan temperleme işlemleri ile sertlikte düşüş ama toklukta artış gözlemlenmiştir. Temperleme sıcaklığı ve süresi değiştirilerek temperleme sonrası istenilen sertlik değerlerine ulaşılabilir.

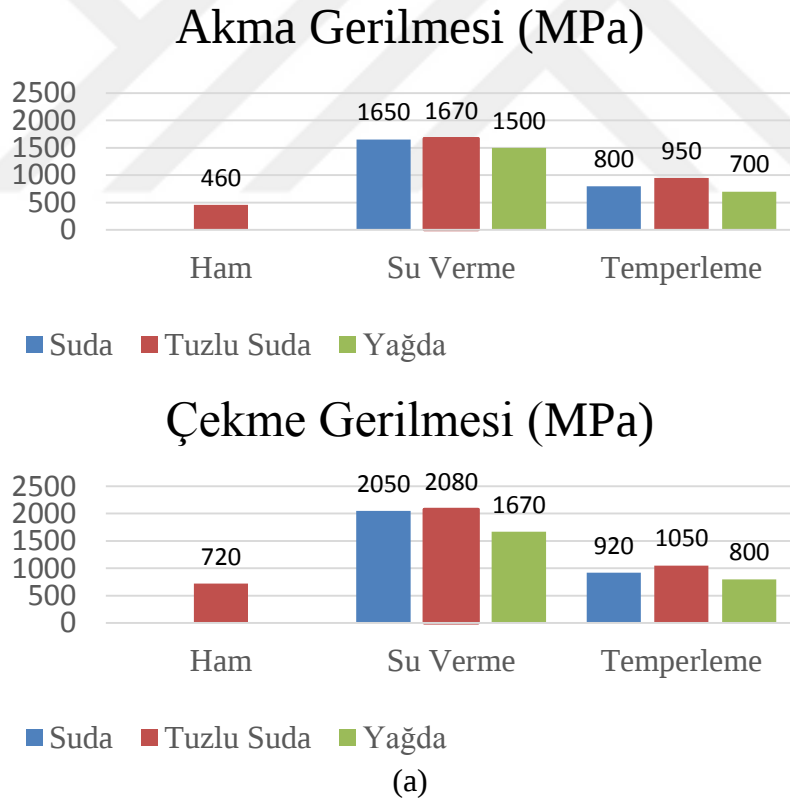
4.2.3 Çekme Testi Sonuçları

Çekme testinde tüm deney malzemeleri çekme cihazının düz çeneleri arasında koparılmıştır. Resim 4.6'da çekme testi sonrası hasara uğruyan numuneler için bir örnek görülmektedir.



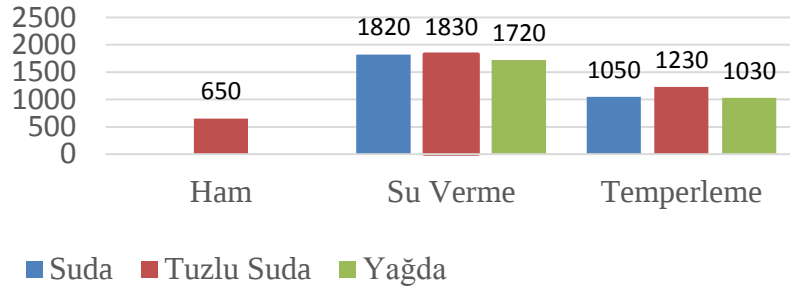
Resim 4.6 Çekme testi sonrası hasara uğrayan örnek numune.

UTEST 600 kN otomatik çekme basma deney cihazında gerçekleştirilen akma ve çekme testi sonuçları Şekil 4.8’de verilmiştir.

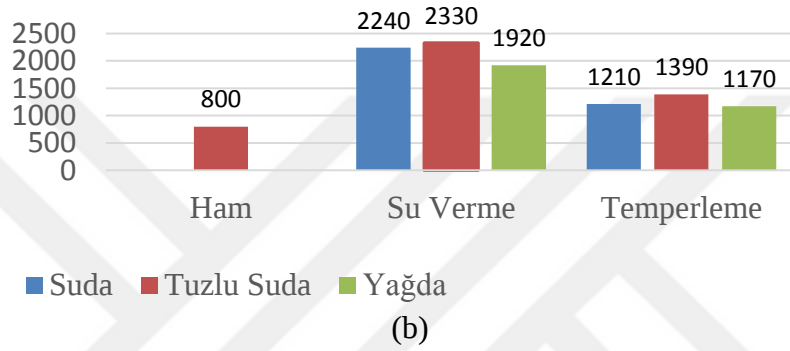


Şekil 4.8 Deneyde kullanılan malzemelerin ham ve ısıt işlemler sonrası akma ve çekme gerilmesi değerleri. (a) 1040 malzeme. (b) 1045 malzeme. (c) 1050 malzeme. (d) St 52 malzeme. (e) St 60 malzeme.

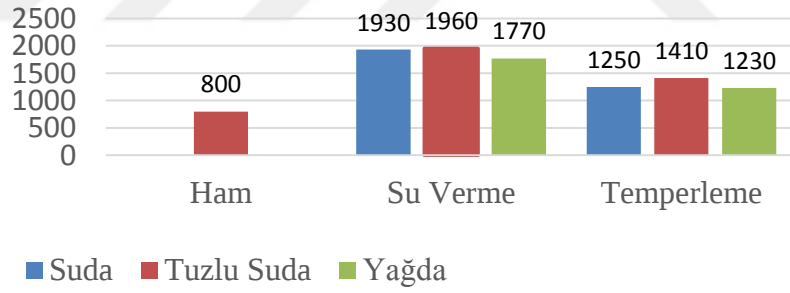
Akma Gerilmesi (MPa)



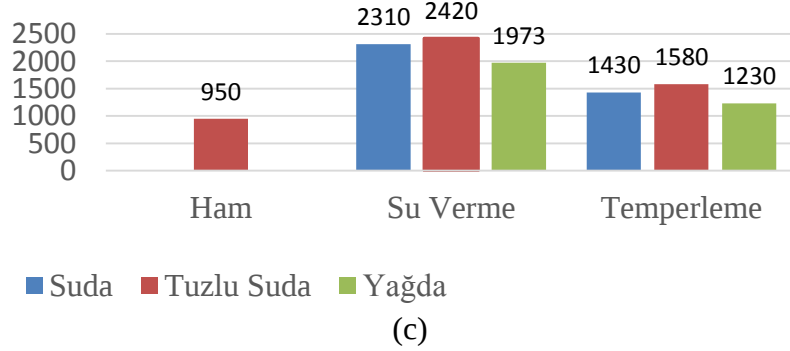
Çekme Gerilmesi (MPa)



Akma Gerilmesi (MPa)

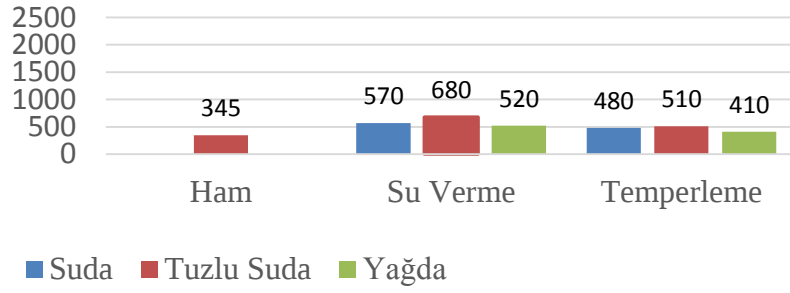


Çekme Gerilmesi (MPa)

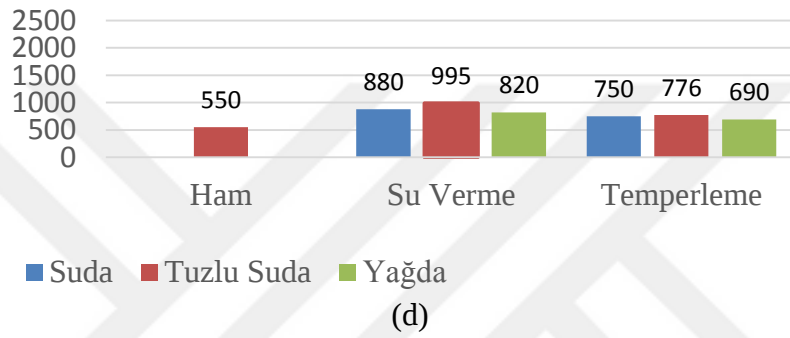


Şekil 4.8 (Devam) Deneyde kullanılan malzemelerin ham ve ısıt işlemler sonrası akma ve çekme gerilmesi değerleri. (a) 1040 malzeme. (b) 1045 malzeme. (c) 1050 malzeme. (d) St 52 malzeme. (e) St 60 malzeme.

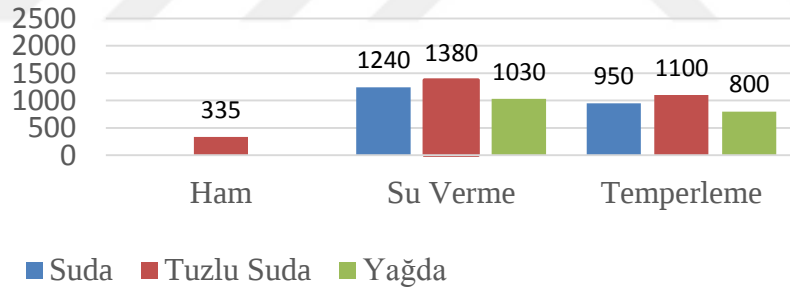
Akma Gerilmesi (MPa)



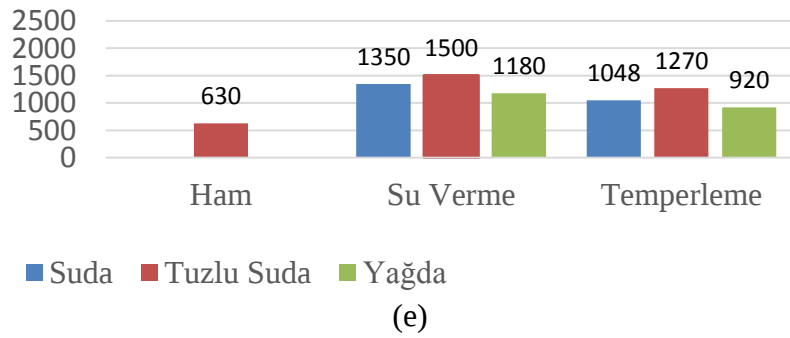
Çekme Gerilmesi (MPa)



Akma Gerilmesi (MPa)



Çekme Gerilmesi (MPa)



Şekil 4.8 (Devam) Deneyde kullanılan malzemelerin ham ve ısıt işlemler sonrası akma ve çekme gerilmesi değerleri. (a) 1040 malzeme. (b) 1045 malzeme. (c) 1050 malzeme. (d) St 52 malzeme. (e) St 60 malzeme.

Çekme gerilmesi değerleri incelendiğinde; ham haldeki örnekler bakıldığında karbon oranının artışıyla çekme gerilmesinde de önemli ölçüde artış gözlemlenmiştir. Deney malzemeleri arasında en yüksek karbon oranına sahip olan 1050 çelik, en düşük karbon oranına sahip olan St 52 çelikle kıyaslandığında, 1050 çelik St 52'ye göre üstünlük göstermektedir.

Karbon oranının artışıyla mukavemette meydana gelen artış sünekliğin azalmasına neden olmaktadır. Uygulanan temperleme ısı işlemlerinden sonra mukavemette bir miktar düşüş olmasına rağmen sünekliğin artışıyla daha tok malzemeler elde edilmiştir.

4.3 Isı Transfer Hesaplamaları

1000 °C'ye çıkacak ısı işlem fırını tasarımı yapılırken, başlangıç aşamasında bazı problemler mevcuttur. Bunlardan ilki, fırını 1000 °C sıcaklığa kadar çıkarabilecek ve o bölgede uzun süre bekleyebilecek, kısa sürede deforme olmayacak ve bu sıcaklık bölgesinde maksimum güç alınabilecek rezistans telinin temin edilmesidir. İkincisi, bu sıcaklık bölgesinde uzun süre dayanabilecek rezistans taşıyıcı tuğlasıdır. Üçüncüsü ise, fırın sıcaklığının minimum güç harcaması ile 1000 °C'ye çıkmasını sağlayacak iyi bir yalıttır. Yalıtım yapıldıktan sonra fırın içerisinde kalan malzeme ısıtma alanına uygun olarak Kanthal A-1 tel rezistans kullanılmıştır.

4.3.1 Fırın Gücünün Tayini

Fırın gücü, fırın içerisinde ısıtılan malzemenin birim zamanda ihtiyaç duyduğu ısı miktarına, fırın ısı kayıplarının ve emniyet faktörünün ilave edilmesiyle hesaplanır. Şekil 4.9'da normal yalıtım ve yapıdaki fırınların iç hacimlerine göre güçlerini göstermektedir.

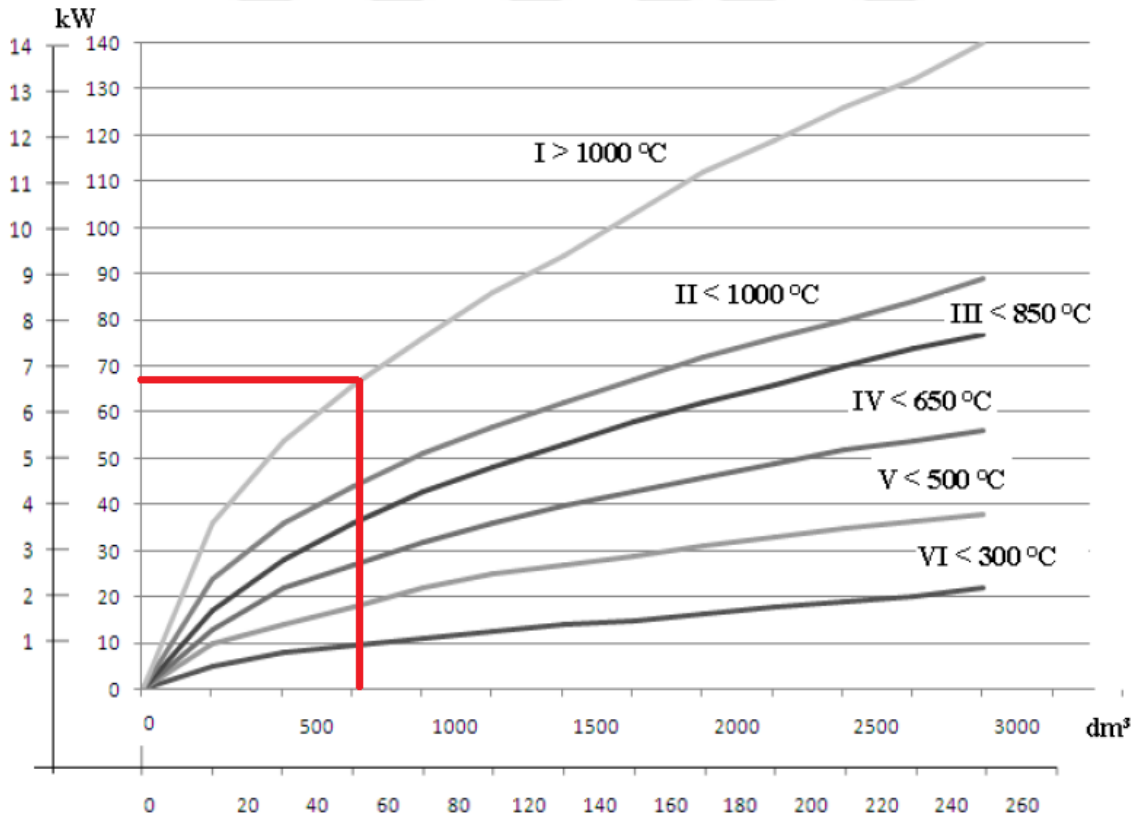
I nolu eğri orta ve yüksek sıcaklıklar için güç değerlerini verir. Aynı zamanda bu eğri yuvarlak ve sürekli fırınlar için de kullanılır. Emaye fırınlarda genellikle %10 daha fazla, yavaş ısıtmanın gerektiği ısı işlem fırınlarında %25 daha az güç gerekmektedir.

II nolu eğri fırın sıcaklığı 1000 °C'ye kadar olan seramik fırınların güç değerlerini verir. III, IV, V ve VI nolu eğriler ise 300 °C'ye kadar olan kurutma fırınlarının güç değerlerini verir.

İmalatı yapılacak olan fırının parametreleri şu şekilde olacaktır.

- Fırının iç yüksekliği: 600 mm
- Fırının iç genişliği: 600 mm
- Fırının iç derinliği: 1700 mm

Fırının iç hacmi 612 dm³ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.9'da fırın sıcaklık değeri ile fırın hacminin kesiştiği nokta, fırın gücünü tayin eder. Fırın hacmi 612 dm³ ve fırın sıcaklık değeri 1000 °C olduğuna göre I nolu eğriden fırın gücü yaklaşık olarak 66 kW bulunur.



Şekil 4.9 Fırın gücünün tayini (İnt.Kyn.13).

Elektrikli ısıtma işlem fırını tasarım denklemleri ve sonuçlar Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.6 Isıtma işlem fırını tasarım denklemleri (Thelning 1984).

Proses Isısı (kW)	$\frac{m \times C_p \times \Delta T}{3412}$
Isıl Depolama (kW)	$\frac{(\text{Isıl depolama/ft}^2) \times A}{3412}$
Toplam Güç Gereksinimi (kW)	Proses Isısı + Isıl Depolama
Watt / Eleman	$\frac{\text{Isıtma bölümü alanı (inç}^2\text{)} \times \text{watt}}{\text{inç}^2}$
Eleman Sayısı	$\frac{\text{Toplam güç gereksinimi (W)}}{\text{W/Eleman}}$
Voltaj /Eleman	$[(\text{W/Eleman}) \times (\text{Direnç/Eleman})]^{1/2}$
Toplam Voltaj	$(\text{V/Eleman}) \times (\text{Seri eleman sayısı})$
Toplam Akım	$\frac{A}{\text{Eleman}} \times \text{paralel devre eleman sayısı}$

Çizelge 4.7 Isıtma işlem fırını elektriksel değerler.

Güç (0)	66 kW
Grup Sayısı (n)	2
Güç / Grup (P / grup)	30 kW
Güç / Faz (P / faz)	10 kW
Voltaj (U)	220 Volt
Akım (I)	45.45 A

4.3.2 Rezistans Seçimi

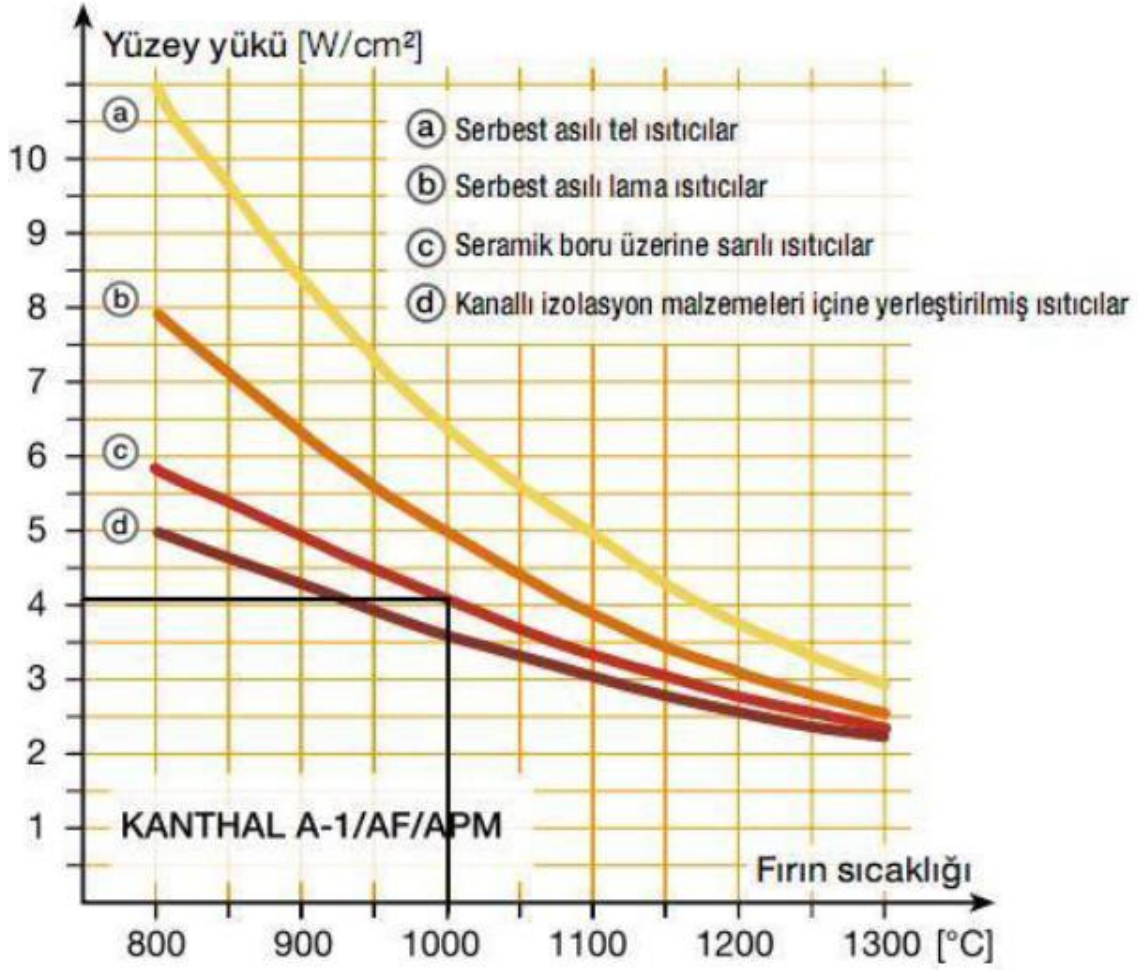
Belirli bir güçte çalışan rezistans elemanında gücün rezistans yüzeyine yayılmasından dolayı, birim yüzeye yüklenen bir güç miktarı vardır. W/cm^2 elemanın radyasyon yolu ile ısı vermesinde temel faktördür. Verilen bir çalışma gücünde birim yüzeye yüklenen gücün büyüklüğü doğrudan aşağıdaki noktalara bağlıdır.

- Rezistans elemanının çapına ve uzunluğuna bağlıdır (W/cm^2 büyüdükçe tel çapı küçülür, metraj azalır).
- W/cm^2 büyüdükçe tel sıcaklığı yükselir. Fakat çekilen güç sabit kaldığından W/cm^2 'nin her büyüklüğü için çevreye verilen kalori sabittir.
- W/cm^2 büyüklüğü yükseldikçe telin ömrü azalır. Yüksek sıcaklıklara çıkabilmek için özel rezistanslar kullanılır. Bunun en önemli nedeni ise; zamanla rezistans da yıgılma ve kopmaların gerçekleşmesidir.

Tasarlanan fırından istenilen sıcaklığa göre birim yüzeye yüklenen gücü seçmek gerekmektedir. Tasarlanan fırında Kanthal firmasının ürettiği Kanthal A-1 tipi rezistansı kullanılmıştır.

Kanthal A-1 tel rezistansı maksimum 1400 °C sıcaklığa kadar kullanılabilen direnç elemanlarıdır. Yüksek uygulama sıcaklıklarında kararlı oksit tabakasına sahiptirler.

Şekil 4.10'da Kanthal A-1'in sıcaklığa bağlı değişimi verilmiştir. Buna göre kullanılacak Kanthal A-1 teli için, 1000 °C'lik bir fırında birim yüzeye yüklenen güç Şekil 4.10'dan yaklaşık olarak 4.1 W/cm^2 olmalıdır.



Şekil 4.10 Endüstriyel fırınlar uygulamalarında Kanthal A-1 için yüzey yükleri (İnt.Kyn.13).

Kullanılacak rezistans telin hesabı aşağıdaki denklemler kullanılarak yapılmıştır.

Telin toplam direnç denklemi denklem 4.1’de verilmiştir.

$$R_t = \frac{U^2}{P} \quad (4.1)$$

Telin 20 °C’deki direnç denklemi denklem 4.2’de gösterilmiştir.

$$R_{20} = \frac{R_t}{C_t} \quad (4.2)$$

Telin öz direnç denklemi denklem 4.3’de verilmiştir.

$$cm^2 / \Omega = \frac{P}{p \times R_{20}} \quad (4.3)$$

Gerekli tel boyu denklemi denklem 4.4’de verilmiştir.

$$L = \frac{R_{20}}{\Omega/m} \quad (4.4)$$

Gerekli tel ağırlığı denklemi denklem 4.5’de gösterilmiştir.

$$G = L \times w \quad (4.5)$$

Yukarıdaki denklemlerde,

R_t = Toplam direnç (Ω)

U = Voltaj (V)

P = Şebekeden çekilen güç (W)

R_{20} = Soğuk direnç (Ω)

C_t = Sıcaklık faktörü

cm^2 / Ω = Öz direnç

p = Birim yüzeye yüklenen güç (W/cm^2)

L = Gerekli tel boyu (m)

Ω/m = Birim yüzeydeki direnç

G = Gerekli tel ağırlığı (kg)

Kanthal A-1 teli için 1000 °C’deki sıcaklık faktörü C_t Çizelge 4.8’e bakılarak bulunmuştur.

Çizelge 4.8 Kanthal A-1 için C_t katsayısı (Thelning 1984).

°C	20	200	400	600	800	1000	1200	1400
C_t	1.00	1.00	1.00	1.02	1.03	1.04	1.04	1.05

Çizelge 4.9'dan telin çap değeri, birim yüzeydeki direnci ve ağırlığı bulunmuştur.

Çizelge 4.9 Kanthal A-1 rezistans teli için 20 °C'de özellikleri (İnt.Kyn.10).

Çap (mm)	Direnç (Ω/m)	Özdirenç cm^2/Ω	Ağırlık (g/m)
1.00	1.850	17.0	5.58
1.20	1.280	29.4	8.03
1.40	0.942	46.7	10.9
1.60	0.695	73.7	14.8
1.83	0.551	104	18.7
2.00	0.462	136	22.3
2.05	0.439	147	23.4
2.34	0.337	218	30.5
2.65	0.263	317	39.2
4.00	0.115	363	89.2

Hesaplamalar sonrası elde edilen sonuçlar Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10 Hesaplamalar sonrası kullanılacak rezistans teli özellikleri.

Toplam direnç (Rt)	4.840 Ω	
Voltaj (U)	220 V	
Şebekeden çekilen güç (P)	60 kW	
Soğuk direnç (R20)	4.654 Ω	
Sıcaklık faktörü (Ct)	1.04	
Özdirenç	1.45 mm²/m	
Birim yüzeye yüklenen güç (p)	1.97 W/cm²	
Birim yüzeydeki direnç (Ω/m)	0.115 Ω/m	
Gerekli tel boyu (m)	Bir faz için	Toplam
	40.47 m	242.8 m
Gerekli tel ağırlığı (kg)	Bir faz için	Toplam
	3.61 kg	21.66 kg

4.3.3 Yalıtım Hesabı

Isıl işlem fırını izolasyon kalınlıklarının belirlenmesi için birim yüzeyde meydana gelen ısı kayıpları hesaplanmıştır.

Fırın içerisinde bulunan ısı, fırın duvarının iç yüzeyinden duvara geçerek, kısmen duvarların ısınmasıyla, kısmen de dış duvara geçerek dış duvardan çevreye yayılarak kaybolur. Çevreye yayılan ısı, duvar kaybı ve duvarların ısınmasında kullanılan ısı ısınma kaybı olarak adlandırılır.

Kayıpların hesaplanmasında, kayıpları meydana getiren durumlar göz önünde tutularak hesaplama yapılır. Örneğin, fırın soğuk halden ısıtılmaya başlandığında, duvarlara verilen ısının bir kısmı duvarları ısıtırken, duvardan dışarıya iletilen ısı miktarı, fırın rejim halinde çalışmaya devam ettiğinde, sürekli olarak kaybolur. Dolayısıyla, hesaplamanın fırının ısıtılması ve rejim hali için, ayrı ayrı yapılması zorunludur.

Fırın duvarlarının dış yüzeyleri için ısıl geçirgenlik hesapları denklem 4.6 kullanılarak yapılmıştır.

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_{iç}} + \frac{1}{\lambda_{sac}} + \frac{1}{\lambda_{board}} + \frac{1}{\lambda_{bulk}} + \frac{1}{\alpha_{dış}} \quad (4.6)$$

Yukarıdaki denklemde,

$1/K$ = Isıl geçirgenlik ($W/m^2.K$)

$1/\alpha$ = Yüzeysel ısı taşınım dirençleri ($W/m^2.K$)

$1/\lambda$ = Isı geçiş katsayısı ($W/m^2.K$)

Birim yüzeyde kaybolan toplam ısı denklem 4.7 kullanılarak hesaplanabilir.

$$Q = F \times K \times \Delta T \quad (4.7)$$

Yukarıdaki denklemde,

Q = Isı kaybı (W)

F = Fırın dış yüzey alanı (m²)

K = Isıl geçirgenlik (W/m².K)

ΔT = Sıcaklık farkı (°C)

Hesaplamalar sonucu fırın dış yüzeyinde meydana gelen ısıl geçirgenlik değerleri ve ısı kayıpları Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.11 Fırın dış yüzeyinde meydana gelen ısıl geçirgenlik değerleri ve ısı kayıpları.

Yüzey	Isıl Geçirgenlik (W/m ² .K)	Isı kaybı (W)
Yan duvar	0,851	2297,7
Üst duvar	0,620	1674
Ön kapak	0,397	759,22
Arka Kapak	0,851	919,08
Taban	0,436	1177,2
Toplam		9124,88

4.4 Otomasyon

Isıl işlem fırınının otomasyon sisteminde PLC Delta Dvp 14SS2 kullanılmıştır. PID modülü olarak Delta Dtc 1000 kullanılmıştır. Fırının kontrolü manuel ve otomatik olarak iki moddan oluşmaktadır.

Manuel ve otomatik mod seçme butonu HMI dokunmatik ekran üzerinden aktif edilerek makinanın hangi modda çalışacağı belirlenir. Dokunmatik ekran ara yüzünde manuel mod seçildiğinde SSR Röleler sayesinde enerjilenerek rezistans teller ısınmaya başlayıp fırın içi sıcaklığının istenen değere ulaşması sağlanmaktadır. Bu sıcaklığa ulaşıldığında ortamın sıcaklık değerini sabit tutmak için PID modülü Delta Dtc 1000 kullanılmıştır.

Makinenin manuel modunda sıcaklık ve süre değerleri girildikten sonra ortam sıcaklığı istenen değere ulaştığında süre saymaya başlayacaktır. Süre bittikten sonra işlem sonlandırılıp pano üzerinde bulunan sesli alarm sistemiyle uyarı verilmektedir. Sistemde herhangi bir problem çıktığında ise acil stop butonu aktif edilerek sistemin durdurulması sağlanmaktadır (Resim 4.7).



Resim 4.7 Isıl işlem fırını elektrik kumanda panosu.

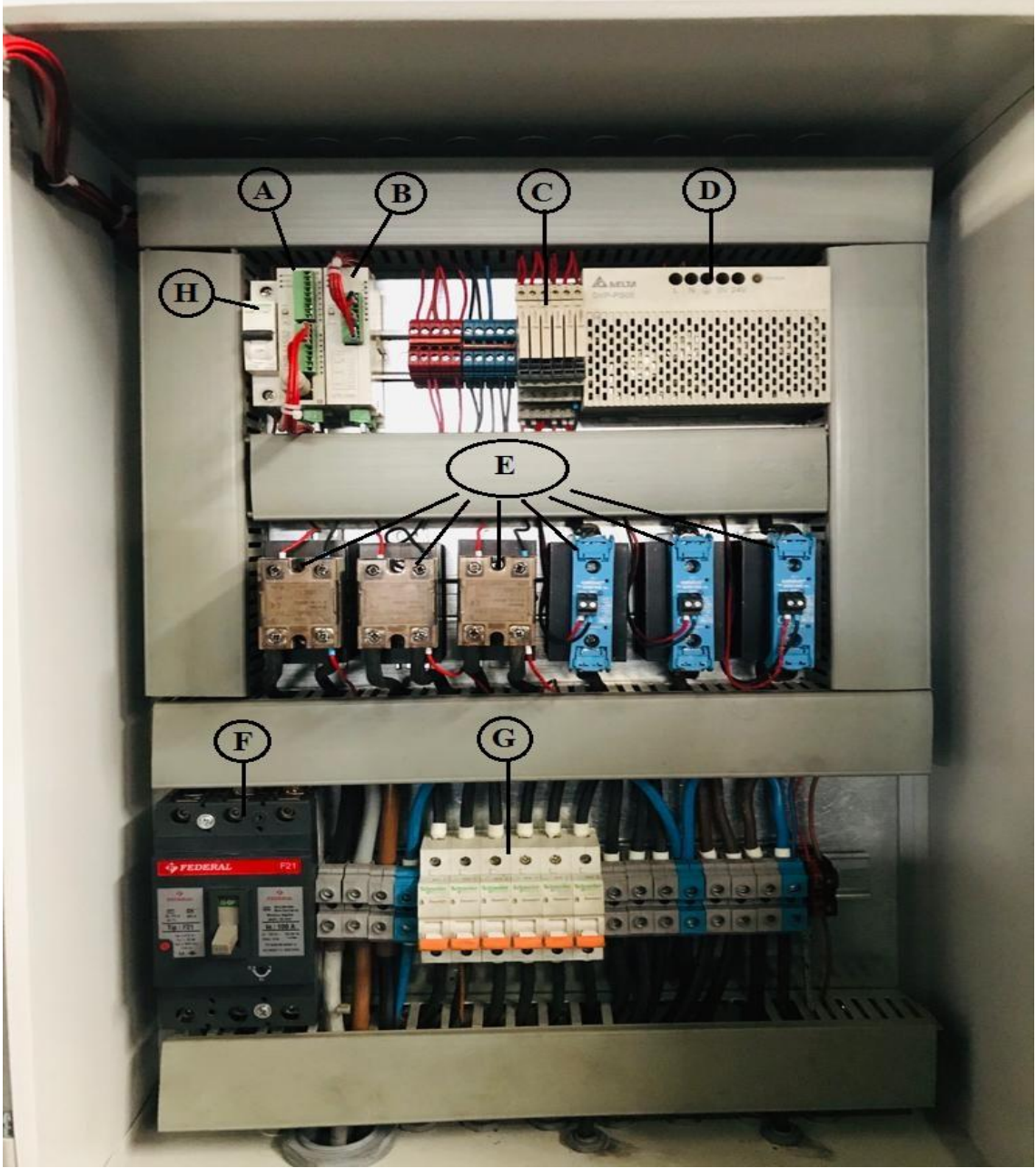
Makinenin otomatik modunda malzeme cinsi ve kalınlık değeri girilmektedir. Girilen bu değerler sonrasında uygulanacak ısıtma işlemine göre sıcaklık ve süre değeri otomatik olarak hesaplanmaktadır. Metalografik ve mekanik deneyler sonrası elde edilen verilere göre arka planda oluşturulan hesaplamalar sonucu ısıtma işlemi sonrası malzeme sertliği, akma ve çekme dayanımları ekranda ön bilgi olarak verilmektedir. Fırına ait sıcaklık değerleri termokupl yardımıyla alınarak analog modül yardımıyla PLC'ye aktarıldıktan sonra elde edilen değerlere göre fırın sıcaklığı kontrol edilebilmektedir. Ayrıca kontrol paneli yardımı ile istenilen sıcaklık değerini ve fırın içi sıcaklığının ekrandan izlenmesini sağlamıştır.

Manuel modda yardım, otomatik modda ise açıklama butonu ile uygulanan ısıtım işlem yöntemine göre malzemelerin mikroyapısı, faz oranları, ZSD diyagramları, sertlik değerleri, akma ve çekme dayanımlarına ulaşılabilmektedir. Yapılan deneyler sonucu elde edilen bu veriler ile seçilecek sıcaklık değerine göre oluşacak mikroyapı, sertlik ve çekme dayanımı ön bilgi olarak sunulmaktadır.

Çizelge 4.12’de sistemde kullanılan ladder diyagram fonksiyonları yer almaktadır. Bu fonksiyonlar programın çalışmasını sağlayan kontaklardır. YO rezistans 1’in manuel aç kapa yapmasını sağlayan kontak, Y1 rezistans 2’nin manuel aç kapa yapmasını sağlayan kontak, Y3 rezistans 3’ün manuel aç kapa yapmasını sağlayan kontak. Bu komutlar sistemin çıkış kontaklarıdır. M fonksiyonları yardımcı kontaklardır. Bu fonksiyonlar çıkış kontağı olmayan, yük bağlanmayan, geçici hafıza birimleridir. T0 ana sayıcı T1 ise yardımcı sayıcıdır. Sistemin ne kadar süre kalmasını belirleyen komutlardır ve desisaniye cinsinden hesaplama yapılır. DTC modülünden sıcaklık sensörü girişi alındığı için giriş kontakları kullanılmamıştır. Çıkış kontakları ve yardımcı kontaklar kullanılarak enerji aktif olur ve sistem çalışır.

Çizelge 4.12 Ladder diyagram fonksiyonları.

Fonksiyon	Açıklama
Çıkışlar (Y0,Y1,Y2)	PLC Logo Çıkışlar
Yardımcı Kontaklar (MO,M1,M2,...)	PLC Logo Programı İçindeki Yardımcı Kontaklar
Zamanlayıcı (T0,T1)	TMR komutu yürütüldüğünde, zamanlayıcının belirli sütunu açık olur ve zamanlayıcı saymaya başlar.



Resim 4.8 Isıl işlem fırını güç paneli iç donanım resmi.

Isıl işlem fırınının kontrolü PLC DELTA DVP14SS2 (A) ile sağlanmaktadır. Sisteme gücü veren 24 V güç kaynağı (D) vardır. Rezistansların enerjilendirilmesi için 6 adet SSR röle kullanılmıştır. SSR rölelerin kontrolü DELTA DTC1000 PID (B) modülü ile sağlanmaktadır. Sistemi manuel olarak kontrol etmek için slim röle (C) kullanılmıştır. Elektrik kumanda panosunun gücünü kesmek için 100 A sigorta (F), rezistansların gücünü kesmek için 63 A sigorta (G), PLC'nin gücünü kesmek için 10 A sigorta (H) kullanılmıştır (Resim 4.8).

4.5 Isıl İşlem Fırını İmalatı ve Montajı

Isıl işlem fırını imalatı yapılırken tasarım ve tasarım doğrulama adımları tamamlandıktan sonra belirlenen ölçülere göre teknik resimleri çıkarılmış ve bu ölçüler ışığında gerekli kriterler göz önünde bulundurularak imal edilmiştir. İmalat resimleri teknik resim standartlarının yanı sıra parça özelliklerine bağlı olarak ölçü, ölçü toleransı, yüzey-konum toleransları, kaynak ve kaplama bilgilerini üzerinde barındıracak şekilde çıkarılmış ve bu ölçülerde hassas toleranslara göre imal edilmiştir.

Teknik resimleri hazırlanan parçaların imalat yöntemlerine karar verilmiştir. İlk olarak tüm sac malzemeler ölçüleri doğrultusunda cnc plazma kesim makinasında belirlenen boyutlara göre kesilmiştir. Kesimi tamamlanan malzemelerin birleştirme işlemi kaynak yöntemiyle uygulanmıştır. Kaynak çeşidi olarak gaz altı kaynağı tercih edilmiştir. Kaynak esnasında meydana gelebilecek çarpılmaları önlemek için tüm parçalar sabitlenmiş gerektiği durumda ise fiksörler hazırlanmıştır. Uygulanan bu yöntem sayesinde ısıl işlem fırını istenilen ölçülerde imal edilmiştir. İmalatı tamamlanan malzemeler teknik resimlerine göre boyutsal olarak kontrol edilmiştir.

İmalatı gerçekleştirilen ve boyutsal kontrolleri yapılan malzemeler ısıya dayanıklı boya ile boyanmıştır. Boyama işlemi biten tüm malzemelerin montajı standart boyutlardaki cıvatalar ile sağlanmıştır. Yük taşıyıcı yürüyen taban sacının montajı fırının bakım ve sevkiyat aşamaları göz önüne alınarak, sökülebilir bağlantı elemanı cıvata ile uygulanmıştır. Ayrıca oluşabilecek hatalara kolay ulaşım için fırın üst taban sacının montajı cıvatalar ile sağlanmıştır.

Fırın içi yalıtımı sağlamak amacıyla seramik board, seramik blanket ve ateş tuğlası kullanılmıştır. Yan duvarlar, üst tavan sacı ve kapakların yalıtımı 100 mm seramik bulk ve 50 mm seramik board kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Alt taban sacının izolasyonu ateş tuğlası kullanılarak uygulanmıştır.

Isıl işlem fırınına ait imalat ve montaj aşamaları imalat resimleriyle birlikte açıklanmıştır.



Resim 4.9 Isıl işlem fırını alt tabanı montaj resmi.



Resim 4.10 Isıl işlem fırını yan duvarı montaj resmi.



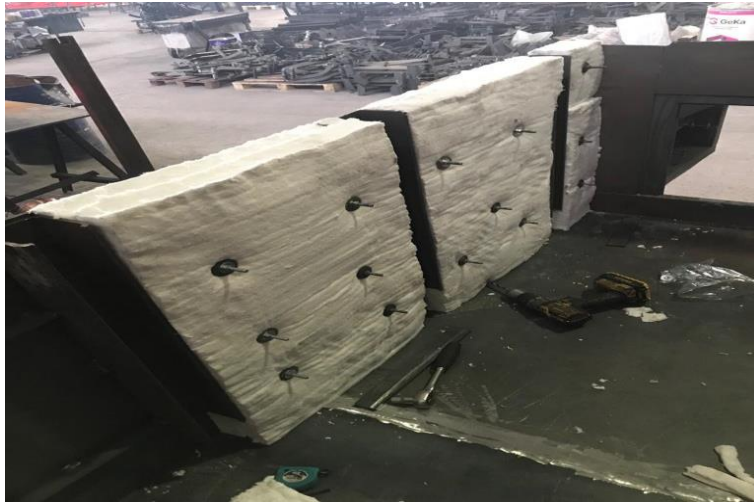
Resim 4.11 Isıl işlem fırını tavanı montaj resmi.



Resim 4.12 Isıl işlem fırını yürüyen tabanı montaj resmi-1.



Resim 4.13 Isıl işlem fırını yürüyen taban montaj resmi-2.



Resim 4.14 Isıl işlem fırını yalıtımı montaj resmi-1.



Resim 4.15 Isıl işlem fırını yalıtımı montaj resmi-2.



Resim 4.16 Isıl işlem fırını yalıtımı montaj resmi-3.



Resim 4.17 Isıl işlem fırını ateş tuğlası montaj resmi.



Resim 4.18 Isıl işlem fırını rezistans teli, rezistans borusu ve rezistans askı tuğlası montaj resmi.



Resim 4.19 Isıl işlem fırını montaj resmi-1.



Resim 4.20 Isıl işlem fırını montaj resmi-2.



Resim 4.21 Isıl işlem fırını montaj resmi-3.



Resim 4.22 Isıl işlem fırını montaj resmi-4.



Resim 4.23 Isıl işlem fırını montaj resmi-5.



Resim 4.24 Isıl işlem fırını montaj resmi-6.



Resim 4.25 Isıl işlem fırını montaj resmi-7.



Resim 4.26 Isıl işlem fırını montaj resmi-8.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

“Metalografik deneyler sonucu oluşturulan algoritmaya göre çalışan tam otomasyonlu ısıtma işlem fırını hesaplamaları, prototip tasarımı ve imalatı” başlıklı yüksek lisans çalışmasında deneysel çalışmalar, makine tasarımı, imalatı ve otomasyonu sonucunda ısıtma homojenizasyon, ısıtma verimlilik ve prosesin tamamen otomatik olması sayesinde kullanım kolaylığı sağlanmıştır.

Bu çalışmada 1000 °C'ye ulaşan ısıtma işlem fırını tasarımı Solidworks programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Otomasyonu PLC ile kontrol edilmektedir. Prototip tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen ısıtma işlem fırınında istenilen sıcaklığı elde etmek için Kanthal A-1 rezistans tel kullanılmıştır. Fırın sıcaklığının algılanabilmesi için fırın içerisine K tipi termokupl yerleştirilmiştir. Termokupldan alınan bilgi PLC ekrandan okunabilmektedir.

İstenilen sıcaklık değeri aşıldığında rezistansların enerjisi kesilmekte istenilen sıcaklık değerinin altına düşüldüğünde rezistanslara enerji verilmektedir. Bu yöntemle fırın istenen sıcaklık değerinde belirlenen süre boyunca sabit kalmaktadır.

Sistem manuel ve otomatik modda kullanılabilmektedir. Manuel modda sıcaklık ve bekleme süresi değerleri girilmektedir. Girilen değerlere göre uygulanacak ısıtma işlem sonrası tahmini sertlik ve çekme dayanımı değerleri ekran üzerinden ön bilgi olarak gösterilecektir. Fırın istenen sıcaklık değerine ulaştığında süre saymaya başlayacak ve bittiğinde rezistansların enerjisi kesilerek sesli uyarı sistemi devreye girecektir. Otomatik modda malzeme cinsi ve kalınlık değeri girildikten sonra uygulanacak ısıtma işlem türü PLC üzerinden seçilerek sistem otomatik olarak sıcaklık ve süre değerlerini belirleyip çalışmaya başlayacaktır.

Manuel moda eklenen açıklama kısmından deneysel çalışmalar sonucu elde edilen mikroyapı analizleri, sertlik ve çekme dayanımı değerleri, ısıtma işlem bilgileri ve kimyasal bileşimlere ulaşılabilir. Bu sayede proses hakkında bilgisi olmayanların bile kullanabileceği bir sistem geliştirilmiştir.

Yapılan deneme testleri sonucunda fırının istenilen şekilde manuel ve otomatik çalıştığı görülmüştür. Tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen ısıtma fırını ölçüleri şu şekildedir:

- Fırın kapalı hali uzunluğu: 2600 mm
- Fırın açık hali uzunluğu: 4600 mm
- Fırın genişliği: 1000 mm
- Fırın yüksekliği: 1600 mm

Fırın izolasyonu her bölge için toplam 150 mm'dir. Fırın yan duvarları, üst duvar ve kapakları 1430 °C sıcaklığa dayanıklı seramik bulk ve board ile kaplanmıştır. Fırın tabanı ise 1430 °C sıcaklığa dayanıklı izole tuğla ile örülmüştür. Fırın içerisindeki sıcaklık 850 °C iken fırın dışında sac kaplamada sıcaklık 35 °C olmaktadır.

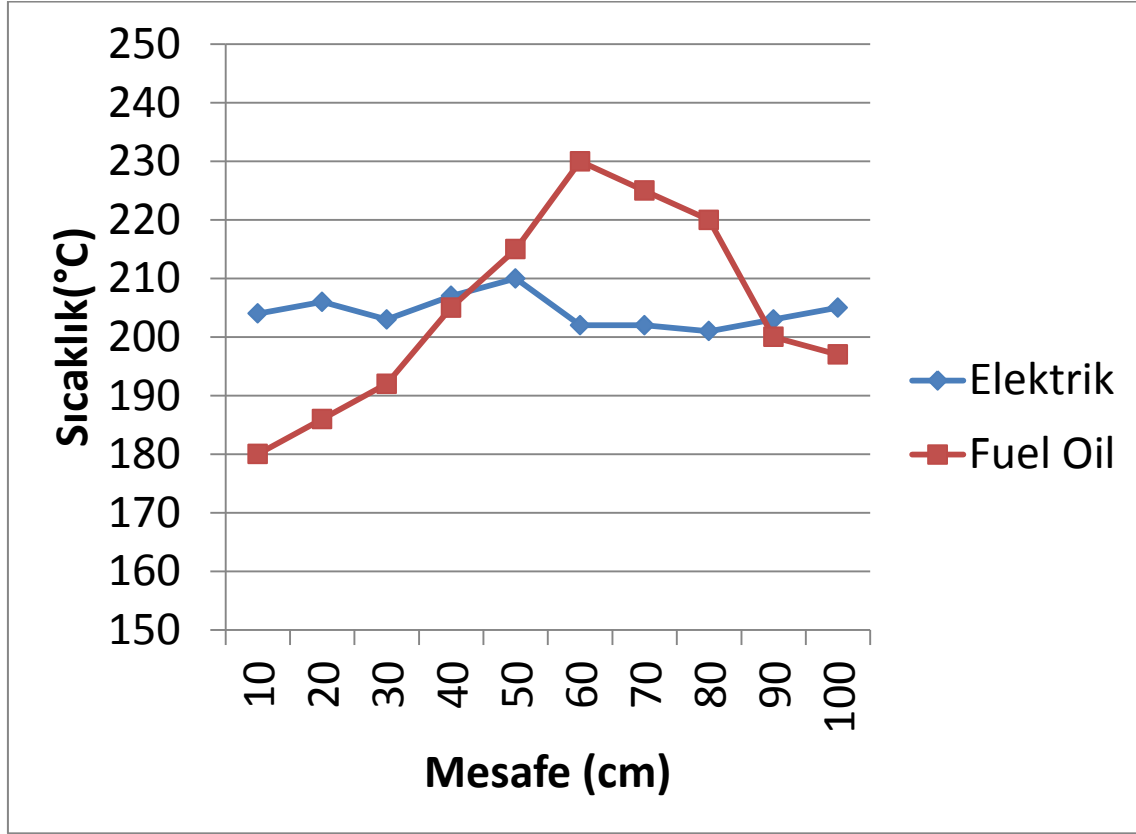
Dış çelik konstrüksiyon 6 mm St 52 sacdan ve takviye lama malzemelerden imal edilmiştir. Malzeme yükleme ve boşaltılması mekanik hareketli olarak ray sistemi üzerinde hareket eden makaralı tekerlekler ile sağlanmıştır. Fırının bakım ve sevkiyat aşamaları göz önüne alınarak, sökülebilir bağlantı elemanı cıvata tercih edilmiştir. Bu şekilde montajın sökülebilir bir bağlantı ile yapılması gereksiz işçilik ve maliyet kayıplarını önlemektedir.

Prototip imalatı gerçekleştirilen ısıtma fırını ve fuel oil yakıtlı ısıtma fırını ısıtma verimlilik kıyaslaması Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Isıtma fırını verim hesabı.

1000 °C'ye ısıtmak gerekli toplam ısı formülü	$Q = m(\text{gr}) \times C_p (\text{cal}/(\text{gr} \cdot ^\circ\text{C})) \times \Delta T(^{\circ}\text{C})$
Isıtma verim	$n_{th} = \frac{W_{net,çıkan}}{Q_h}$
Prototip imalatı gerçekleştirilen ısıtma fırını verim (%)	% 84
Fuel oil yakıtlı ısıtma fırını verim (%)	% 52

80 mm genişliğinde 30 mm kalınlığında 1000 mm uzunluğunda bir çelik malzemenin iki ayrı fırında 20 dakika ısıtma sonrası malzeme yüzeyinden belirli mesafelerde ölçülen sıcaklık değerleri grafikte görülmektedir.



Şekil 5.1 Isıtma sonrası sıcaklık dağılımı.

Prototip imalatı gerçekleştirilen elektrikli ısıtma fırını, fuel oil yakıtlı bir ısıtma fırınıyla kıyaslandığında ısıtmanın fuel oil yakıtlı fırında bölgesel elektrikli fırında ise homojen olduğu görülmüştür.

6. KAYNAKLAR

- Anonim, 1988, Furnace Design Moves Into The Digital Age With Pulse-Firing Burner Technology, Nat. Gas. Ind. Technol., Munich.
- Anonim, 1988, New Heat-Treating Furnace Sets High-Performance Standards, Nat. Gas. Ind. Technol., Munich.
- Atkins M, 1977, Atlas of Continuous Transformation Diagrams for Engineering Steels, Sheffield House, 260p, U.K.
- Callister W D, 2008, Fundamentals of Materials Science and Engineering, Thelning K E (Ed.), Steel and Its Heat Treatment (187-189), Butterworths House, 696p, London.
- Eckstein H J, 1987, Technologie Der Wärmebehandlung Von Stahl, Deutscher Verlag, 363p, Leipzig.
- Ford E, 1922, The New Efficiencies of Anti-Pollutant Furnaces, Thelning K E (Ed.), Steel and Its Heat Treatment (11-12), Butterworths House, 696p, London.
- Geels K, 2007, Metallographic and Materialographic Specimen Preparation, Thelning K E (Ed.), Steel and Its Heat Treatment (245-248), Butterworths House, 696p, London.
- Hibberd D, 1968, Recent Developments in Reheating and Heat-Treatment Furnaces, Thelning K E (Ed.), Steel and Its Heat Treatment (52-58), Butterworths House, 696p, London.
- Krauss G, 1980, Principles of Heat Treatment of Steel, Metals Park House, 256p, Ohio.
- Peter W, Hassdenteufel H, 1967, Aussagefähigkeit Der Stirnabschreckprüfung Und Der Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubildes Für Das Ergebnis Der Hartung Von Rundstaben, Thelning K E (Ed.), Steel and Its Heat Treatment (455-457), Butterworths House, 696p, London.
- Schwartz G C, Hexemer R L, 1995, Designing For Most Effective Electric Element Furnace Operation, Thelning K E (Ed.), Steel and Its Heat Treatment (69-72), Butterworths House, 696p, London.

Samuel L E, 2003, Metallographic Polishing by Mechanical Methods, ASM International, Materials Park House, 122p, Ohio.

Thelning K E, 1984, Steel and Its Heat Treatment, Butterworths Verlag, 696p, London.

Valeria L, Hernan N, 2015, Effect of Carbon Content on Microstructure and Mechanical Properties of Dual Phase Steels, Strnadel B (Ed.), Procedia Materials Science (36-39), Elsevier House, Poland.

Wüning J, 1977, Verfahren Stechnik Des Isotherm Glühens, Thelning K E (Ed.), Steel and Its Heat Treatment (43-49), Butterworths House, 696p, London.

İnternet Kaynakları

1- <http://www.pyramaitre.com>, 07.10.2019

2- <http://www.heatreatfurnaces.com>, 07.10.2019

3- <http://www.afc.holcroft.com>, 07.10.2019

4- <http://www.heatfurnace.com>, 07.10.2019

5- <http://www.can.eng.com>, 07.10.2019

6- <http://www.obg.com>, 07.10.2019

7- <http://cihanbozkurt.com.tr/muhendislikte-tasarim>, 07.10.2019

8- <http://www.hascometal.com/teknik-bilgiler>, 07.10.2019

9- <http://www.dogukancelikhalat.com/urun/kepli-ray-makarasi.html>, 07.10.2019

10- <http://www.izoref.com.tr/seramik-elyaf-izolasyon-urunleri.html>, 07.10.2019

11- <http://www.kalitemetalurji.com.tr/urunlerimiz/imalat-celikleri>, 07.10.2019

12- <http://bumlab.bartın.edu.tr/mekanik-test-labaratuvaryi.html>, 07.10.2019

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mehmet YAVUZ
Doğum Yeri ve Tarihi : Cizre – 05.05.1994
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon / e-posta) : 05448472578 / yavuzmehmet124@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Fatih Anadolu Teknik Lisesi (2008 – 2012)
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, (2012 – 2016)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, (2017 – 2020)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

: Savrukoğlu Ziraat Makinaları (2017 – Devam Ediyor)