

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

NERVÜRLÜ İNŞAAT DEMİRLERİNİN ÜRETİMİNDE
KULLANILAN TEMPCORE PROSESİNİN MALZEMENİN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE OLAN ETKİSİNİN SONLU
ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

AHMET ATİLLA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. FEVZİ BEDİR

TEMMUZ 2024

**T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**NERVÜRLÜ İNŞAAT DEMİRLERİNİN ÜRETİMİNDE
KULLANILAN TEMPCORE PROSESİNİN
MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE OLAN
ETKİSİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
ANALİZİ**

AHMET ATILLA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

DANIŞMAN: PROF. DR. FEVZİ BEDİR

TEMMUZ 2024

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF TEMPCORE PROCESS USED
IN THE PRODUCTION OF RIBBED REBAR ON THE
MECHANICAL PROPERTIES OF THE MATERIAL BY FINITE
ELEMENT METHOD**

AHMET ATILLA

**A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

ADVISOR: PROF. DR. FEVZİ BEDİR

JULY 2024



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 01/07/2024 tarih ve 2024/33 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 09/07/2024 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ahmet ATİLLA'nın tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Fevzi BEDİR

ÜYE : Prof. Dr. Süleyman KARSLI

ÜYE : Prof. Dr. Muhammet KAYFECİ

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

*Mühendisliğime ve hayatıma
büyük katkısı olan tüm Diler
Demir Çelik ailesine,*

*Sevgili eşim Özlem, biricik
kızım Mira, canım Aileme,*

Ve

*Bu süreçte kaybettiğim
Babama...*

ÖZET

Nervürlü inşaat demiri üretim prosesi, belirli kimyasal içerikteki çelik malzemelerin (kütük) haddelenerek, hedeflenen geometrik boyut ve mekanik özelliklerde üretilme sürecidir. Haddelme esnasında mikroyapıdaki tane boyutları belirli bir düzene getirilirken, malzeme geometrisi de aynı anda hedeflenen geometriye getirilerek haddelme sürecinin ilk kısmı tamamlanır. Haddelme sürecinin ikinci kısmı ise üretilen malzemenin hedeflenen mekanik özelliklere sahip olması sürecidir. Üretimi yapılan nervürlü çubukların piyasada satılabilir nihai ürün olabilmeleri için belirli mekanik özelliklere sahip olmalıdır. Bu mekanik özellikler, akma gerilme değeri, süneklilik miktarı, kaynaklanabilirlik kabiliyeti gibi özellikleridir.

Malzemenin mekanik özelliklerinin ayarlanması iki farklı şekilde yapılabilir. Bu yöntemlerden birincisi, çelikhanede üretilen kütüğün kimyasal içeriğinde bulunan mangan, karbon, vanadyum gibi bazı elementlerin oranları ile oynayarak, ikinci diğer yöntem ise daha düşük element içerikli çeliklerin haddelme sonrasına ani soğutma prosesinden (tempcore prosesi) geçirilip, malzeme kesit alanında görülebilecek kontrollü bir faz dağılımı oluşturarak. İkinci yöntem birinci yöntemle göre daha basit, uygulanabilir ve uygun fiyatlı bir çözümdür. Tempcore prosesi ile kontrollü soğutma işlemi uygulayarak üretim yapmak, üretim maliyetleri açısından daha uygun bir proses olduğundan dolayı malzemenin mekanik özellikleri genelde tempcore prosesi ile kazandırılır.

Tempcore prosesi ile üretilen nervürlü çubuk demirlerin kesit alanından bakıldığında görünen faz dağılımları, en dışta martenzit yapı, çekirdekte ferrit + perlit yapı ve bu iki faz arasında geçiş bölgesi olan beynitik yapı görünür. Esas olarak kırılğan ve sert yapı olan martenzit tabakası alanının, toplam yüzey alanına yüzdesel oranı akma gerilimini belirleyici bir faktördür.

Bu çalışma Diler Demir Çelik Endüstri ve Tic. A.Ş. Dilovası tesislerinde, S220-Mn diye tabir edilen CARES B500B kalitesine sahip, %0,23 C, %1,23 Mn ve diğer yan elementleri içeren yüksek Mangan içerikli 150x150 mm kütükler kullanılmıştır. Haddelme ve tempcore prosesi içerisinde bilinçli ve kontrollü bir şekilde, suya maruz kalma süresi, su basıncı, su debisi gibi parametreler değiştirilerek Ø14, Ø20 ve Ø26 mm malzeme ebadı için farklı şartlarda numuneler alınmış ve deney numunelerinin çekme testleri yapılmış, çekme testlerinde meydana gelen boyca uzamaları belirlenmiş, kesit alan görsellerinin mikroyapıları gözlemlenmiş, çekirdekten yüzeye sertlik dağılımı incelenmiştir. Her numune ayrıca optik mikroskop altında incelenmiş, mikroskop görüntüleri AutoCAD LT 2024 programına atılmış ve martenzit hacim oranları belirlenmiştir. Bu şekilde deneysel veriler elde edilmiştir.

Gerçekleşen deneysel numuneler ile testler bu şekilde tamamlanıp, martenzit hacim oranlarının bulunması için, her numunedeki değişken parametreler sanal ortamda sonlu elemanlar analizi yöntemi ile ANSYS 2024/R1 simüle edilmiştir. Deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçları birbirleri ile örtüşürülmüş %90,88 uyum gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tempcore Prosesi, Martenzit Hacim Oranı, Nervürlü Çelik Çubuklar, İnşaat Demiri, Sıcak Haddelme, Sonlu Elemanlar Analizi

ABSTRACT

The ribbed rebar production process is the process of rolling steel materials (billets) with specific chemical content and producing them in targeted geometric dimensions and mechanical properties. While the grain sizes in the microstructure are brought to a certain order during rolling, the material geometry is simultaneously brought to the targeted geometry and the first part of the rolling process is completed. The second part of the rolling process is the process of ensuring that the produced material has the targeted mechanical properties. The produced ribbed bars must have certain mechanical properties in order to be a marketable product. These properties are the yield stress value, ductility amount, weldability, etc.

Adjusting the mechanical properties of the material can be done in two different ways. The first of these methods is by changing the ratios of some elements such as manganese, carbon, vanadium in the chemical content of the billet produced in the steel mill, and the second method is by passing steels with lower element content through a sudden cooling process (tempcore process) after rolling, creating a controlled phase distribution that can be seen in the material cross-sectional area. The second method is a simpler, more applicable and affordable solution compared to the first method. Since production by applying controlled cooling process with Tempcore process is a more suitable process in terms of production costs, the mechanical properties of the material are generally gained with Tempcore process.

When looking from the cross-sectional area of ribbed bar irons produced with Tempcore process, the visible phase distributions are martensite structure in the outermost, ferrite + pearlite structure in the core and bainitic structure which is the transition region between these two phases. The percentage ratio of the martensite layer area, which is essentially a brittle and hard structure, to the total surface area is a determining factor for the yield stress.

In this study, 150x150 mm billets with high manganese content containing 0.23% C, 1.23% Mn and other side elements, called S220-Mn, were used in Diler Demir Çelik Endüstri ve Tic. A.Ş. Dilovası facilities. In the rolling and tempcore process, in a conscious and controlled manner, by changing the parameters such as water exposure time, water pressure, water flow rate, samples were taken for Ø14, Ø20 and Ø26 mm material sizes under different conditions and tensile tests of the experimental samples were performed, the longitudinal elongations in the tensile tests were determined, the microstructures of the cross-sectional area images were observed, the hardness distribution from the core to the surface was examined. Each sample was also examined under an optical microscope, the microscope images were transferred to the AutoCAD LT 2024 program and the martensite volume ratios were determined. In this way, the experimental data were obtained.

The tests were completed with the realized experimental samples in this way, and in order to find the martensite volume ratios, the variable parameters in each sample were simulated in the virtual environment with the finite element analysis method ANSYS 2024/R1. The experimental results and simulation results were matched with each other and 90.88% agreement was observed.

Keywords: Tempcore Proses, Martensitic Volume Ratio, Ribbed Bars, Rebars
Hot Rolling, Finite Element Method

TEŞEKKÜR

Başta, yardım ve destekleri ile sürekli teşvik ederek, yüksek lisans programımda bana yol gösteren hocam Prof. Dr. Fevzi Bedir'e,

Desteklerini bir an olsun esirgemeyen, beni bu süreç boyunca inandıran ve teşvik eden biricik eşim Özlem Atilla ile moral ve motivasyon kaynağım canım kızım Mira Atilla'ya, bu günlere gelmemdeki en büyük emektarlar olan annem ve babama

Bilimin ve bilginin yüceliğine olan inancı ile fabrikamız içerisinde yapmış olduğumuz tüm çalışmalara müsaade etmesiyle, vizyonu ile bizlere kattığı değerle en büyük destek ve motivasyonu sağlayan Diler Demir Çelik Fabrika Müdürümüz Sn. Bülent Yıldırım'a,

Yaşamış olduğum bu yoğun dönem içerisinde anlayışlı ve cesaretlendirici tutumları için sevgili müdürüm, Haddehane Makine Bakım Müdürü Sn. Nejat Bayraktar'a,

Deneysel çalışmalarımın emeği geçen Diler Demir Çelik çalışanlarından Haddehane İşletme Şefi Sn. Gökhan Bilgili 'ye ve Mühendisi Sn. Erdem Kara'ya,

Haddeciliği tüm temelleri ile teorik ve pratik olarak bize her detayı ile anlatan, bizleri bir hadde işletmecisi gibi yetiştiren geçmiş dönemde birlikte çalıştığımız eski müdürüm Sn. Talat Demiroğlu'na,

Deneysel numunelerimin tüm test ve analizlerinde büyük katkısı olan Diler Demir Çelik Filmaşın Üretim Tesisleri Kalite Kontrol Birimi Müdürü Sn. Sedat Tarakçı'ya ve Şefi Sn. Çağkan Eraydın'a,

Tüm bu süreçte iş yükümü hafifleterek bana zaman ve fırsat yaratan Haddehane Makine Bakım mühendisi arkadaşlarım Sn. Ali Serkan Ağaçayak, Sn. Aziz Eren Göğçe ve Sn. Mustafa Çınar'a,

Sürecin en başından sonuna kadar, her yardıma ihtiyaç duyduğumda bana fırsat yaratan, bilgi ve birikimleri ile büyük katkıda bulunan, ufuk açıcı söylemleri ile takıldığım noktalarda beni ayağa kaldıran, bilime inanan ve bilime kıymet veren Diler Demir Çelik Kıdemli Kalite Kontrol Müdürü Sn. Hüsam Baştuğ'a

Teşekkürlerimle...

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
2. NERVÜRLÜ İNŞAAT DEMİRİ ÜRETİM SÜRECİ	3
2.1. Nervürlü İnşaat Demiri	3
2.2. Çelikhane Üretim Prosesi	4
2.3. Haddehane Üretim Prosesi	6
2.3.1. Haddeleme Prosesi	6
2.3.1.1. Soğuk Haddeleme	8
2.3.1.2. Sıcak Haddeleme	9
2.3.2. Tempcore Prosesi	11
2.3.2.1. Birinci Aşama	11
2.3.2.2. İkinci Aşama	12
2.3.2.3. Üçüncü Aşama	13
3. TEMPCORE PROSESİ TEMEL MEKANİZMALARI	15
3.1. Nervürlü İnşaat Demirlerinin Mekanik Özellikleri	17
3.1.1. Martenzit Hacim Yüzdesi (P_M)	17
3.1.1.1. CCT Eğrileri	18
3.1.1.2. Martenzit Yapı	19
3.1.1.3. Martenzit Yapı Başlangıç Sıcaklığı	21
3.1.1.4. Çelik Çubuktaki Isı İletkenliğini Oluşturan Faktörler ve Bunların Martenzit Hacim Yüzdesine Etkisi	22
3.1.1.4.1. Haddelemeden Gelen Faktörler	24
3.1.1.4.2. Tempcore Su Soğutma Kutusundan Gelen Faktörler	27
3.1.1.4.3. Kimyasal Kompozisyon Kaynaklı Termal Faktörler	28
3.1.2. Martenzit Tabakanın Akma Değeri (σ_M)	29
3.1.3. Çekirdekdeki Ferrit+Perlit Akma Değeri (σ_{fp})	31
3.1.4. Malzemenin Çekme Gerilmesi (σ_c)	33
3.1.5. Malzemenin Akma Gerilmesi (σ_a)	34
3.2. Nervürlü İnşaat Demirlerinin Üretiminde Isı Transfer Mekanizmaları	35
4. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	39
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	44
5.1. Deney Numunelerinin Oluşturulması	44
5.2. Deney Numunelerinin Testleri ve İncelemeleri	46

5.2.1. Numune Hazırlama Süreci	46
5.2.2. Akma ve Çekme Mukavemet Testleri	47
5.2.3. Çekirdekten Yüzeye Sertlik Dağılımları	49
5.2.4. Deney Numuneleri Üzerinden Martenzit Hacim Yüzdelерinin Hesaplanması	53
5.2.5. Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri	57
5.3. Haddeleme Parametrelerinin Martenzit Hacim Oranına Etkilerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi	64
5.3.1. Haddeleme Parametrelerine göre Toplam Ortalama Taşınım Katsayısının Matematiksel Hesaplama Modülünün Oluşturulması	65
5.3.2. ANSYS Programı Termal Analizleri	67
5.3.3. Martenzit Başlangıç Sıcaklık Değerinin Teorik Hesaplaması	68
5.3.4. ANSYS Analiz Sonuçlarının AutoCAD Programında İşlenerek DeneySEL Sonuçlar ile Karşılaştırılması	69
6. SONUÇLAR VE YORUMLAR	77
7. ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	83
TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR	84

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

C	: Karbon Elementi
Mn	: Mangan Elementi
V	: Vanadyum Elementi
N	: Azot Elementi
Ni	: Nikel Elementi
Si	: Silisyum Elementi
Mo	: Molibden Elementi
Cu	: Bakır Elementi
Cr	: Krom Elementi
P	: Fosfor Elementi
$^{\circ}C$	: Santigrat derece (Sıcaklık Ölçü Birimi)
M_S	: Martenzit Başlangıç Sıcaklığı
M_F	: Martenzit Bitiş Sıcaklığı
HB	: Brinell Sertlik Sembolü
HRC	: Rockwell C Sertlik Sembolü
CCT	: Sürekli Soğutma Eğrileri
T_0	: Çelik Çubukların Soğutma Kutusuna İlk Giriş Sıcaklığı
d	: Çubuk Çapı
t	: Su Verme Süresi
P_M	: Martenzitin Hacim Yüzdesi
σ_M	: Martenzit Tabakanın Akma Değerleri
σ_{fp}	: Çekirdeklerdeki Ferrit+Perlit Akma Değeri
σ_{φ}	: Malzemenin Çekme Gerilmesi
σ_a	: Malzemenin Akma Gerilmesi
r_m	: Martenzit Sınır Çapı
φ	: Isı Akış Yoğunluğu
α	: Isı Transfer Katsayısı
T_b	: Çubuğun Yüzey Sıcaklığı
T_w	: Soğutma Suyunun Sıcaklığı
D^*	: Doldurma Katsayısı
D	: Soğutma Suyu Borusu İç Çapı
f_{α}	: Ferrit Hacmi Fraksiyonu
f_p	: Perlit Hacmi Fraksiyonu
d_{α}	: Tane Çapı
H_V	: Malzemenin Toplam Sertliği
H_M	: Martenzit Tabaka Sertliği
H_B	: Beynit Tabaka Sertliği
H_{FP}	: Ferrit+Perlit Tabaka Sertliği
V_M	: Martenzit Hacim Fraksiyonu
V_B	: Beynit Hacim Fraksiyonu
V_{FP}	: Ferrit+Perlit Hacim Fraksiyonu
n	: Deformasyon Sertleşme Katsayısı
E_{sistem}	: Sistem Enerjisi
Q_{giren}	: Giren Isı

$Q_{\text{çıkan}}$	: Çıkan Isı
q_{iletim}	: İletim Isı Akısı
$q_{\text{taşınım}}$	: Taşınım Isı Akısı
$q_{\text{ışınım}}$	: Işınım Isı Akısı
k	: Termal İletkenlik
$\bar{h}$	: Toplam Ortalama Taşınım katsayısı
A	: Alan
σ	: Stefan-Boltzmann Sabiti
ε	: Emisivite
ρ	: Yoğunluk
C_p	: Özgül Isıl Kapasite
Re	: Reynolds Sayısı
Pr	: Prandtl Sayısı
D_h	: Soğutma Suyu Borusu İçerisindeki Sıvının Çapı
k_w	: Suyun Termal İletkenliği
p	: Islak Çevre
R_c	: Su Soğutma Borusunun İç Çapı
R_b	: Malzemenin Çapı
V_{su}	: Nozul İçindeki Suyun Hızı
$V_{\text{çubuk}}$	: Nozul İçindeki Çubuğun Hızı
$V_{\text{bağlı}}$	: Bağlı Hız
ρ_{su}	: Suyun Özgül Isısı
ν	: Suyun Dinamik Viskozitesi
$Q_{\text{her bir nozzledaki su debisi}}$	: Her Bir Nozuldaki Su Debisi
$Q_{\text{tempcore toplam su debisi}}$	: Tempcore Prosesine Verilen Toplam Su Debisi
AGT	: En Yüksek Kuvvet Altında Gerçekleşen Göreceli Toplam Boyca Uzama Miktarı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1:	Elektrik ark ocaklı bir çelikhane ile bütünleşmiş çalışan bir haddehanenin üretim proses şeması. 5
Şekil 2.2:	Haddeleme esnasında tanelerin gelişimi. 8
Şekil 2.3:	Soğuk haddeleme esnasında tane boyutlarının uzaması. 9
Şekil 2.4:	Sıcak haddeleme esnasında tane boyutlarının uzaması. 10
Şekil 2.5:	Tempcore birinci aşamasında malzemenin kesit alanındaki faz dağılımı görseli. 12
Şekil 2.6:	Tempcore ikinci aşamasında malzemenin kesit alanındaki faz dağılımı görseli. 13
Şekil 2.7:	Tempcore üçüncü aşamasında malzemenin kesit alanındaki faz dağılımı görseli. 13
Şekil 2.8:	Tempcore prosesi genel görseli. 14
Şekil 3.1:	Tempcore proses parametreleri ve etkileri. 15
Şekil 3.2:	Temperlenmiş çubuk kesit alanındaki çap çizgileri. 18
Şekil 3.3:	Ø19 mm çapındaki bir numunenin çekirdekten yüzeye soğuma eğrileri ile CCT diyagramının birlikte gösterildiği grafik. 19
Şekil 3.4:	Tempcore su soğutma kutusu içerisinde toplam ortalama taşınım katsayısının yüzey sıcaklığı ile olan grafiği. 23
Şekil 3.5:	Izgara platformunda toplam ortalama taşınım katsayısının yüzey sıcaklığı ile olan grafiği. 24
Şekil 3.6:	Doldurma katsayısı – su verme süresi grafiği. 26
Şekil 3.7:	Farklı çap ve giriş sıcaklıklarında martenzit hacim yüzdesi – su verme süresi grafiği. 27
Şekil 3.8:	Su debisinin akma mukavemetine etkisi grafiği. 28
Şekil 3.9:	Çubuk çapına bağlı olarak, su verme süresinin temperleme sıcaklığına etkisi grafiği. 30
Şekil 3.10:	Merkezden çubuğa belirli mesafelerde sıcaklık zaman eğrilerinin CCT diyagramı ile grafiği 32
Şekil 5.1:	a) Struers-Cito Press 1 bakalite alma cihazı. b) Struers-Cito Press 1 bakalit işlemi sonucu. c) Struers-Tegramin 25 zımparalama ve parlatma makinesi. d) Struers-Tegramin 25 parlatma işlemi. e) Struers-Labatom 5 hassas numune kesme makinesi. 47
Şekil 5.2:	a) Zwick/ROELL Z1600 çekme cihazı. b) Numune çekme testi öncesi. c) Numune çekme testi sonrası. d) AGT ölçümü. 48
Şekil 5.3:	a) EMCO test Vickers sertlik ölçüm cihazı. b) Sertlik ölçme anı. 49
Şekil 5.4:	a) Ø14mm-1 sertlik dağılımı. b) Ø14mm-2 sertlik dağılımı. c) Ø14mm-3 sertlik dağılımı. d) Ø14mm-4 sertlik dağılımı. 50
Şekil 5.5:	a) Ø20mm-1 sertlik dağılımı. b) Ø20mm-2 sertlik dağılımı. c) Ø20mm-3 sertlik dağılımı. d) Ø20mm-4 sertlik dağılımı. 51
Şekil 5.6:	a) Ø26mm-1 sertlik dağılımı. b) Ø26mm-2 sertlik dağılımı. c) Ø26mm-3 sertlik dağılımı. d) Ø26mm-4 sertlik dağılımı. 52

Şekil 5.7:	a) Ø14mm-1 bakalit numunesi. b) Ø14mm-2 bakalit numunesi. c) Ø14mm-3 bakalit numunesi. d) Ø14mm-4 bakalit numunesi.	54
Şekil 5.8:	a) Ø14mm-1 martenzit hacim yüzdesi. b) Ø14mm-2 martenzit hacim yüzdesi. c) Ø14mm-3 martenzit hacim yüzdesi. d) Ø14mm- martenzit hacim yüzdesi.	54
Şekil 5.9:	a) Ø20mm-1 bakalit numunesi. b) Ø20mm-2 bakalit numunesi. c) Ø20mm-3 bakalit numunesi. d) Ø20mm-4 bakalit numunesi.	55
Şekil 5.10:	a) Ø20mm-1 martenzit hacim yüzdesi. b) Ø20mm-2 martenzit hacim yüzdesi. c) Ø20mm-3 martenzit hacim yüzdesi. d) Ø20mm- martenzit hacim yüzdesi.	55
Şekil 5.11:	a) Ø26mm-1 bakalit numunesi. b) Ø26mm-2 bakalit numunesi. c) Ø26mm-3 bakalit numunesi. d) Ø26mm-4 bakalit numunesi.	56
Şekil 5.12:	a) Ø26mm-1 martenzit hacim yüzdesi. b) Ø26mm-2 martenzit hacim yüzdesi. c) Ø26mm-3 martenzit hacim yüzdesi. d) Ø26mm- martenzit hacim yüzdesi.	56
Şekil 5.13:	Olympus BX51M ve Clemex kamera.	57
Şekil 5.14:	a) Ø14mm-1 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø14mm-1 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø14mm-1 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.	58
Şekil 5.15:	a) Ø14mm-2 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø14mm-2 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø14mm-2 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.	58
Şekil 5.16:	a) Ø14mm-3 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø14mm-3 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø14mm-3 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.	59
Şekil 5.17:	a) Ø14mm-4 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø14mm-4 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø14mm-4 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.	59
Şekil 5.18:	a) Ø20mm-1 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø20mm-1 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø20mm-1 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.	60
Şekil 5.19:	a) Ø20mm-2 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø20mm-2 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø20mm-2 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.	60
Şekil 5.20:	a) Ø20mm-3 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø20mm-3 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø20mm-3 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.	61
Şekil 5.21:	a) Ø20mm-4 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø20mm-4 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø20mm-4 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.	61

Şekil 5.22:	a) Ø26mm-1 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø26mm-1 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø26mm-1 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.	62
Şekil 5.23:	a) Ø26mm-2 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø26mm-2 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø26mm-2 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.	62
Şekil 5.24:	a) Ø26mm-3 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø26mm-3 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø26mm-3 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.	63
Şekil 5.25:	a) Ø26mm-4 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø26mm-4 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø26mm-4 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.	63
Şekil 5.26:	Ø14mm-4 numunesi için h hesaplanmasının yapıldığı Excel hesaplaması.	66
Şekil 5.27:	ANSYS Programı hesaplama yöntemi görseli.	67
Şekil 5.28:	Martenzit Başlangıç Sıcaklığı hesaplama.	69
Şekil 5.29:	a) Ø14mm-1 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø14mm-1 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø14mm-1 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.	70
Şekil 5.30:	a) Ø14mm-2 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø14mm-2 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø14mm-2 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.	70
Şekil 5.31:	a) Ø14mm-3 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø14mm-3 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø14mm-3 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.	71
Şekil 5.32:	a) Ø14mm-4 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø14mm-4 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø14mm-4 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.	71
Şekil 5.33:	a) Ø20mm-1 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø20mm-1 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø20mm-1 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.	72
Şekil 5.34:	a) Ø20mm-2 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø20mm-2 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø20mm-2 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.	72

Şekil 5.35:	a) Ø20mm-3 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø20mm-3 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø20mm-3 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.	73
Şekil 5.36:	a) Ø20mm-4 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø20mm-4 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø20mm-4 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.	73
Şekil 5.37:	a) Ø26mm-1 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø26mm-1 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø26mm-1 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.	74
Şekil 5.38:	a) Ø26mm-2 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø26mm-2 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø26mm-2 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.	74
Şekil 5.39:	a) Ø26mm-3 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø26mm-3 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø26mm-3 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.	75
Şekil 5.40:	a) Ø26mm-4 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø26mm-4 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø26mm-4 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.	75

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 5.1: Deney numunelerinin oluşturulduğu parametreler	45
Tablo 5.2: Numunelerin akma, çekme testleri ve AGT sonuçları	49
Tablo 5.3: Deney numunelerinin hesaplanan martenzit hacim oranları	53
Tablo 5.4: Deney numunelerinin hesaplanan toplam ortalama taşınım katsayıları	67
Tablo 5.5: S220-Mn kimyasal analiz tablosu	68
Tablo 5.6: Deneysel sonuçlar ile ANSYS analizleri sonuçları karşılaştırmalı tablosu	76

1. GİRİŞ

Çelik, demirin düşük oranlarda karbonla alaşımlanmasıyla oluşan bir malzemedir. Son yıllarda, karbon oranının azaltılması ve etkili elementlerle alaşımlanmasıyla çeliğin tanımı değişmiştir. Ana bileşeni demir olan çelik, çeşitli elementlerle alaşımlanır. Çelik üretimi için doğal kaynak olarak kullanılan demir cevherleri, insanlık tarihinin başlangıcından beri kullanılmaktadır. Günümüzde, üretilen çeliğin büyük bir kısmı bu cevherlerden elde edilmektedir. İnşaat sektöründe, yüksek akma gerilmeleri yanında süneklik ve kaynak edilebilirlik gibi özellikler aranmaktadır. Geleneksel üretim yöntemleriyle elde edilen inşaat çeliklerinde, yüksek akma gerilmesi sağlanırken süneklik ve kaynak edilebilirlik sınırlıdır. Bu nedenle, yeni yöntemler araştırılmaktadır. "Tempcore Prosesi" adı verilen bir yöntem, bu üç özelliği aynı anda sağlamak için geliştirilmiştir. Bu proses, sıcak haddeleme sonrası çeliğin hızla soğutulması ve temperlenmesiyle oluşur [1].

Ülkemizdeki 1999 yılının 17 Ağustos ve 12 Kasım depremlerinin ardından, sağlam ve kaliteli inşaatların önemi daha da vurgulanmıştır. Kaliteli ve sağlam yapılar için önemli bir faktör, nitelikli nervürlü inşaat çeliğinin kullanımıdır. Tempcore yöntemi, düşük oranlı kimyasal elementlerin bileşiminden oluşan inşaat demirlerine yüksek maliyetli alaşım elementleri eklenmesine ihtiyaç duymadan su verilerek martenzit tabaka oluşturur, bu da malzeme kesitinin çap görüntüsünde dış katmanda sertlik ve çekirdek bölgesinde ise yumuşaklık sağlar. Bu malzemenin en büyük avantajı, dışarıda sert ve içeride yumuşak olması ve yüksek akma mukavemetine sahiptir. Bu teknoloji özellikle 1999 yılında ülkemizde gerçekleşen depremlerden sonra standartlara eklenmiş olsa bile 1990 yılının başlarından beri ülkemizde kullanılmaktadır [2].

Tempcore süreci, ilk endüstriyel uygulamasından bu yana, düşük C/Mn çelik kullanarak maliyetli V veya Nb ilavesine gerek olmadan yüksek mukavemetli ve kaynaklanabilir betonarme çubuklar üretmek için tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. Bu süreç, sıcak haddeleme tesisine doğrudan bağlanır ve üç aşamadan oluşur: söndürme, temperleme ve çekirdeğin dönüşümü. Sürecin doğru uygulanabilmesi için, özel tasarlanmış bir Tempcore işlemi gereklidir. Tempcore işlemi süreci ile su verme ve akabinde kendinden tavlama süreci sonucunda yüksek mukavemetli nervürlü inşaat demirleri üretilmektedir.

Nervürlü inşaat demirlerinde yüksek akma dayanımı aranır ancak yüksek karbon içeriği kaynaklanabilirliği olumsuz etkileyebilir, bu nedenle düşük karbon içeriği önemlidir. Geleneksel yöntemlerle düşük karbon içerikli çubuklar üretmek zor ve maliyetlidir, bu nedenle Tempcore sistemi tercih edilir. Bu sistemde, çubuklar sıcak haddelenir ve ardından Tempcore soğutma kutularında ani soğutma ile dış yüzeyinde martenzit tabakası oluşturulur. Martenzitin temperlenme süreci, Tempcore'dan martenzit olarak çıkan kabuk kısmın, hala sıcak olan çekirdek kısım tarafından ve soğutma platformunda yan yana gelen çubukların ısısı ile sağlanır. Bu sayede, çubukların dış yüzeyde temperlenmiş martenzit, çekirdek ise ferrit+perlit yapı oluşur. Ayrıca ferrit+perlit yapı ile martenzit yapı arasında bir beynit yapıda oluşur. Bu faz dönüşümleri sayesinde malzemede mekanik özellikler karakter kazanır. Bu proses, çelik çubuklarda mukavemeti arttırmak için uygulanan bir ısıl işlemdir [3].

2. NERVÜRLÜ İNŞAAT DEMİRİ ÜRETİM SÜRECİ

2.1. Nervürlü İnşaat Demiri

İnşaat demiri, inşaat sektöründe kullanılan ve betonarme yapıların yapımında temel bir yapı malzemesi olan özel bir çelik ürünüdür. Betonarme yapılar, beton ve çelik kombinasyonuyla yapılan dayanıklı ve sağlam yapılar olarak bilinir. İnşaat demiri, betonarme yapıların çelik donatı elemanları olarak kullanılarak yapıların dayanıklılığını artırır.

Ülkemizde özellikle 1999 yılında meydana gelen deprem felaketi öncesinde betonarme yapılar ile ilgili standartlar iyi değildi. Bu yıllarda inşaat demirleri düz yuvarlak malzeme olarak üretilmekte ve hatta üretilen malzemenin, mukavemet bilgileri, esnekliği, korozyon direnci, kaynaklanabilirliği göz ardı edilmekteydi. Yaşanan felaket neticesinde ülkemiz bu konuda kendini geliştirmiş ve artık üretilen her inşaat demirinin standartlar dahilinde olmasını sağlamıştır.

Bu standartları yakalamak adına yapılan iki önemli iyileştirme dikkat çekmektedir. Bunlardan ilki düz ve pürüzsüz çapta üretilen inşaat demirleri yerine artık nervür diye tabir edilen, demir dış yüzeyinde oluşturulan çıkıntıların eklenmesi ile malzeme geometrisinde yapılan iyileştirme. Bu iyileştirme sayesinde nervürlü inşaat demiri ile beton birbirine daha iyi tutunmakta ve oluşan beton-demir kompozit yapısı daha sağlam ve güvenilir bir hal almıştır. Diğer iyileştirme ise malzemenin mekanik özelliklerinin kontrol altına alınması. Üretilen malzemenin mekanik özellikleri, haddeleme prosesine eklenen Tempcore prosesi ile kontrol altına tutulmaktadır. Sıcak üretilen inşaat demirinin son şeklini aldığı ve sistemi belirli bir sıcaklıkta terk ettiği anda belli bir süre ile belli su basıncı ve debisi ile ani soğutarak malzemenin içyapısında bir düzen sağlanmaktadır.

Üretilen nervürlü inşaat demirleri belli başlı testlerden geçirilerek standartların belirlediği aralıklarda mekanik ve geometrik özelliklerde olup olmadıkları noktasında bir kalite ve kontrol sürecinden geçirilerek satışa hazır hale getirilir.

2.2. Çelikhane Üretim Prosesi

Haddeleme prosesinde ilk ihtiyaç duyulan ürün kütük diye tabir edilen çelik bloklardır. Kütükler haddeleme sürecinde elde edilecek nihai ürünün ham maddesidir ve dolayısı ile oldukça kritiktir. Nihai ürün olan nervürlü inşaat demiri oluştuktan sonra istenen mekanik özelliklere sahip olması için üretilen kütüklerin kimyasal kompozisyonları önem arz etmektedir.

Çelik, temel olarak demirin karbonla düşük oranlarda alaşımlanmasıyla oluşan bir malzemedir. Ancak, son yıllardaki ilerlemeler, karbon oranının azaltılması ve çeşitli etkili elementlerin eklenmesiyle yeni çelik türlerinin üretilmesine olanak sağlamıştır. Bu durum, çeliğin tanımında bir değişime neden olmuştur. Çelik, demirin çeşitli elementlerle alaşımlanmasıyla elde edilir. Ana bileşeni demir olan çelik, doğal olarak yeryüzünde bulunan ve ekonomik değerde demir mineralleri içeren demir cevherlerinden elde edilir. İnsanlık, ilk çeliği bu cevherlerden üretmiştir ve günümüzde üretilen çeliğin büyük bir kısmı hala bu kaynaklardan elde edilmektedir [1].

Çelik doğada bulunan demir cevherinden elde edilir. Doğadaki ham halinde oksit hidroksit ve karbonat gibi elementlerle karışıktır. Ham haldeki demirin çeliğe dönüşmesi için zararlı elementlerin belirli oranlarda uzaklaştırılmalı ve yerine farklı elementlerin eklenmelidir. Çeliğin oluşabilmesi fazlasının zararlı olduğu elementler fosfor, arsenik, bakır, azot, kükürt gibi elementlerdir. Eklenen yararlı elementler ise manganez, krom, silisyum ve molibden gibi elementlerdir. Bu elementlerden silisyum, krom ve manganez üretilen çeliğin mukavemetini arttırırken molibden yüksek sıcaklıklara dayanımını arttırır. Aynı zamanda manganez mukavemetin yanı sıra çeliğin sıcakta işlenebilirlik kabiliyetini arttırmaktadır.

Tüm bunların yanında karbon elementinin, çelik ağırlığı içerisindeki yüzdesi çok önemlidir. Çelik içindeki karbon miktarı 17:1000 oranını aşarsa çelik oldukça zor işlenir. Çelik üretimi esnasında karbon bu oranlarda dengede tutulmaya çalışılırken fosfor ve kükürt oranının da 1:1000 altında olması hedeflenir. Çelik yapısının oluşmasında fazlasının zararlı olduğu fosfor çeliği kırılganlaştırırken kükürt ise yüksek sıcaklıklarda daha gevrek bir yapıda olmasına sebep olur.

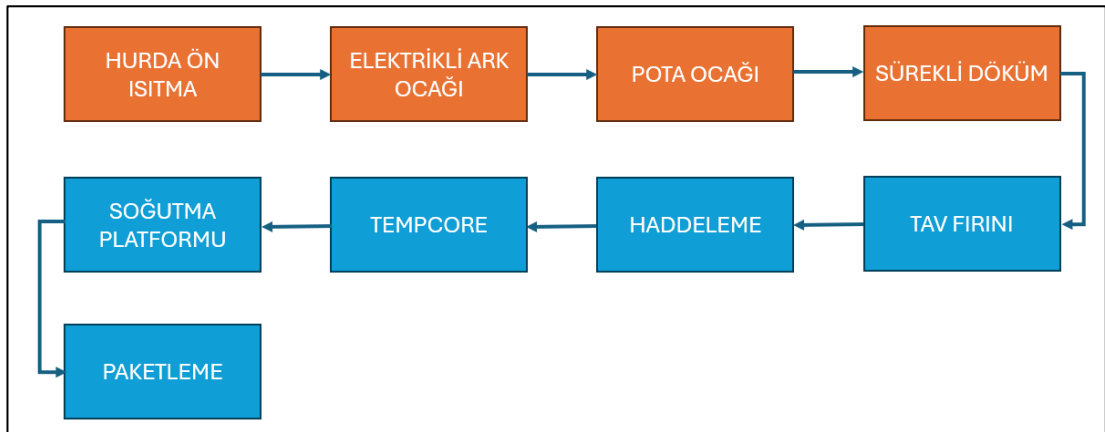
Çelik üretimi iki temel yöntemle gerçekleştirilir: Yüksek Fırın yardımıyla cevherden çelik üretimi ve Ark Ocakları ile hurdadan çelik üretimi. Yüksek fırın yöntemi, yüksek

bir yatırım maliyetine sahip olduğundan dünya çelik üretiminde daha az tercih edilirken, elektrik ark ocakları yöntemi daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik ark ocağında üretilen çeliklerde, istenmeyen miktarlardaki kükürt ve fosfor ilk aşamada uzaklaştırılmaz, bu nedenle çelik, pota ocağı metalürjisi adı verilen ikinci bir işlemde geçirilir ve burada eriyik içerisinde katılan kireç ile bazik cüruf oluşturulur. Bu sayede karbon miktarı istenen çelik türüne göre ayarlanabilir ve eriyik içerisinde hem büyük miktarda fosfor uzaklaştırılır hem de manganez ve silisyum elementleri okside edilir [5].

Günümüzde hurdanın çeliğe geri dönüşümü için en yaygın kullanılan proses, elektrik ark ocağı prosesidir. Son teknolojilerle birlikte, elektrik ark ocakları dünya çelik üretiminde %30'lara kadar varan bir paya ulaşmıştır, çünkü ilk yatırım maliyetleri düşük ve işletme prosesi daha basittir. Türkiye'de ise bu oran %75'in üzerindedir [4].

Çelikhane üretilen bu çelikler haddeme prosesinin ham maddesi olduğundan dolayı çelikhane üretiminden yarı mamul olarak çıkmaktadır. Bu yarı mamuller, istenen mamullerin çelik türüne, kalite standartlarına ve kullanım amaçlarına göre üretim sürecinden geçer, kimyasal bileşenleri de bu bağlamda ayarlanır.

Elektrik ark ocaklı tesislerin haddehane ile direkt olarak çalışılan üretim prosesi **Şekil 2.1** 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Elektrik ark ocaklı bir çelikhane ile bütünleşmiş çalışan bir haddehanenin üretim proses şeması.

2.3. Haddehane Üretim Prosesi

2.3.1. Haddeleme Prosesi

Metal malzemelerin nihai ürün olabilmeleri adına yaygın olarak karşılan plastik şekil verme yöntemlerinden birisi de haddeleme prosesidir.

Günümüzde plastik deformasyonla şekillendirilen malzemelerin büyük çoğunluğu haddeleme ile şekillendirilmektedir, bu oran %95'e kadar ulaşmaktadır [1].

Haddeleme; çeliğin, giriş kesiti ve çıkış kesiti farklı olmak kaidesi ile aynı hızda fakat zıt yönde dönen iki merdane arasından geçirilerek, plastik deformasyona maruz kalması durumudur.

Alt ve üst merdanelerin birbirleri arasındaki açıklık ölçüsü, haddelenen malzemenin kesit kalınlığından daha az olacağı için malzemenin çıkış ölçüsü, merdaneler arası ölçü kadar olacaktır. Haddeleme genellikle tek kuvvetle sağlanan radyal basınç etkisi ile malzemeyi plastik şekil değişimine uğratan bir mekanik işlemdir. Haddeleme esnasında malzemenin maruz kaldığı kuvvetlerden dolayı metalurjik yapısında da değişimler meydana gelir.

Malzemedede gerçekleşen plastik şekil değişimi, merdanelerin uyguladığı radyal basınç etkisi ile malzeme – merdaneler arasında sürtünme etkisinden kaynaklı oluşan yüzey kayma gerilmeleri ile sağlanır. Sürtünme etkisinin bir önemli etki ettiği nokta da malzemenin merdaneler arasındaki ilerlemesini sağlamasıdır [1].

Haddeleme esnasında malzemenin merdanelerden çıktığı andaki kesitin yükseklik ölçüsü, girdiği andaki kesitin yükseklik ölçüsünden küçük olduğundan dolayı malzeme hem enine hem de boyuna uzamaya maruz kalacaktır. Buna “yayılma” denir.

Yayılma kontrollü veya serbest yayılma olarak iki ayrılır.

Yayılma alt ve üst merdaneler yüzeyinde bırakılan kalibreler ile kontrol altında tutularak yapılırsa kontrollü, kalibre şekli verilmeden düz iki merdane arasından geçirilerek haddelenirse ise serbest yayılma adını alır [3].

Plastik şekil değişimi işlemlerinin hangi yöntem ile yapılacağına bağlı olarak, yeniden kristalleşme prosesi önem arz eder. Yeniden kristalleşme prosesi, bir malzemenin yapısal olarak içyapısındaki tanelerin yeniden kristalleşerek, kafes yapıların yeniden düzenlenmesidir.

Yeniden kristalleşme genellikle aşağıdaki koşullar altında gerçekleşir:

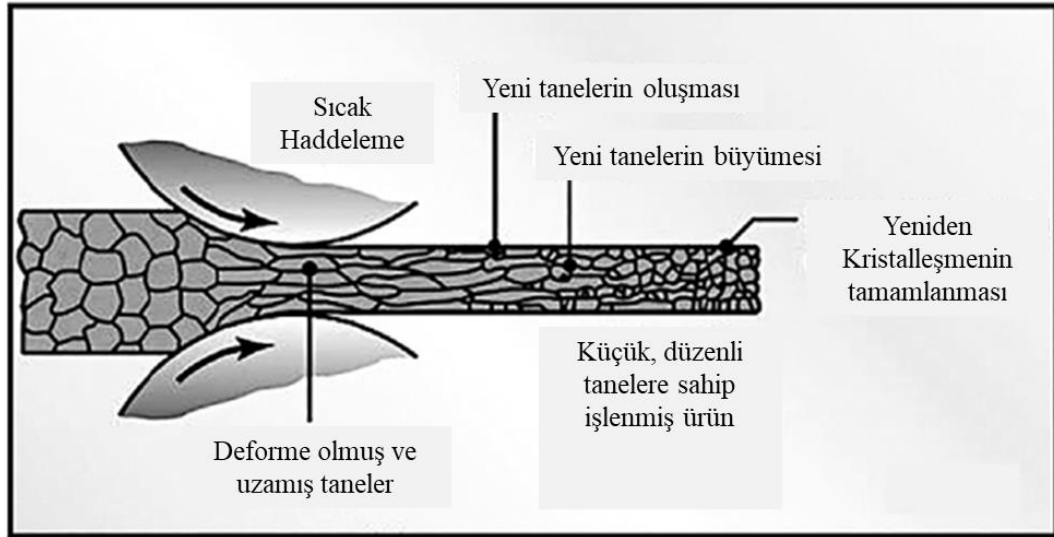
- **Isıl İşlem:** Yüksek sıcaklıklarda veya belirli bir sıcaklık aralığında gerçekleştirilen ısıt işlemler, malzemenin atomik yapılarının yeniden düzenlenmesine neden olur. Bu işlem sırasında, malzeme kristal taneleri büyür ve yeniden şekillenir.
- **Soğutma:** Malzemenin hızlı veya yavaş soğutulması, kristal yapıların yeniden düzenlenmesine yol açabilir. Özellikle, hızlı soğutma işlemleri sırasında, malzemenin içsel yapıları belirli bir düzenlilikten sapar ve yeni kristal yapılar oluşur.
- **Mekanik Deformasyon:** Malzemenin mekanik olarak şekillendirilmesi veya deformasyonu, kristal yapıların yeniden düzenlenmesine neden olabilir. Bu, malzemenin içsel gerilmelerini azaltır ve kristal tanelerinin boyutunu veya şeklini değiştirir.

Yeniden kristalleşme süreci, malzemenin mekanik, termal veya kimyasal özelliklerini etkiler. Bu süreçte, malzemenin içindeki kafes kusurları giderilir ve malzeme daha homojen bir yapıya kavuşabilir. Özellikle haddelemede, yeniden kristalleşme işlemi malzemenin işlenebilirliğini artırır, iç gerilmeleri azaltır ve malzemenin mukavemetini veya dayanıklılığına doğrudan etki eder.

Yeniden kristalleştirme, malzeme plastik şekil değişimine uğramadan evvel, ergime sıcaklığının %40'ına yakın altında bir değerde uygulanan bir termal işlemidir. Malzemenin cinsine göre yeniden kristalleşme sıcaklık noktası da değişim gösterebilir. Örneğin kalay, kurşun, çinko gibi malzemeler oda sıcaklığında bile yeniden kristalleşme sıcaklığındayken çelik için tav fırınlarına ihtiyaç vardır [6].

Malzemenin içyapısındaki tane yapılarının herhangi bir kuvvet altında kalmadan kafes yapısının herhangi bir yönelimde olmadığı duruma izotropi denir. Malzeme üzerine uygulanan ve plastik şekil değişimine neden olan bir kuvvete maruz kaldığında kuvvet yönüne bağlı olarak yaşadığı şekil değişimine ise anizotropi denir.

Haddeleme tanımı da bir başka deyişle; bir çeliğin döner iki merdane arasında belirli yükler altında kesit daralmasına maruz bırakılarak içyapısında izotropik kafes yapılarının anizotropik kafes yapılarına dönüştürüldüğü plastik şekil verme prosesidir. Bu durum **Şekil 2.2**'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Haddelerme esnasında tanelerin gelişimi [24].

Haddelerme prosesi özelinde yeniden kristalleşme sıcaklığı göz önüne alındığında iki çeşit haddelerme vardır. Bunlar yeniden kristalleşme sıcaklığı üzerinde gerçekleşen prosesler için Sıcak Haddelerme ve yeniden kristalleşme sıcaklığı altında gerçekleşen prosesler için ise Soğuk Haddelermedir [1].

2.3.1.1. Soğuk Haddelerme

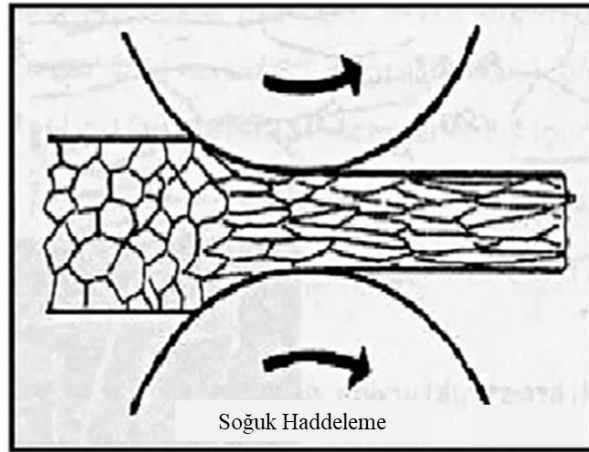
Soğuk haddelerme, yeniden kristalleşme sıcaklığı altında gerçekleştirilen bir plastik şekil verme yöntemidir [6].

Soğuk haddelerme prosesi, daha öncesinden sıcak haddelerme ile üretilmiş bir yarı mamul ürünün, proses öncesinde yüzey temizleme işleminden geçmesi ile başlar. Yüzey temizleme işlemi genelde asitle yapılır. Bu sayede yarı mamul üretim öncesi üstün yüzey niteliklerine ve daha hassas üretime hazır olur [7].

Soğuk haddelerme ile üretilen ürünler, sıcak haddelenen ürünlere nispeten daha düzgün geometride ve çap toleranslardadır. Soğuk haddelerme prosesinde de sıcak haddelermede olduğu gibi giren ürün ile çıkan ürünün kesiti farklıdır. Haddelerme esnasında kesit daralır fakat malzemenin boyu uzar. Bu işlem diğer plastik şekil verme proseslerinden olan dövme ve basma proseslerin benzeri fakat bu süreçlerden farklı olarak belirli periyotlarda kuvvet altında bırakılarak değil sürekli olarak kuvvet uygulanarak yapılan bir plastik şekil verme sürecidir. Soğuk haddelerme sayesinde,

normal döküm ile üretilen çeliklere oranla malzemenin içyapısında daha ince taneli ve sıkı bir yapı elde edilerek malzemenin metalurjik içyapısı düzenlenir [6].

Soğuk haddelemede malzeme içyapısındaki tane boyutlarının uzayıp düzene sokulduğu ile alakalı durum **Şekil 2.3**'te gösterilmiştir.



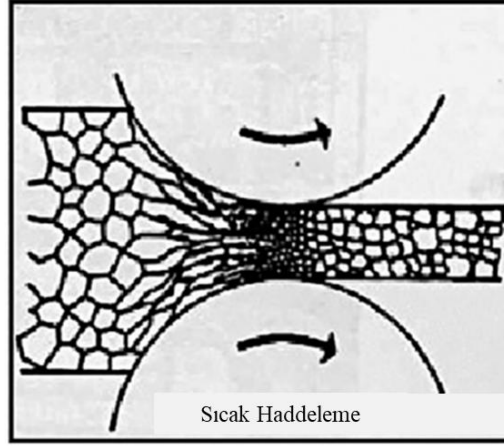
Şekil 2.3: Soğuk haddeleme esnasında tane boyutlarının uzaması [24].

2.3.1.2.Sıcak Haddeleme

Sıcak haddeleme yeniden kristalleşme sıcaklığı üzerinde, belirli yükler altında bırakılarak döner iki merdane arasından geçen çelik malzemelerin, kesitlerinin daraltılıp, boylarını uzatmak sureti ile tane yapılarının uzatılıp küçültülerek uygulanan bir plastik şekil verme prosedir.

Sıcak haddeleme işlemi öncesi, çelik kütüklerin akma gerilmelerinin düşürülmesi ve plastik şekil değişimi işleminin kolaylaştırılabilmesi için kütükler belli bir sıcaklığa kadar çıkarılması gerekmektedir. Bu sayede haddeleme esnasında ihtiyaç duyulan haddeleme kuvvetleri ve merdanelerin döndürme momentleri gibi parametreler daha kontrol edilebilir ve hesaplanabilir olur.

Sıcak haddeleme esnasında bir çelik malzemede ortalama tane boyutu, hadde merdanesine girmeden öncesine göre daha büyük boyuttadır. Haddeleme esnasında merdaneler arasından geçerken tane boyları uzar. Sonrasında taneler yeniden oluşur ve gelişir. Süreç tamamlandığında yeniden kristalleşme olur. Oluşan bu yeni taneler, haddeleme öncesindeki tanelerden daha küçük ve kararlı bir yapıdadır. Bu tanelerin şekil değişimleri **Şekil 2.4**'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Sıcak haddeleme esnasında tane boyutlarının uzaması [24].

Sıcak haddeleme prosesinde, proses başlangıcının girdi ürünü olan kütük diye adlandırılan çelik malzemelerin tav fırınlarında tavlanması ile başlar.

Çelikhanede üretilen çelik kütükler, sürekli döküm prosesi esnasında üzerine su tutulmaktadır. Bu aşamaya kadar sıvı yapıda gelen çelik ani bir soğutmaya maruz kalarak katılaşır. Katılaşma esnası çok kısa sürede olduğundan kafes yapıları düzene girerken kafes yapılarının içerisindeki atomlar olması gereken noktalara gidemez. Bu da kafes yapıları arasında gerilmelere sebep olur.

Tavlama hadisesi, endüstriyel proseslerde çeliğin kapalı bir ortamda, tavlama derecesine oran ile ayarlanan belirli basınç altında, belirli bir sıcaklığa çıkarılıp bir süre o sıcaklıkta tutulması ile gerçekleşir. Tav fırınlarında gerçekleşen bu hadisede amaç; kafes yapılarının arasındaki gerilmelerin azaltılması, kafes yapılarının değiştirilmesi, homojenize edilmesi ve kafes yapıları içerisindeki atomların olması gereken yerlere tavlandığı süreç içerisinde yerleşebilmesini sağlamaktır.

Tavlama esnasında kütük içerisindeki hacim merkezli kübik yapı, yüzey merkezli kübik yapıya çevrilir.

Çelik içerisinde bu homojenizasyonun sağlanabilmesi için çelik içerisindeki faz östenit faza dönmüş olur. Yani bir başka deyim ile fırına girmeden önce faz yapısı karmaşık olan kütükler sıvı faz öncesi son faz olan östenit fazda tutularak normalize edilir. Bu işlem 900 °C ila 1300 °C derece arasında gerçekleşir.

Tüm bu yapılan işlemler normalizasyon tavlaması olarak da adlandırılan bir ısıtma işlemidir. Özetle normalizasyon tavlaması, çeliğin homojen bir mikroyapıya sahip olmasını sağlamak ve iç gerilmeleri gidermek amacıyla yapılır.

2.3.2. Tempcore Prosesi

Tempcore kelimesi, köken olarak iki İngilizce kelimenin birleşiminden oluşmaktadır. Bunlar “menevişleme” manasında kullanılan, İngilizce “tempering” kelimesinin ilk dört harfi olan “temp” ve çekirdek manasında kullanılan “core” kelimesinin birleştirilmesi ile oluşmuştur [3].

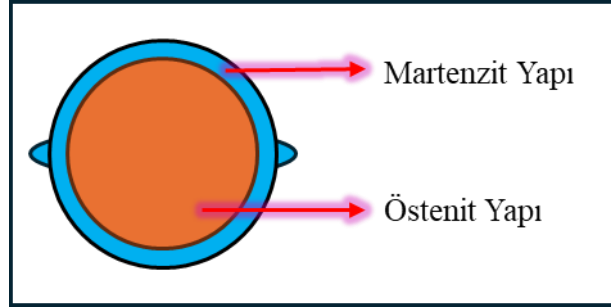
Tempcore kelimesi de adından belli olduğu üzere çekirdekten gelen menivşleme olayıdır. Yani tempcore su soğutma kutusu içerisine ortalama 1000 °C sıcaklık ile gelen nervürlü inşaat demirlerinin dış yüzeyleri yüksek basınç altında kısa süreli ve ani olarak soğutulduktan sonra dış yüzey sıcaklığı aniden düşer fakat çekirdek kısmında o denli soğutmaya yetmez. Dolayısı ile çekirdek sıcaklığı yüksektir. Malzeme tempcore su soğutma kutusunu terk ettiğinde, malzeme soğutma ızgarasına doğru hareket eder. Bu esnada çekirdekteki sıcaklık yüzeye doğru ilerlemeye başlar. Soğutma ızgarasında ise artık malzeme kendi halinde yavaşça soğumaya ve dış yüzey ile çekirdek sıcaklıkları bir denge sıcaklığına ulaşır. Tempcore prosesinin tamamlanması üç aşamadan oluşur;

2.3.2.1. Birinci Aşama

Bu aşamada sıcak haddelenen ve artık uygun geometrik ölçülerine ulaşan nervürlü demir çubuklar, yaklaşık 1000 oC sıcaklık ile tempcore su soğutma kutularına giriş yaparlar. Burada basınçlı su, aniden ve belirli süre içinde giden malzeme üzerine uygulanır. Dış yüzey sıcaklığı bu kısa süre içerisinde ani soğutma ile martenzit başlangıç sıcaklığına hızlı bir şekilde indirilmeye çalışılır. Martenzit başlangıç sıcaklığı istenen martenzit tabaka kalınlığına göre değişkenlik gösterebilir. Bu sıcaklık en az 200 oC’ye kadar düşürülebilir. Daha ince bir martenzit tabaka istenir ise martenzit başlangıç sıcaklığı daha yukarılarda tutulmalıdır.

Hadde finiş tezgahından çıkıp buraya giren malzemenin fazı, girdiği anda östenittir. Su verme işlemi bu proseste tamamlandıktan sonra kabuk olarak da nitelendirilen dış yüzeyde proses parametrelerine göre kalınlığı değişkenlik gösteren bir martenzit tabaka oluşur. Martenzit tabakanın bittiği yerden çekirdeğe kadar olan kısımda ise

östenit faz gözlemlenir. Yani tempcore prosesi içerisinde çıkan nervürlü çelik çubuklarda iki farklı faz gözlemlenir. Bu iç içe olan yapı **Şekil 2.5**'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Tempcore birinci aşamasında malzemenin kesit alanındaki faz dağılımı görseli.

2.3.2.2. İkinci Aşama

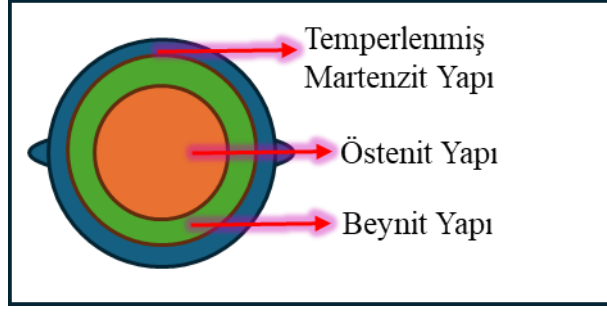
Tempcore su soğutma kutusunda ilk faz dönüşümünü yaşayan çelik çubuklar, tempcore su soğutma kutusundan çıktı anda hava ile temasa başlar. Bu tempcore prosesinin ikinci aşamasının başlangıcıdır. Bu aşamanın süreci tempcore su kutusundan malzemenin ayrılmasından ızgara soğutma platformuna girdiği ana kadardır.

İkinci aşamada sıcaklık olarak soğuk kabuk kısım, sıcak olan çekirdek kısmı ile ısı alışverişine başlar. Çekirdek kısmındaki sıcaklık çok yüksek olduğundan dolayı ısı transferi çekirdekten kabuğa doğru olacak şekilde başlar. Bu durumda kabuk kısmı ani soğutulduktan sonra iletim yoluyla tekrardan ısıtılmış olur.

Sonuç olarak ilk durumda oluşan ve yüksek akma değerlerinde olan martenzit tabaka, östenit olan çekirdekten gelen ısı iletimi ile bir nevi kendi kendini temperleyerek süneklilik de kazanmış olur.

İkinci aşama, çubuk yüzeyindeki sıcaklık temperlenme sıcaklığından geçtiği anda son bulmuş olarak kabul edilir. İkinci aşamanın süreci, çubuk çapına ve birinci aşamada uygulanan soğutma koşullarına bağlı olarak ilerler.

İkinci aşama sırasında malzemenin kabuk kısmındaki martenzit tabaka ile dönüşmemiş östenit sınırında temperleme etkisi ile bir geçiş fazı olarak kabul edilen beynit yapı oluşabilir [8].



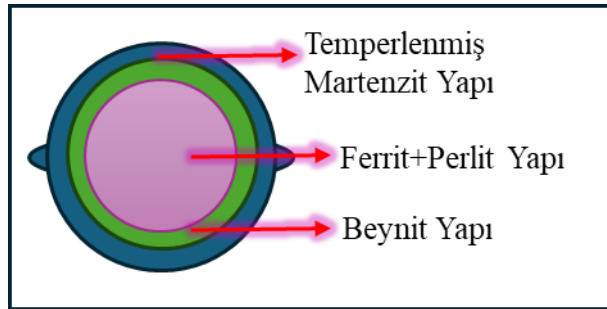
Şekil 2.6: Tempcore ikinci aşamasında malzemenin kesit alanındaki faz dağılımı görseli.

2.3.2.3. Üçüncü Aşama

Bu aşama, malzemenin tempcore su soğutma kutusundan ayrılıp ızgara sistemine düştükten sonra başlayan süreçtir. İkinci aşamadaki malzeme kesitinde oluşan temperlenmiş martenzit, beynit ve kalan östenit fazlarından, östenit fazının izotermal dönüşümler ile ferrit+perlit veya ferrit+perlit fazının yanında bir miktar daha beynit oluşturduğu aşamadır.

Bu aşamanın sürecinde malzeme artık tüm denge sıcaklıklarına ulaşır ve ortam ısısı ile dengelenir.

Malzeme kesitinde oluşan durum **Şekil 2.7**'de gösterilmiştir.

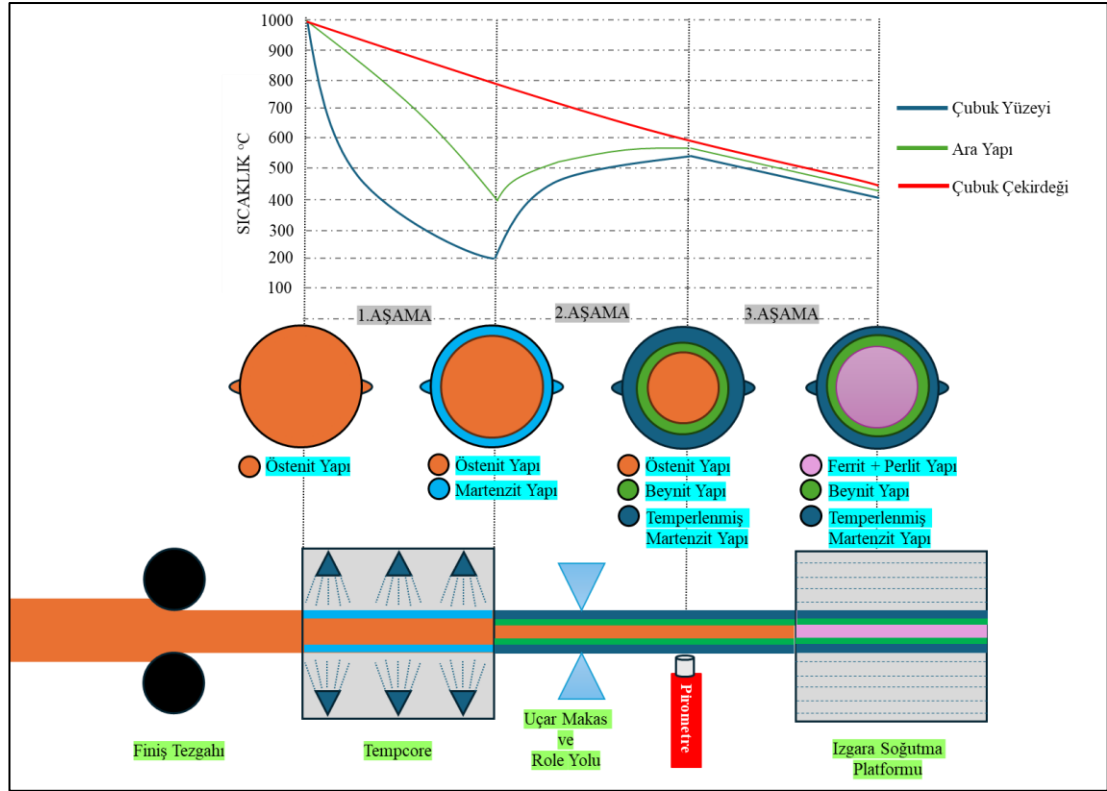


Şekil 2.7: Tempcore üçüncü aşamasında malzemenin kesit alanındaki faz dağılımı görseli.

Tüm bu bilgiler ışığında tempcore prosesinin üç aşaması özetle;

1. Çubuğun kabuk kısmı ve çevresi arasındaki ısı iletimi
2. Çubuk içerisinde kabuk ve çekirdek kısmı arasındaki ısı iletimi
3. Malzeme içyapısının nihai halini alması [1].

Nervürlü inşaat demiri üretiminde, tempcore prosesi ile ilgili olarak; malzemedeki faz dönüşümlerinin hangi aşamada geldiğinin çekirdekten yüzeye soğuma eğrileri ile görselleştirilmesi **Şekil 2.8**'de verilmiştir [9].



Şekil 2.8: Tempcore prosesi genel görseli [9].

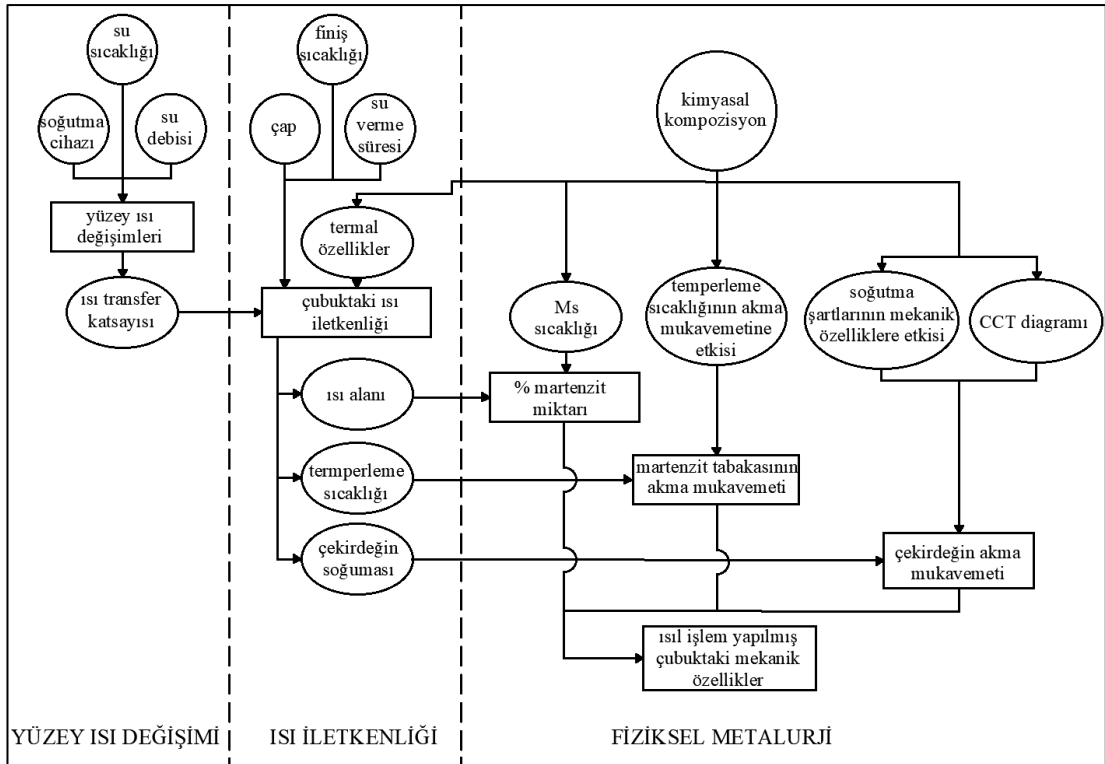
3. TEMPCORE PROSESİ TEMEL MEKANİZMALARI

Tempcore prosesi sayesinde, kimyasal kompozisyonunda gereksiz elementlerin kullanımını azaltarak, kontrollü su verme işlemi ile üretilecek olan nervürlü inşaat demirinin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve kontrol edilmesi amaçlanmaktadır.

Kontrollü su verme prosesi ile ilgili olarak üç temel mekanizma öne sürülebilir. Bunlar;

- Yüzey ısı değişimleri
- Isı iletkenliği
- Fiziksel metalurji

Bu proses kontrol mekanizmasında proses parametreleri ve etkileri Şekil 3.1’de gösterilmiştir [10].



Şekil 3.1: Tempcore proses parametreleri ve etkileri [10].

Bu parametrelerden sadece üç tanesi haddehane kumanda operatörü tarafından kontrol edilebilir parametrelerdir. Bunlar;

- Su debisi
- Su verme süresi
- Nihai sıcaklık

Tempcore prosesi içerisinde, kontrollü su soğutma kutusu (tempcore su kutusu) ile yapılan işlem birinci aşamayı ifade eder. Bu aşamada ısı transferi çubuk yüzeyinden (kabuk) çekirdeğe doğru gerçekleşir.

Bu ısı transferi esnasında gerçekleşen faz dönüşümleri aslında malzemenin mekanik özelliklerine direk olarak etki eden bir durumdur. Faz dönüşümlerini iki ana alan altında inceleyebiliriz. Bunlar; kabuk bölgesinde önce martenzit olarak oluşup sonradan temperlenmiş martenzite dönen alan ile öncesinde östenitik yapıda kalıp sonradan ferrit+perlit yapıya dönen çekirdek alanıdır. Dolayısı ile malzemenin de mekanik özellikleri üç faktöre bağlı kalır;

- Martenzitin kesit alanındaki yüzdesel oranı (hacim oranı)
- Martenzit tabakanın gerilme özellikleri
- Sonrasında ferrit+perlit yapıda olacak olan çekirdek kısmının gerilme özellikleri [10].

3.1. Nervürlü İnşaat Demirlerinin Mekanik Özellikleri

Nervürlü inşaat demirinin üretimi esnasında tempcore prosesi sayesinde malzemenin mekanik özelliklerinde iyileştirmeler sağlanmaktadır. Özellikle inşaat demirinde bazı mekanik özelliklerin önemi vardır. Bu mekanik özellikler başlıca şu şekildedir;

- Sertlik
- Sertleştirilebilirlik
- Kaynaklanabilirlik

Bu özelliklerin iyileşebilmesi ve kontrol edilmesi ile ilgili ilişkiler Şekil 3.1’de verilmiştir. Daha öncesinde de bahsedildiği üzere mekanik özelliklerin iyileştirilebilmesi ve kontrol edilebilmesi için aşağıdaki yapılara odaklanacağız.

- Martenzitin hacim yüzdesi (P_M)
- Martenzit tabakanın akma değerleri (σ_M)
- Çekirdekdeki ferrit+perlit akma değeri (σ_{fp}) [10]

3.1.1. Martenzit Hacim Yüzdesi (P_M)

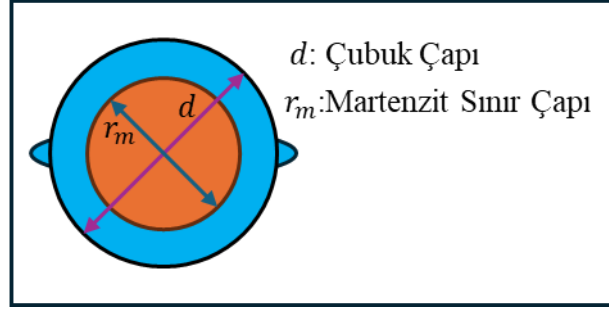
Martenzitin hacim oranı aslında kesit alanından bakıldığında, dışta oluşan martenzit çemberin, toplam daire kesitine olan yüzdesel oranını ifade eder.

Martenzit hacim yüzdesi, su verme süresi (t), çubuk çapı (d), çelik çubukların soğutma kutusuna ilk giriş sıcaklığı (T_0) ve martenzit başlangıç sıcaklığının (M_S) bir fonksiyonudur. Bu değerlere bağlıdır. Dolayısı ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir [10];

$$P_M = f(t, d, T_0, M_S) \quad (3.1)$$

Aynı zamanda martenzit alanı çubuk alanı üzerindeki gösterimi Şekil 3.2’deki gibi ifade edecek olursak şu şekilde de bir ampirik formül üretilebilir [10];

$$P_M = 100 \times \left[1 - \left(\frac{r_m}{d} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$



Şekil 3.2: Temperlenmiş çubuk kesit alanındaki çap çizgileri.

3.1.1.1. CCT Eğrileri

Martenzit ne olduğu ve nasıl oluştuğu hususunu incelemeden evvel, çelik içerisindeki faz dönüşümlerini esas alan tempcore prosesinde sıklıkla karşımıza çıkacak olan “Sürekli Soğuma Süresince Dönüşüm Eğrileri” (CCT eğrileri) tarif ve tanımlamasını yapmak faydalı olacaktır. Çünkü martenzit yapısını incelerken bu eğrilerin bahsi sıklıkla geçecektir [1].

Sürekli soğutma eğrileri, genellikle bir malzemenin belirli bir sıcaklıktan başlayarak soğutulması ve birim zamanda belirli dereceler düşülerek faz dönüşümünün başladığı ve bittiği eğrileri gösterir ve sonucunda elde edilen mikroyapı üzerindeki etkisini gösteren grafiklerdir. Genel manada bir malzemenin içyapısında oluşabilecek fazları kontrollü soğutarak istenen yapının elde edilmesinde kullanılır.

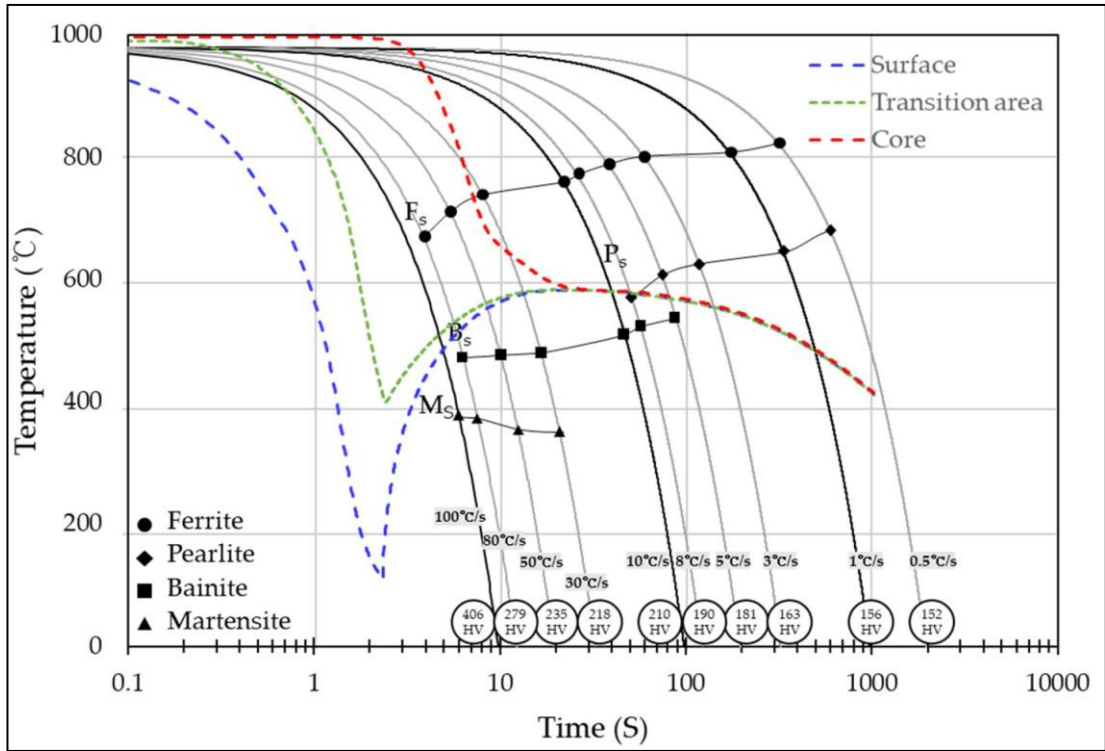
CCT diyagramlarındaki temel faktörler şunlardır;

- **Sıcaklık:** Sürekli soğutma eğrileri genellikle yüksek sıcaklıklardan başlar. Bu sıcaklıkta malzeme genellikle östenit fazdadır. Sonrasında hangi fazın kaç derece sıcaklıkta başladığı bilgileri kritik değerlerdir.
- **Soğutma hızı:** Bir saniye içerisinde kaç °C sıcaklık düştüğünün göstergesidir. Özetle; çelik çubuğun belirli bir sıcaklıktan başlayarak odası sıcaklığına kadar soğutulması için harcanan zaman. Bu sayede soğutma ortamına ne kadar hızlı geçildiği gözlemlenebilir. Daha hızlı soğutma, genellikle daha fazla sertlik ve kırılgenlik anlamına gelir.
- **Faz değişimleri:** Sürekli soğutma eğrilerinde genellikle faz değişimlerini görmek mümkündür. Örneğin, çelikte martenzit, ferrit, perlit, beynit gibi fazlar grafik üzerinden yorumlanabilir. Malzemenin nihai mikroyapısında, hangi fazların olacağı bu grafikten yola çıkılarak ayarlanabilir. Bu ayar mekanizması

malzemeyi soğutma hızı ve malzemenin ilk sıcaklığına bağlı olarak gerçekleşir. Bu grafiğe göre yapılan kontrollü soğutma prosedürü ile malzemenin içyapısındaki fazların hacimsel yoğunluğu tahmin edilebilir.

Yani, sürekli soğutma eğrileri, malzemenin ısı işlem sürecini anlamak ve optimize etmek için önemli araçlardır. Bu eğrileri yorumlamak, malzemenin istenen özelliklere ulaşmasını sağlamak için kritiktir.

Choi ve ark. 2022 yılında Ø19 mm çapındaki bir numunenin tempcore prosesi ile üretilmesi esnasındaki proses şartlarını bir simülatör programında işleyerek **Şekil 3.3**'teki gibi CCT diyagramı oluşturmuş ve bunun üzerinde de numunenin çekirdek, geçiş bölgesi ve yüzeydeki soğuma eğrilerini yerleştirmiştir.



Şekil 3.3: Ø19 mm çapındaki bir numunenin çekirdekten yüzeye soğuma eğrileri ile CCT diyagramının birlikte gösterildiği grafik [14].

3.1.1.2. Martenzit Yapı

Martenzit, çelik içerisindeki metalurjik fazlardan en sert olanıdır. Adını Alman metalurji uzmanı Adolf Martens' ten almıştır.

Martenzit, sıcak çeliğin aniden ve yüksek hızda soğutulmasıyla oluşan bir yapıdır. Yaklaşık 200-250° C sıcaklıklarda oluşur. Tavlanmış ve östenit fazda olan çeliğin, su verilmesi sonucunda karbonla doymuş olan martenzit fazına dönüşür. Martenzitin sertliği, perlitik çeliğin sertliğinden daha yüksektir ve ısıya bağlı olarak 700 Brinell'e kadar ulaşabilir.

Martenzit, demir-karbon faz diyagramında yer almaz çünkü bir denge fazı değildir. Denge fazları, yavaş soğutma hızlarıyla oluşurken, martenzit çok hızlı soğutma hızlarıyla elde edilir. Martenzitin iğne benzeri mikroyapısı, malzemenin kırılgan davranışına neden olur. Aşırı miktarda martenzit çeliği kırılgan yapı özelliği kazandırırken, hacimsel olarak martenzit azaldıkça ise çelikteki kırılganlık azalır. Yani çeliklerin içyapısında aşırı miktarda martenzit istenmeyen gevrekliğe yol açabilirken, çok azı ise malzemenin fazla sünek olmasına neden olabilir [11].

Martenzit yapının kendi kendini temperlemesi esnasında, temperleme olayının da kontrol edilmesi ile martenzit yapısı yeniden şekillendirilebilir. Normal bir süreçle, kendi kendine temperlendiğinde yapı temperlenmiş martenzite döner.

Fakat özel prosesler ile oluşan martenzit yapı temperlemesi kontrol edilirse farklı yapılar da görülebilir. Bu yapılar martenzitin farklı sıcaklarda tavlanması ile oluşur ve sorbit, beynit, trostit isimlerini alır.

- **Sorbit:** Martenzitin 400° C'nin üzerinde tavlanması ile de elde edilebilir. Yüksek sıcaklıklarda hızlı soğutulmuş martenzit yapı, daha sonra düşük sıcaklıklarda ısıtılma tabi tutulduğunda sorbit oluşur. Ferrit ve sementitin çok ince ve tanesiz bir karışımıdır. Mikroskop altında ince perlit olarak da tanımlanabilir. Bu işlem, martenzit yapıyı yumuşatmak, çelikteki aşırı sertliği azaltmak ve istenilen mekanik özellikleri sağlamak için kullanılır. Sertliği 250 HB civarındadır.
- **Beynit:** Kendi kendini temperleme süreci ile elde edilen bu yapının sertliği perlit ve martenzit yapıların arasında olup, 40-60 HRC arasında değişir. Beynit yapılar genelde çeliğin mukavemet ve tokluk değerlerinin yüksek olması istendiğinde elde edilmeye çalışılır. Beynitik çelikler, özellikle, yaylar, tarım araçları, segman, çanak, çayır bıçağı gibi aletlerin üretiminde kullanılırlar.
- **Trostit:** Trostit, genellikle yüksek karbonlu çeliklerin hızla soğutulmasının ardından, özellikle kafes yapısı içerisinde yüksek karbon içeren bölgelerde

oluşur. Martenzitin 250° C sıcaklıkta tavlanması ile de elde edilebilir. Ferrit ve sementitin tanesiz ince karışımıdır. Sertliği 400 HB civarındadır. Trostit, mikroyapı içinde daha koyu ve yoğun görünür ve genellikle martenzit yapıdaki taneler arasında belirginleşir [13].

3.1.1.3. Martenzit Yapı Başlangıç Sıcaklığı

Martenzitik reaksiyon, östenitin martenzit başlangıç sıcaklığına (M_S) ulaştığında başlar. Soğutma hızı arttıkça martenzitin miktarı artar ve çelik daha sert hale gelir. Martenzitin yapısal özellikleri, çelikteki karbon miktarına bağlı olarak çeşitlilik gösterir [11].

Şekil 3.1'de de görülebileceği üzere martenzit başlangıç sıcaklığı, üretilecek çeliğin kimyasal kompozisyonu ile doğrudan bağlantılıdır. Bu sıcaklık değerinin belirlenmesi ile ilgili de literatürde pek çok çalışma yapılmış ve ampirik formüller üretilmiştir. Özellikle bu konuda A. Dimatteo ve arkadaşları aşağıdaki dört formüle ulaşmıştır [12].

$$M_{S1} = 561 - 474 \times C - 33 \times Mn - 17 \times Cr - 17 \times Ni - 21 \times Mo \quad (3.3)$$

$$M_{S2} = 539 - 423 \times C - 30,4 \times Mn - 12,1 \times Cr - 17,7 \times Ni - 7 \times Mo - 11 \times Si \quad (3.4)$$

$$M_{S3} = 512 - 453 \times C - 16,9 \times Ni - 9,5 \times Mo + 217 \times C^2 + 15 \times Cr - 71,5(C \times Mn) - 67,6 \times (C \times Cr) \quad (3.5)$$

$$M_{S4} = 520 - 320 \times C - 50 \times Mn - 30 \times Cr - 20 \times (Ni + Mo) - 5 \times (Cu + Si) \quad (3.6)$$

Tüm bu formüllere ilaveten diğer çalışmalarda da daha basitleştirilmiş bir şekilde martenzit başlangıç sıcaklığı şöyle ifade edilmiştir [10];

$$M_S = 500 - 361 \times C - 39 \times Mn \quad (3.7)$$

Martenzitik dönüşüm, östenit fazının martenzit başlangıç sıcaklığına (M_S) ulaştığında başlar ve soğutma sürecinde östenit yapısal olarak kararsız hale gelir. Numune soğutulduğunda, östenitin bir kısmı giderek artan bir oranda martenzite dönüşür, bu dönüşüm süreci martenzit tamamlanma sıcaklığına (M_F) kadar devam eder ve dönüşüm de biter.

3.1.1.4. Çelik Çubuktaki Isı İletkenliğini Oluşturan Faktörler ve Bunların Martenzit Hacim Yüzdesine Etkisi

Çubuğun ısı iletkenliği, haddelenme işlemi ve tempcore prosesinde çubuk üzerindeki ve içyapısındaki ısının ne kadar hızlı veya yavaş aktığını belirler.

Tempcore su soğutma kutusu içerisinden sıcak çelik çubuk geçerken, su ve çelik çubuk birbirini ile temas ederek bir ısı transferi gerçekleştirir. Buradaki ısı akış yoğunluğu şu şekilde ifade edilir [10];

$$\rho = \bar{h} \times (T_b - T_w) \quad (3.8)$$

Burada;

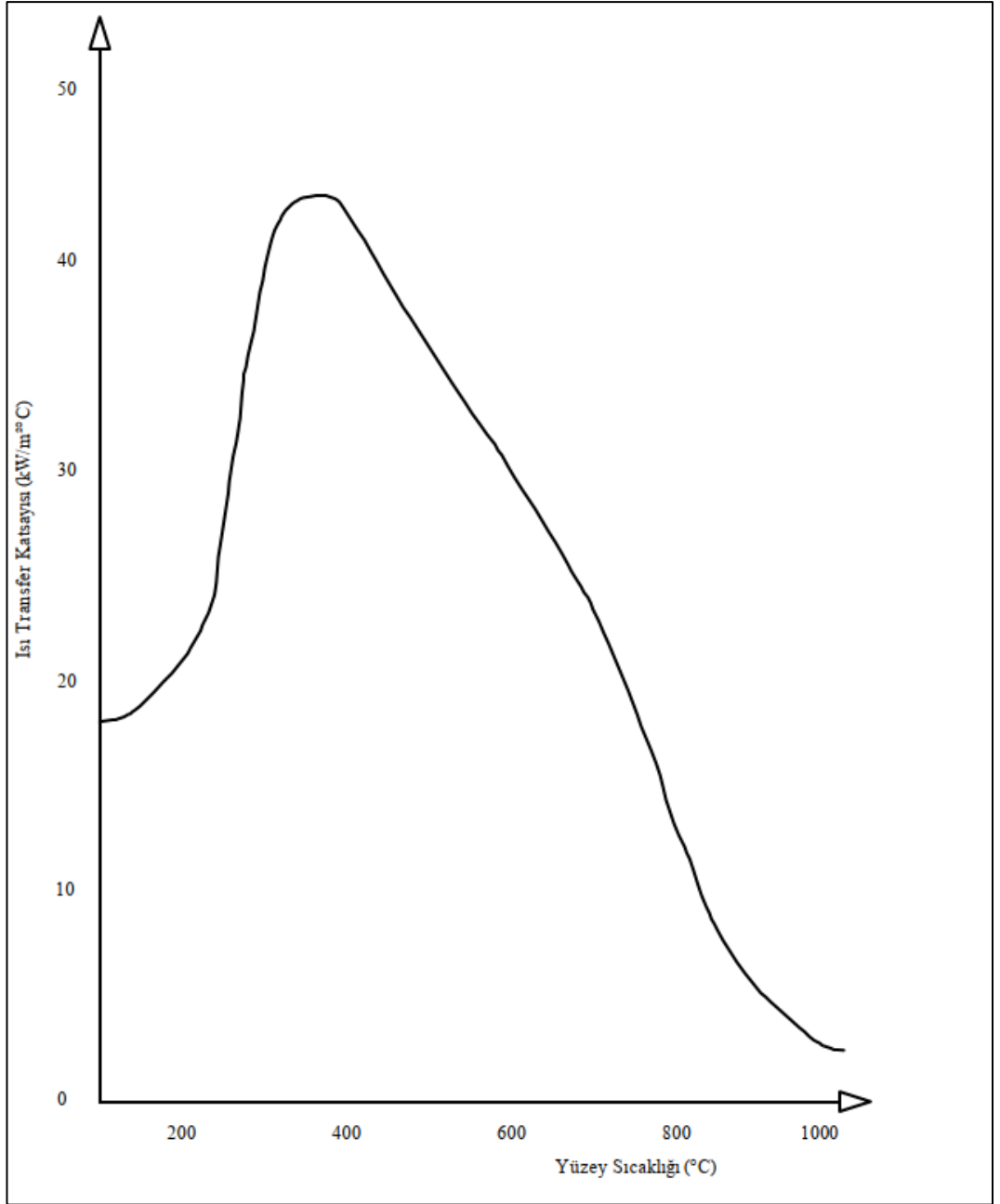
ρ : Isı Akış Yoğunluğudur. Birim zamanda birim alana iletilen ısı miktarını ifade eder. Birim olarak watt/metrekaare (W/m^2) kullanılır. Yani, ısı akış yoğunluğu, bir yüzeyden diğerine geçen ısı miktarının, birim alana oranını belirtir.

$\bar{h}$: Toplam ortalama taşınım katsayısıdır. Toplam ortalama taşınım katsayısı, bir malzemenin veya arayüzeyin ısı transferini belirleyen bir parametredir. Bu katsayı, bir malzemenin veya arayüzeyin sıcaklık farkı başına birim zamanda birim alandan ne kadar ısı aktarabileceğini ölçer. Genellikle Kilowatt/metrekaare-santigrat (kW/m^2) biriminde ölçülür.

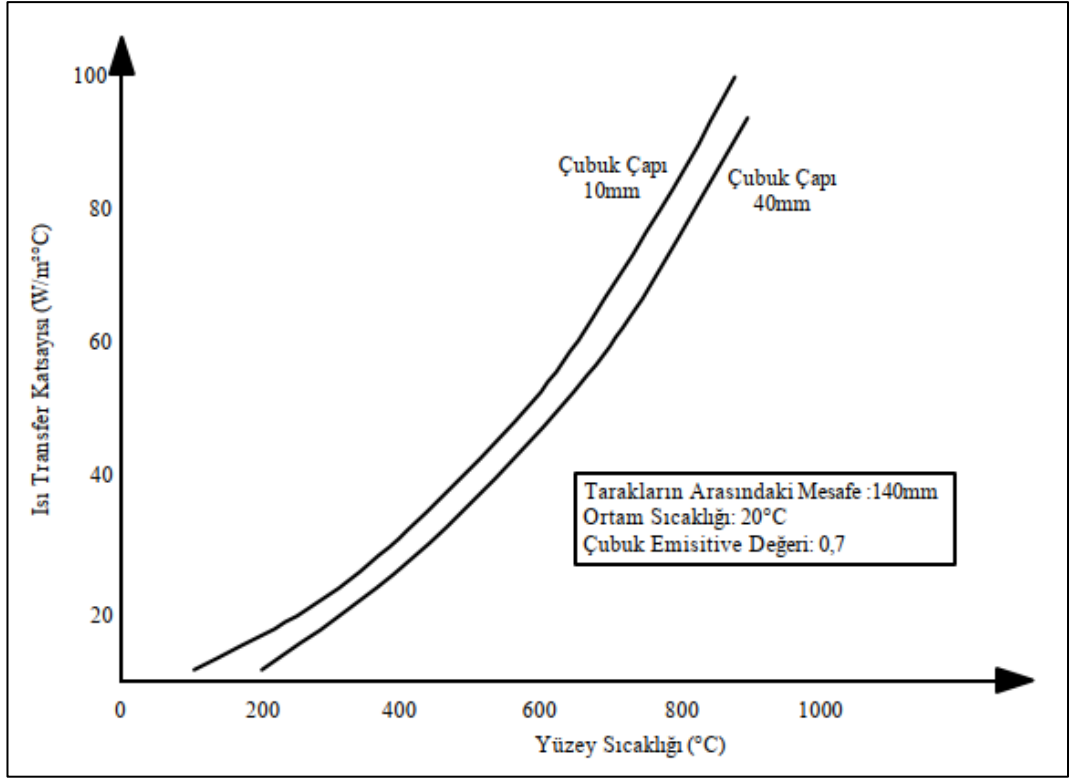
T_b : Çubuğun yüzey sıcaklığıdır. Birimi santigrattır ($^{\circ}C$).

T_w : Soğutma ortamı çevresindeki hacmin sıcaklığıdır. Birimi santigrattır ($^{\circ}C$).

Şekil 3.4'te Uçar Makas öncesinde konumlandırılmış ve ortalama max. 12 bar basınç ile basınçlandırılabilen bir tempcore su soğutma kutusu içerisinde, sıcaklığa göre toplam ortalama taşınım katsayısının değişimi grafiği verilmiştir. **Şekil 3.5**'te ise tempcore su soğutma kutusundan çıktıktan sonra, ızgara soğutma platformu üzerinde, farklı çaplardaki malzemelerin yüzey sıcaklıklarına göre toplam ortalama taşınım katsayısının değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.4: Tempcore su soğutma kutusu içerisinde toplam ortalama taşınım katsayısının yüzey sıcaklığı ile olan grafiği [10].



Şekil 3.5: Izgara platformunda toplam ortalama taşınım katsayısının yüzey sıcaklığı ile olan grafiği [10].

Çubuktaki ısı iletkenliğinin oluşması **Şekil 3.1**'den de yorumlanabileceği gibi aşağıdaki faktörlere bağlıdır;

- Haddelenmeden gelen faktörler
- Tempcore su soğutma kutusundan gelen faktörler
- Kimyasal kompozisyon kaynaklı termal faktörler

3.1.1.4.1. Haddelenmeden Gelen Faktörler

Çelik haddelendikten ve finiş tezgahından ayrıldıktan sonra, malzemenin tempcore su soğutma kutusuna giriş sıcaklığı, çapı, tempcore prosesindeki su verme süresi gibi faktörler, çubuktaki ısı iletkenliğini doğrudan etkiler.

(a) Malzemenin Giriş Sıcaklığı (T_0):

Malzemenin giriş sıcaklığı, haddelenme işlemi sırasında malzemenin ısı davranışını etkiler. Daha yüksek bir giriş sıcaklığı, malzemenin daha homojen bir şekilde haddelenmesine ve daha düşük bir martenzit hacmine sahip olmasına neden olabilir.

(b) Malzemenin Çapı (d):

Çeliğin çapı, haddelenme işlemi sırasında uygulanan gerilmeleri ve ısı davranışı etkiler. Genellikle daha büyük çaplı çelikler, daha yavaş soğuyabilir ve bu da martenzit hacminin azalmasına neden olabilir.

Aynı zamanda tempcore sistemi içerisinde yer alan soğutma borusu iç çapı ile malzeme dış çapı arasında kalan kısım kesitten bakıldığında su ile dolan alan olarak kabul edilir. Bu alan da ısı transferine etki eden bir faktörü doğurur ve buna “doldurma katsayısı” denir.

Doldurma katsayısı (D^*) aşağıdaki gibi formül ile ifade edilmiştir;

$$D^* = d^2 / D^2 \quad (3.9)$$

Burada;

D^* = Doldurma katsayısı

d = Malzeme çapı

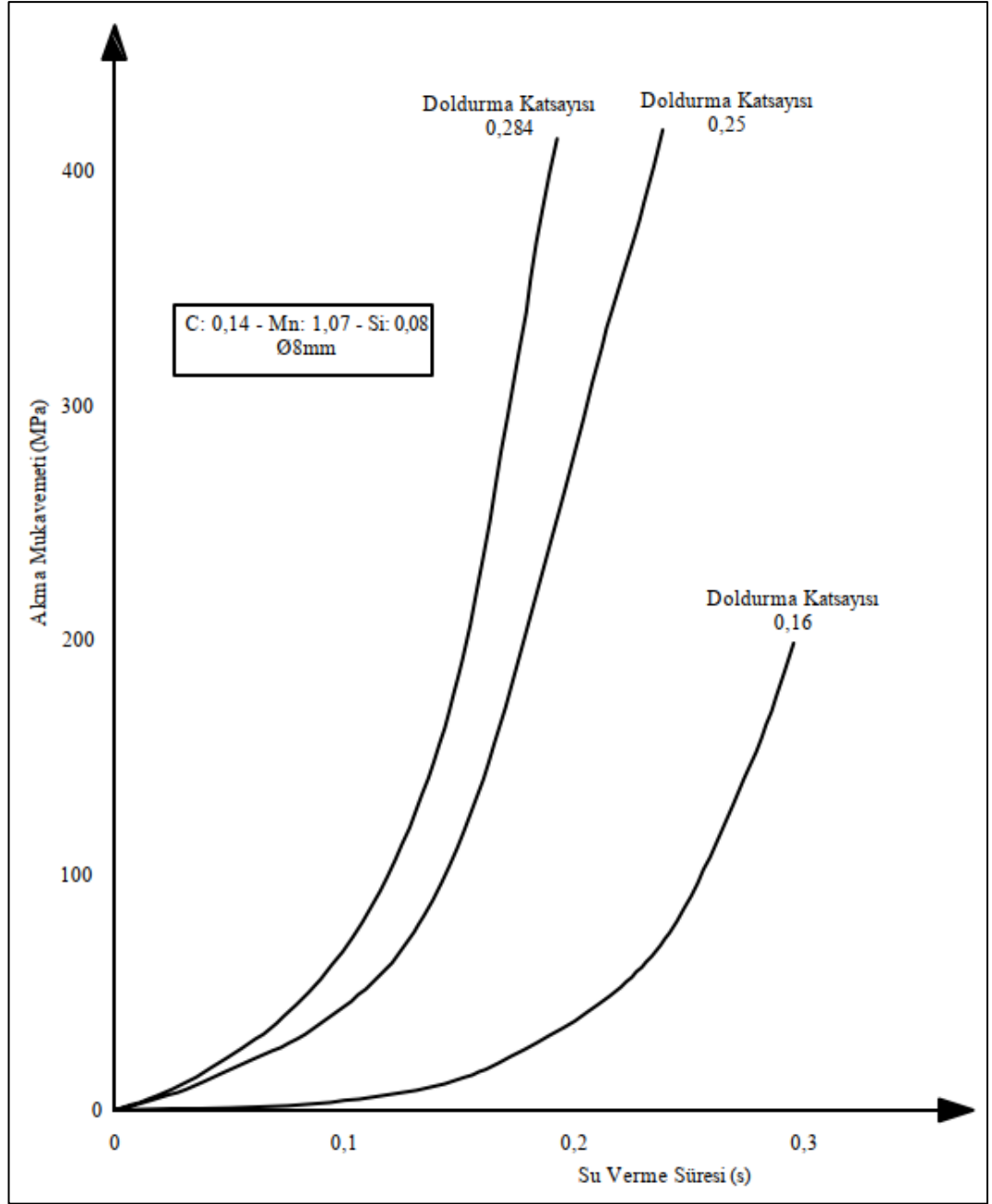
D = Su soğutma borusu iç çapı

(c) Tempcore Prosesindeki Su Verme Süresi (t):

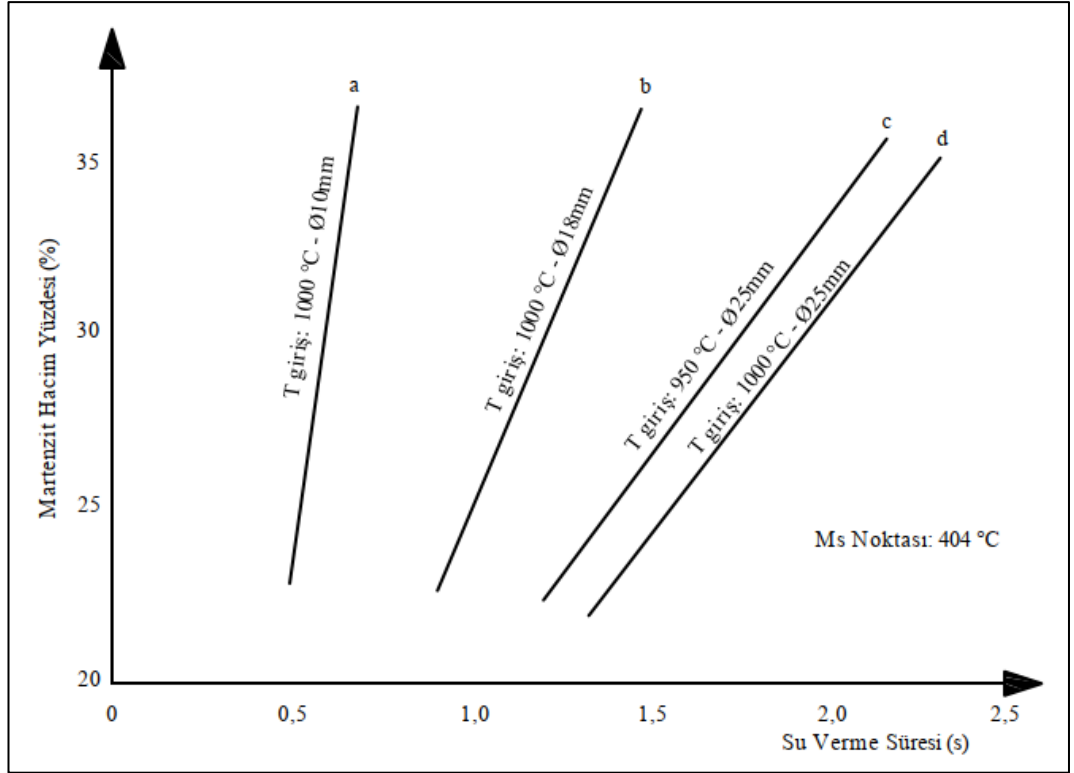
Tempcore prosesindeki su verme süresi aslında haddeleme esnasında finiş tezgahından çıkan malzemenin hızı ile doğrudan bağlantılıdır. Belirli bir uzunlukta olan tempcore su soğutma kutusu içerisinden geçiş süreci boyunca suya maruz kalır. Bu da hem su verme süresini belirlemiş olur. Daha uzun su verme süreleri, daha hızlı soğuma ve daha yüksek martenzit hacmi anlamına gelebilir.

Şekil 3.6'te Uçar Makas öncesinde konumlandırılmış ve ortalama max. 12 bar basınç ile basınçlandırılabilen bir tempcore su soğutma kutusundaki, Ø8'lik inşaat demirinin, 0,28, 0,25 ve 0,16 doldurma katsayılarında su verme süresine bağlı olarak akma mukavemet eğrileri verilmiştir.

Şekil 3.7'de Çubuk çapına bağlı olarak su verme sıcaklıklarının martenzit hacim yüzdesine etkilerinin gözlendiği bir grafik vardır. Bu grafikte martenzit başlangıç sıcaklığı 404 °C'ye tekabül eden kompozisyondaki Ø10, Ø18, Ø25 mm çapındaki çelik çubuklar incelenmiştir.



Şekil 3.6: Doldurma katsayısı – su verme süresi grafiği [10].



Şekil 3.7: Farklı çap ve giriş sıcaklıklarında martenzit hacim yüzdesi – su verme süresi grafiği [10].

3.1.1.4.2. Tempcore Su Soğutma Kutusundan Gelen Faktörler

(a) Su Debisi

Tempcore prosesi sırasında çelik çubuğunun soğutma hızını belirler. Daha yüksek su debisi, çubuğun daha hızlı bir şekilde soğumasını sağlar. Bu durumda, çubuk yüzeyindeki sıcaklık daha hızlı bir şekilde düşer ve iç kısımlara ısı daha hızlı bir şekilde iletilir. Bu, çubuğun tamamen martenzit fazında soğumasını teşvik edebilir ve dolayısıyla martenzit hacminin artmasına neden olabilir. Su debisi metreküp/saat (m^3/h) 'tir. Akma mukavemetine doğrudan etki eder.

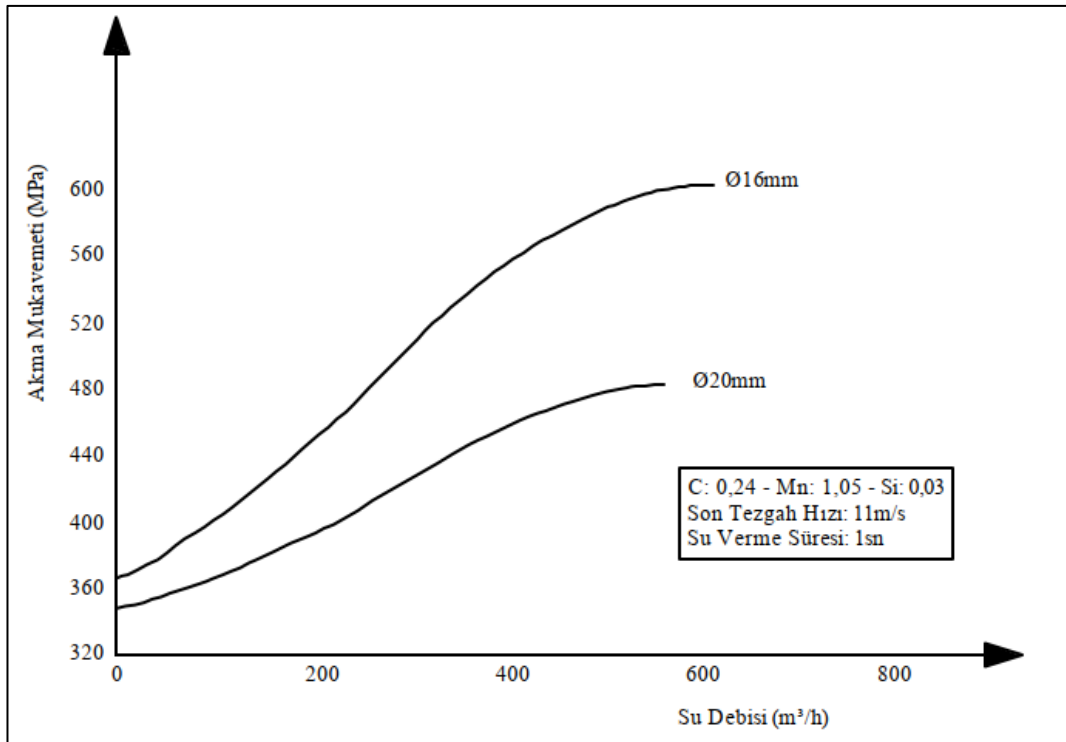
(b) Su Sıcaklığı:

Su sıcaklığı, soğutma işleminin etkinliğini belirler. Daha düşük su sıcaklığı, çubuğun daha hızlı bir şekilde soğumasını sağlar. Soğutma suyunun düşük sıcaklığı, çubuğun yüzeyinden ısıyı daha etkili bir şekilde uzaklaştırabilir, bu da daha homojen bir soğutma sağlayabilir ve martenzit hacminin artmasına katkıda bulunabilir. Birimi santigrattır (°C).

(c) Soğutma Cihazındaki Termal Randıman:

Soğutma cihazındaki termal randıman, soğutma suyunun çubuğa aktarılan ısı miktarını belirler. Daha yüksek termal randıman, soğutma işleminin daha etkili olmasını sağlar. Bu, çubuğun daha hızlı bir şekilde soğumasını ve dolayısıyla daha yüksek martenzit hacmini teşvik edebilir. Birimi kilokalori/litre-su (*kcal/lt*)’dur.

Şekil 3.8’te Uçar Makas öncesinde konumlandırılmış ve ortalama max. 12 bar basınç ile basınçlandırılabilen bir tempcore su soğutma kutusundaki, Ø16 ve Ø20’lik inşaat demirinin, 11 m/s finiş hızı ve 1saniye su verme süresi altında, su debisinin akma mukavemetine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Su debisinin akma mukavemetine etkisi grafiği [10].

3.1.1.4.3. Kimyasal Kompozisyon Kaynaklı Termal Faktörler

Çeliğin kimyasal kompozisyonu, martenzit hacmi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Martenzit oluşumunu etkileyen termal özellikler, çeliğin alaşım bileşimine bağlı olarak şu şekillerde etkili olabilir:

(a) Karbon İçeriği:

Karbon, çeliğin martenzit oluşumu üzerinde en önemli etkenlerden biridir. Yüksek karbon içeriği, martenzit oluşumunu artırır çünkü karbon, demir içinde çözünürken çözeltiyi doymuş bir halde tutar ve hızlı soğutma durumunda martenzit fazının oluşmasını sağlar. Düşük karbon içeriğine sahip çeliklerde, martenzit hacmi genellikle daha düşüktür.

(b) Alaşım Elementleri:

Çelikte bulunan diğer alaşım elementleri de martenzit oluşumunu etkileyebilir. Örneğin, mangan, nikel ve krom gibi elementlerin varlığı ve hacimsel ağırlıklarını martenzit oluşumunu artırabilir veya azaltabilir. Bu elementler, çeliğin dönüşüm sıcaklığını ve dönüşüm kinetiğini değiştirerek martenzit hacmini etkiler.

(c) İz Elementler:

Bazı iz elementler, çeliğin mikroyapısını etkileyebilir ve dolayısıyla martenzit oluşumunu etkileyebilir. Örneğin, bor gibi iz elementler, martenzit hacmini artırabilir.

(d) Tane Boyutu:

Çeliğin Tane boyutu da martenzit hacmi üzerinde etkilidir. Daha ince taneli çeliklerde, martenzit hacmi genellikle daha yüksektir çünkü tane sınırları, dönüşüm sırasında oluşan atomların hareketini kısıtlar ve daha fazla martenzit oluşumuna yol açar.

Bu faktörlerin bir arada değerlendirilmesi, çeliğin özellikle istenilen martenzit hacmine sahip olup olmayacağını belirler. Çelik üretiminde ve işlenmesinde, çeliğin kimyasal bileşimi ve termal özelliklerinin dikkatle kontrol edilmesi, istenilen sonuçların elde edilmesini sağlar.

3.1.2. Martenzit Tabakanın Akma Değeri (σ_M)

Martenzit tabakanın akma gerilmesi **Şekil 3.1**'de görüleceği üzere temperleme sıcaklığına bağlıdır.

(a) Temperleme Sıcaklığı (T_r):

Tempcore su soğutma kutusunda ani soğutmaya maruz kalan çelik çubuklar, su kutusunun hemen çıkışında, dış kabuk martenzit, çekirdek kısmı ise östenit fazda olmaktadır. Malzeme su kutusundan soğutma platformuna giderken ve sonrasında

soğutma platformu üzerinde sıcak olan östenit fazdan, soğuk olan martenzit faza olacak şekilde ısı transferi başlar.

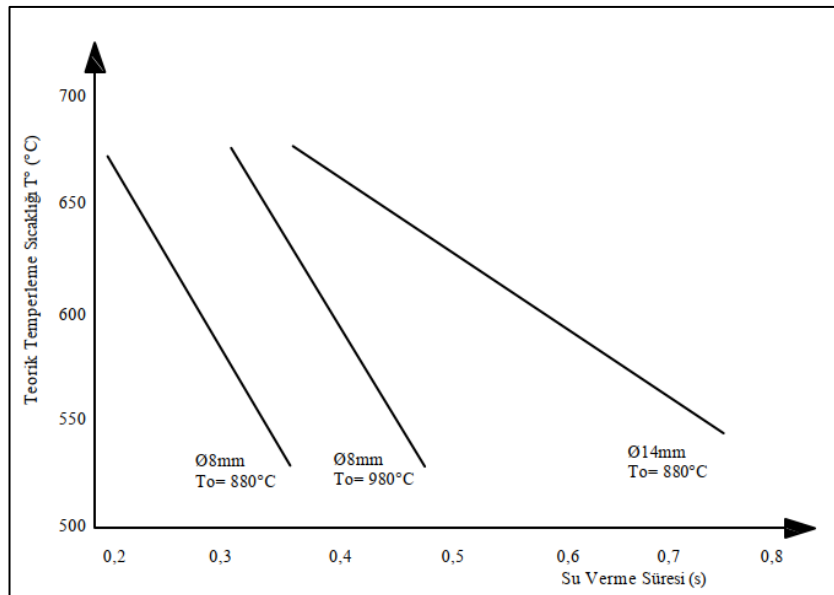
Martenzit bu aşamada çekirdekten gelen ısı etkisi ile yeniden ısı almaya ve temperlemeye başlar. Bu olay dizininde dışarıdan herhangi bir etki olmayıp, kendi iç termal mekanizmaları ile gerçekleşir. Dolayısıyla bu termal mekanizma, kendi kendini temperleme adını alır.

Bu termal mekanizmanın cereyan ettiği anda, çubuk yüzeyinin maksimum sıcaklığa eriştiği nokta, temperleme sıcaklığı olarak kabul edilir. Bu noktadan sonra artık hem çekirdek hem kabuk kısım denge sıcaklığına ulaşmaya başlar. Kendi kendini temperleme sıcaklığı T_r ile ifade edilir.

$$T_r = f(t, d, T_0) \quad (3.10)$$

Denklem (3.10)'dan da anlaşılacağı üzere su verme süresi (t), çubuk çapı (d), çelik çubukların soğutma kutusuna ilk giriş sıcaklığı (T_0) değerlerine bağlı olan bir fonksiyondur [1].

Şekil 3.9'da farklı su verme süresi (t), çubuk çapı (d), çelik çubukların soğutma kutusuna ilk giriş sıcaklığı (T_0) değerlerinde, temperleme sıcaklığına (T_r) etkisi gösterilmiştir.



Şekil 3.9: Çubuk çapına bağlı olarak, su verme süresinin temperleme sıcaklığına etkisi grafiği [10].

Temperleme sıcaklığı, martenzit fazının çelikteki akma gerilmesini azaltmak için önemlidir çünkü temperleme işlemi sırasında martenzit fazının içindeki katı çözelti partiküllerinin boyutu artar ve bu partiküllerin kenarlarındaki gerilim yoğunlukları azalır. Bu, çelik parçanın kopma mukavemetini ve dayanıklılığını artırır. Bu nedenle, doğal olarak gerçekleşen bu kendi kendini temperleme sayesinde, martenzit olan tabaka çekirdekten temperlenerek, Temperlenmiş Martenzit halini alır.

Temperlenmiş martenzitin akma değeri, Temperleme sıcaklığına bağlı bir fonksiyondur ve (σ_M) ile gösterilir [1];

$$\sigma_M = 1781,5 - 1,75 \times T_r \quad (3.11)$$

Temperlenmiş martenzit bölgesinin akma mukavemeti ile ilgili olarak Sally Hosny ve ark. 2021 yılında yapmış oldukları çalışmada, Krauss Denklemini kullanılarak formülü şu şekilde de kullanmışlardır [15];

$$\sigma_M = 413 + 1,72 \times 10^3 \times C^{1/2} \quad (3.12)$$

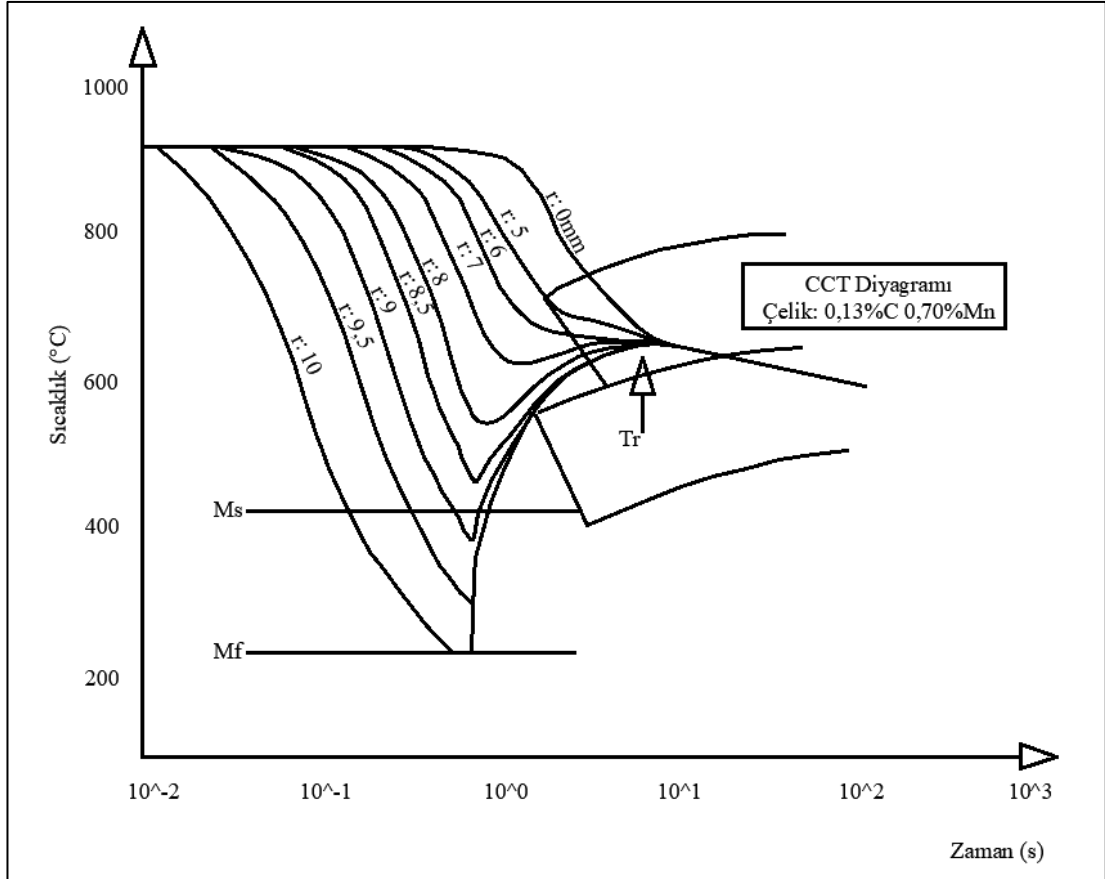
3.1.3. Çekirdekteki Ferrit+Perlit Akma Değeri (σ_{fp})

Nervürlü inşaat demiri, tempcore su soğutma kutusundan çıktıktan sonra kabukta martenzit, çekirdekte ise östenit fazda olur. Sonrasında dış kabuğa uygulanan ani su soğutma işlemi bitince dış kabuk ortam sıcaklığındaki hava ile temasa geçer. Bu aşamadan sonra da sıcaklık değeri yüksek olan çekirdekten kabuğa doğru bir ısı akışı başlar. Yüksek sıcaklıktaki çekirdek kısmı artık soğumaya başlayarak mevcut östenit fazı, belli bir zaman içerisinde ferrit+perlit yapısına dönüşür.

Çekirdekte durum bu şekilde gerçekleşirken aynı zamanda martenzit olan yapı da temperlenerek temperlenmiş martenzit fazı halini alır. Bu iki yapı arasında yine soğutma prosedürüne bağımlı olmak kaydıyla beynit yapı da oluşabilir. Oluşacak tüm fazlar CCT diyagramlarına bağlı kalmak kaydı ile karşılık gelen sıcaklığına erişebilecek soğutma hızlarıyla ayarlanabilir. Kontrolü sağlamak için CCT diyagramlarına başvurulur. (Bknz: **Başlık 3.1.1.1**)

Östenitten dönüşen ferrit+perlit yapının akma gerilmesi **Şekil 3.1**'de görüleceği üzere malzemenin kompozisyonu CCT diyagramlarındaki soğutma koşulları ile doğrudan bağıntılıdır.

Şekil 3.10'da görüleceği üzere tempcore prosesi ile üretilmiş, Ø20mm %0,13 C ve %0,7 Mn içerikli bir çeliğin, çekirdek merkezinden başlayarak dış kabuğa kadar belirli mesafelerdeki sıcaklık zaman eğrileri, CCT diyagramı ile verilmiştir. Burada temperleme sıcaklığı tüm eğrilerin birleştiği nokta olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 3.10: Merkezden çubuğa belirli mesafelerde sıcaklık zaman eğrilerinin CCT diyagramı ile grafiği [10].

Ferrit+perlit bölgesinin akma mukavemeti ile ilgili olarak Sally Hosny ve ark. 2021 yılında yapmış oldukları çalışmada, %0,13 C içeriğinin altı çelikler düşük karbonlu çelik, %0,13 C içeriğinin üstündeki çelikler ise orta karbonlu çelikler olarak değerlendirilerek iki farklı formül üzerinden çalışılmıştır.

Düşük karbonlu çelikler için Kouwenhoven ve ark. kullandığı çoklu doğrusal regresyon tekniğine dayalı olan denklem (3.14) ve orta karbonlu çelikler için Choquet ve ark. tarafından türetilen denklem (3.15) kullanılmıştır. Buna göre;

- **Düşük Karbonlu Çeliklerde σ_{fp}**

$$\sigma_{fp} = 52,9 \times f_{\alpha} + (372,4 + 92,1 \times Mn) \times f_p + 70,6 \times Si + 25,5 \times f_{\alpha} \times d_{\alpha}^{-0,5} \quad (3.14)$$

- **Orta Karbonlu Çeliklerde σ_{fp}**

$$\sigma_{fp} = 63 + 23 \times Mn + 53 \times Si + 700 \times P + 5000 \times N + f_{\alpha} \left(15,4 - 30 \times C + \frac{6,094}{0,8+Mn} \right) \times d_{\alpha}^{-0,5} + (1 - f_{\alpha}) \times (360 + 2600 \times C^2) \quad (3.15)$$

Burada f_{α} ferrit fazının fraksiyonu, f_p perlit fazının fraksiyonu ve d_{α} mm cinsinden tane boyutudur. f_{α} Demir Karbon Denge Diyagramlarından Lever kuralına göre hesaplanabilir [15].

3.1.4. Malzemenin Çekme Gerilmesi (σ_{ϵ})

Çekme gerilmesi, bir malzemenin çekme yükü altında ne kadar uzayabileceğini veya deformasyona uğrayabileceğini ifade eden bir terimdir. Bu gerilme, bir malzemenin boyutlarına uygulanan dış kuvvetlerin etkisi altında meydana gelir ve malzemenin mekanik dayanıklılığı hakkında önemli bilgiler sağlar. Malzemenin dayanıklılığı, bir malzemenin bir yük altında ne kadar deformasyona uğrayabileceğini ve bu deformasyonun sonucunda ne kadar dayanıklı olabileceğini belirler.

Mukavemet, malzemenin dış kuvvetlere karşı ne kadar dirençli olduğunu ifade eder. Çekme gerilmesi değerleri, mühendislik uygulamalarında malzeme seçimi, tasarım ve yapısal analizlerde önemli bir role sahiptir.

Malzemenin çekme gerilmesi ile ilgili olarak Smoljan ve ark. ile Tabor ve ark. tarafından iki denklem üretilmiştir. Bunlar (3.17) ve (3.18)'dir. Bu iki denklem de malzeme içerisindeki fazların sertlik değerlerine (H_V , H_M , H_B , H_{FP}), ve hacim fraksiyonlarına (V_M , V_B , V_{FP}) bağlı fonksiyonlardır.

Toplam sertlik şu şekilde ifade edilebilir;

$$H_V = H_M \times V_M + H_B \times V_B + H_{FP} \times V_{FP} \quad (3.16)$$

Tabor ve ark. kullandıkları denklemde (3.18) bir n sayısı kullanmışlardır. Bu n sayısı, soğutma hızı kullanılarak deneysel olarak hesaplanabilen, deformasyon sertleşme katsayısıdır.

Toplam sertlik (H_V), Vickers Sertlik değerine göre hesaplanmış fakat Rockwell sertlik değerine sonrasında çevrilebilir.

Buna göre toplam çekme gerilmesi [15];

- Smoljan ve ark.'na göre;

$$\sigma_C = 3,3 \times H_V \quad (3.17)$$

- Tabor ve ark.'na göre;

$$\sigma_C = 3,4 \times H_V (1 - n) \times \left(\frac{12,5 \times n}{1 - n} \right)^n \quad (3.18)$$

3.1.5. Malzemenin Akma Gerilmesi (σ_a)

Akma gerilmesi, bir malzemenin plastik deformasyona başladığı noktadaki gerilme seviyesidir. Plastik deformasyon, malzemenin uygulanan gerilme altında kalıcı bir şekilde şekil değiştirmesi anlamına gelir. Bu noktaya "akma başlangıcı" denir ve malzemenin elastik sınırlarını aştığı kritik bir noktadır.

Akma gerilmesi, malzemenin plastik deformasyon davranışını ve elastik sınırlarını belirlemek için kritik bir gösterge olarak kabul edilir. Yani, malzeme elastik sınırlarını aştığında, gerilme altında kalıcı bir şekil değişikliği gösterir ve bu da akma gerilmesinin aşıldığı anlamına gelir.

Akma gerilmesi, malzemenin dayanıklılığını ve mukavemetini belirlemede önemli bir parametredir. Bir malzemenin akma gerilmesi ne kadar yüksekse, o kadar fazla yük altında deformasyona uğrayabilir ve dolayısıyla daha dayanıklıdır. Bu nedenle, malzeme seçimi, tasarım ve yapısal analizler gibi mühendislik uygulamalarında akma gerilmesinin dikkate alınması önemlidir.

Akma gerilmesi ayrıca malzemenin işlenebilirliğini de belirler. Daha yüksek akma gerilmesine sahip malzemeler genellikle daha işlenebilir ve şekillendirilebilir olduğu için imalat süreçlerinde tercih edilir.

Şekil 3.1' de görüleceği üzere malzemenin akma gerilmesinin belirlenmesinde pek çok parametre vardır. Tempcore prosesi olmadan bu akma gerilmesi daha yüksek değerlere ulaştırılmaya çalışılırsa, malzemenin kimyasal kompozisyonunda çok fazla katkı elementi konmalıdır ki bu da aşırı maliyet içeren bir durum oluşturur.

Dolayısı ile kontrol edilebilir bir akma gerilmesi için tempcore prosesi de elzemdir.

Akma gerilmesi, Tamura denklemi (3.19) ile şu şekilde ifade edilmiştir;

$$\sigma_a = P_M \times (\sigma_M - \sigma_{fp}) + \sigma_{fp} \quad (3.19)$$

3.2. Nervürlü İnşaat Demirlerinin Üretiminde Isı Transfer Mekanizmaları

Tempcore prosesinde termal dönüşümler iki durum altında incelenebilir. Sıcak çeliğin belirli süre ve su debisi altında soğutmaya uğradığı, tempcore su soğutma kutusu içerisindeki termal mekanizma ve hava ile temas ederek çekirdekten tavlanmanın gerçekleştirdiği soğutma platformunda gerçekleşen termal mekanizma.

Isı, sıcaklık farklı olan iki veya daha fazla yapı arasında transfer edilen bir enerji türüdür.

Isı transferi, sıcak bir ortamdan soğuk bir ortama enerji akışını ifade eder. Enerjinin korunum yasasından yola çıkılarak bir sistemdeki enerji değişimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir [17];

$$E_{sistem} = Q_{giren} - Q_{çıkan} + E_{uretilen} \quad (3.20)$$

Bir sistemde ısı transferi genellikle üç farklı şekilde gerçekleşir: iletim, konveksiyon ve ışıyım.

- **İletim:** Parçacıklar arası etkileşmelerin sonucu olarak bir maddenin yüksek enerjili parçacıklardan, bitişiklerindeki daha yüksek enerjili parçacıklara enerji aktarması ile gerçekleşir. Fourier ısı transfer denklemleri kullanılır [16].

$$q_{iletim} = -k \times A \times \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.21)$$

- **Taşınım:** Bir katı yüzey ile ona bitişik, hareket halindeki sıvı veya gaz arasında enerji aktarımı türüdür; iletim ve akışkan hareketinin birleşik etkilerini kapsar. Akışkan hareketi ne kadar hızlı olursa, taşınım ısı aktarımı da o kadar büyük olur. Yığın akışkan hareketinin ortadan kalkması halinde, katı yüzeyle

bitişindeki akışkan arasındaki ısı transferi saf iletimle olur. Newton'un soğutma kanunu kullanılır [16].

$$q_{taşınım} = \bar{h}A (T_b - T_w) \quad (3.22)$$

($\bar{h}$), konveksiyonla toplam ortalama taşınım katsayısıdır [W/m^2K], (T_b) demir çubuğun yüzey (sınır) sıcaklığıdır [K] ve (T_w) soğutucu sıvının sıcaklığıdır [K].

- **Işınım:** Işınım, elektromanyetik dalgaların taşıdığı enerji transferidir. Bu tip ısı transferi vakumda bile gerçekleşebilir, çünkü ortamdaki parçacıklara bağlı değildir. Güneş ışığının dünyaya ulaşması gibi birçok doğal olayda radyasyon önemli bir rol oynar. Öte yandan, bir soba veya ısıtıcıdan yayılan ışınlar da radyasyonla ısı transferine örnektir. Tempcore prosesinde ise çekirdek kısmının yüzeye doğru yaptığı ısı transferi bir tür ışıınım ısı transferidir. Stefan-Boltzmann denklemi ile ifade edilir [16].

$$q_{ışınım} = \varepsilon \sigma A (T_b^4 - T_w^4) \quad (3.23)$$

Burada (σ) Stefan-Boltzmann sabiti ve (ε) ise emisivitedir.

(σ) Stefan-Boltzmann sabiti değeri; $\sigma = 5.670367 \times 10^{-8}$ 'dir.

(ε) emisivite ise ısı transferi ve termodinamik alanında kullanılan bir terimdir. Bir nesnenin emisivitesi, yüzeyin ısı ışıınımı yoluyla ısı yayma kabiliyetini ifade eder. Bir nesnenin emisivitesi genellikle 0 ile 1 arasında bir değer alır.

Bu üç yöntem, çeşitli fiziksel koşullara ve ortamlara bağlı olarak bir arada veya ayrı çalışabilir. Isı transferi, termodinamiğin bir alanıdır ve birçok doğal olayın ve endüstriyel sürecin anlaşılması için önemlidir.

İnşaat demirlerinin tempcore ile üretilmeleri esnasında mikroyapının tahmin edilebilmesi için termal değişimler doğru hesaplanmalıdır. Üretilen malzemenin martenzit hacim oranı, soğutma şartları, kendi kendini temperleme sürecinde gerçekleşen termal dönüşümlerde ısı transferinin modellenmesi ile sonlu elemanlar yönteminden yararlanılarak tahmin edilebilir.

Sonlu elemanlar yöntemi için temel olarak Fourier denkleminden yararlanılır [14];

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.24)$$

(ρ), yoğunluktur [kg/m^3], (C_P) özgül ısıdır [J/kgK], (T) sıcaklıktır [K], (k) ise termal iletkenliktir [W/mK] ve (x), kalınlık yönündeki mesafedir.

Demir çubukların şekli, kalınlığı ve uzunlamasına ısı transferi dikkate alındığında denkleme yaklaşmak zordur. Bu nedenle, uzunlamasına yönden bağımsız ısı transferi, kesitin basit şekli kullanılarak silindirik koordinat sistemi temel alınarak düşünülür. Dolayısı ile mesafe ölçüsü dairesel kesitin yarı çapı olan (r) ile gösterilebilir. Yüzeydeki ısı transferi aşağıdaki gibi ifade edilir [14];

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + q \quad (3.25)$$

Yapılacak modelleme kesit alanından olacağı için radyal ısı transferi göz önüne katılmaz. Aynı zamanda tempcore prosesinde su soğutma kutusunda su ile uygulanan durum ve sonrasındaki ortam havasını sınır şartı olarak kabul edildiğinde termal mekanizma olarak taşınım ve ışıınım mekanizmaları vardır. Dolayısı ile q [14];

$$q = q_{\text{taşınım}} + q_{\text{ışıınım}} \quad (3.26)$$

Yukarıda bahsedildiği gibi alan faktörü ortadan kaldırıldığında denklemler şu şekilde irdelenebilir;

$$q_{\text{taşınım}} = \bar{h} (T_b - T_w) \quad (3.27)$$

$$q_{\text{ışıınım}} = \varepsilon \sigma (T_b^4 - T_w^4) \quad (3.28)$$

Özellikle $q_{\text{taşınım}}$ içerisindeki ($\bar{h}$) toplam ortalama taşınım katsayısının değeri tempcore soğutma kutusu içerisindeki su debisi, malzeme hızı, su soğutma borusu içerisindeki soğutma suyunun akış karakterinin, yani Reynolds sayısının (Re) sınır şartlarına göre değişebilir.

$Re < 5000$ ise Denklem 3.29 kullanılır. Değilse, $Re \geq 5000$ Denklem 3.30 kullanılır [18].

$$\bar{h} = \frac{\{(1,86)(Re \times Pr)^{0,33} \times k_w\}}{D_h} \quad (3.29)$$

$$\bar{h} = \frac{\{(0,023)(Pr)^{0,3}(Re)^{0,8}\}}{D_h} \quad (3.30)$$

Burada, (D_h) tempcore su soğutma borusu içerisindeki sıvının çapıdır. Şu şekilde bulunur [18];

$$D_h = \frac{4A}{p} \quad (3.31)$$

Burada da (p) ıslak çevredir. Şu şekilde bulunur [18];

$$p = 2\pi\left(\frac{R_c + R_b}{2}\right) \quad (3.32)$$

Islak çevre formülü içerisindeki (R_c) su soğutma borusunun iç çapını, (R_b) ise malzemenin çapını ifade eder.

Reynolds sayısı hesaplanırken aşağıdaki formül kullanılır [18];

$$Re = \frac{V_{bağlı} \times \rho_{su} \times D_h}{\nu} \quad (3.33)$$

Burada (ν) suyun dinamik viskozitesidir. (ρ_{su}) ise suyun yoğunluğudur.

($V_{bağlı}$) ise su ile malzeme arasındaki bağlı hızdır. ($V_{bağlı}$) şu şekilde ifade edilebilir [18];

$$V_{bağlı} = |V_{su} - V_{çubuk}| \quad (3.34)$$

Bu formülde (V_{su}) suyun hızıdır ve Denklem (3.35)'teki gibi ifade edilmiştir. ($V_{çubuk}$) ise çubuğun hızıdır ve haddeleme tezgahın son hızına bağımlı olarak değişkenlik gösterebilir dolayısı ile bir denkleme bağlı değildir [18].

$$V_{su} = \frac{Q_{her\ bir\ nozzledaki\ su\ debisi}}{A} \quad (3.35)$$

$$Q_{her\ bir\ nozzledaki\ su\ debisi} = \frac{Q_{tempcore\ toplam\ su\ debisi}}{Nozzle\ Sayısı} \quad (3.36)$$

$$A = alan = \pi\{(R_c)^2 - (R_b)^2\} \quad (3.37)$$

4. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Tempcore prosesi ile geçmişten bu zamana kadar pek çok ülkeden pek çok bilim insanı çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalardan başlıcaları kronolojik olarak şu şekilde sunulabilir;

2000 yılında Hakan Çetinel ve ark. tarafından çelik çubukların Tempcore prosesinden geçirilmesi sonrasında içyapılarının bir sonlu eleman yöntemi kullanılarak tahmin edilebileceği önerilmiştir. Tempcore yöntemiyle ısıtıl işlem gören çelik çubuklarda, su verme süresinin artmasıyla birlikte martenzit miktarının arttığı ve kendi kendini temperleme sıcaklığının ise azaldığı görülmüştür. Çalışmalarında çeşitli çaplarda %0,17 C, %0,22 Si, %0,79 Mn, %0,036 P ve %0,041 S içeren çelik çubuklar kullanılmıştır. Çalışma için bir Fortran 77 programı üzerinden sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ısı transfer denklemleri çözülmüş ve dönüşüm sonrası faz miktarı belirlenmiştir. Sonlu eleman yöntemiyle elde edilen sayısal sonuçlar, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır ve uyumun oldukça iyi olduğu görülmüştür [21].

2002 yılında Hakan Çetinel ve ark. tarafından Tempcore işlemiyle işlenen çelik çubukların mikroyapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Yaptıkları çalışmada, AISI 1020 çelik çubukları kullanılarak çeşitli çaplar üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Kendi kendini temperleme sıcaklığı ve uzama miktarı üzerindeki etkiler incelenmiş ve su verme süresine bağlı olarak martenzit miktarında bir artış gözlemlenmiştir.

PASCAL programı ile yapay sinir ağları kullanılarak mikroyapı ve mekanik özelliklerin belirlenmesi için hızlı bir yöntem geliştirilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve uyumun iyi olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, yapay sinir ağları kullanılarak çelik çubukların içyapıları, mekanik özellikleri ve kendi kendini temperleme sıcaklıklarının tahmin edilebileceği ve üretim sürecinin bu tahminlere göre ayarlanabileceği sonucuna varılmıştır [19].

Bahri İkiz 2009 yılında yapmış olduğu yüksek lisans çalışmasında sıcak haddelemede tempcore prosesini incelemiştir. Çalışmalarını yaparken farklı ebatlarda çelik çubuklar kullanmıştır. Yapmış olduğu çalışma neticesinde; tempcore ile üretilen çeliklerde akma mukavemet değerinin tempcore prosesi olmadan üretilenlere göre daha iyi

olduğu, içyapıda farklı fazların olduğu, kaynaklanabilirlik için düşük karbon eşdeğere sahip çelikler olması gerektiği, malzemenin kesit alanındaki martenzit yüzdesini, çubuk çapı, düşük karbon eşdeğerine bağlı olmayıp, su verme süresine bağlı olduğu, martenzit hacim oranındaki artışın akma ve çekme mukavemetlerini arttırırken, % uzamayı azalttığı, kabuktan çekirdeğe doğru giderken martenzit fazın bittiği yerde sertliğin hızlı bir şekilde düştüğü, istenen mekanik özelliklere ulaşmak için tempcore giriş sıcaklığının 950-1050 °, temperleme sıcaklığının ise 540-750 °C aralığında olması gerektiği sonuçlarına varmıştır [1].

Dimatteo ve ark. 2016 yılında yapmış oldukları makale çalışmasında, Tempcore prosesi sonrasında çelik çubukların içyapılarını ve mekanik özelliklerini tahmin etmek için sonlu elemanlar yöntemi ile durum incelemesi yapmaya çalışmışlardır. Tempcore su soğutma kutusundaki çelik çubukların termal evrimi, sonlu elemanlar analizi kullanılarak yapılmıştır. Bu süreçte üretilen çubukların nihai makro yapılarını ve mekanik özelliklerini tahmin etmek için modeller oluşturulmuş ve gerçek endüstriyel verilerle doğrulanmıştır. Tahminlerin doğruluğu, çekme dayanımı için %1.54 ve akma dayanımı için %2.23 gibi düşük yüzdelik hata ile belirlenmiştir [12].

Bandyopadhyay ve ark. 2019 yılında yapmış oldukları çalışmada, Tempcore işlemine tabi tutulan 600 MPa çelik çubukların mikroyapıdaki değişimlerini ve bunun sonucundaki mekanik özelliklerini tahmin etmek için termal ve mekanik analizler gerçekleştirmiştir. Johnson–Mehl–Avrami–Kolmogorov (JMAK) ve Koistinen–Marburger denklemlerine dayanan faz dönüşümleri, bir sonlu elemanlar programında uygulanmıştır. Geliştirilen model ile tempcore prosesindeki su soğutma anında ve sonrasında oluşan çekirdek ile yüzey arasındaki ısı transferleri gibi karmaşık termo-mekanik problemleri çözmek için bir simülasyon yaklaşım amaçlanmıştır.

Sonuç olarak, Tempcore işlemine tabi tutulan 600 MPa çelik çubuklarda faz dönüşümleri başarıyla modellenmiş ve sonlu elemanlar yöntemi ile uygulanan simülasyonda görülmüştür. Tahmin edilen faz dönüşümleri, her faz için CCT diyagramı ile iyi bir uyumla ilişkilendirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli, Tempcore işlemi için çelik çubuğun yüzeyinde oluşan temperlenmiş martenzit tabakasının kalınlığını doğru bir şekilde tahmin edebilmiştir [22].

Mehmet Barbar 2019 yılında yapmış olduğu tez çalışmasında tempcore prosesindeki su debisinin nervürlü çeliğin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir.

Yapmış olduğu çalışmada S420 çelik kütükten üretilen 8mm çapında nervürlü inşaat demirini farklı su debileri vererek deneysel çalışmalarını yapmıştır. Çalışmalarının sonunda, Tempcore prosesi ile üretilen S420 kalite çelik çubukların, BS 4449 Gr 460 B çeliğine göre 100 MPa daha az akma mukavemeti varken 50 MPa daha yüksek çekme mukavemeti olduğu ve bunun nedeninin de tempcore ile üretilen S420 çeliklerin karbon ve mangan miktarlarının daha az olduğu, tempcore prosesi ile ürettiği çelik çubukların mikroyapısındaki martenzit tabakada 300 HV, ferrit+perlit yapının ise 180 HV sertlikte olduğu ve bunun içerikteki karbon oranı ile alakalı olduğu sonuçlarına varmıştır [2].

Sally Hosny ve ark. 2021 yılında yayımlamış oldukları makalede düşük karbonlu ve orta karbonlu çelikler için, 16mm ve 32mm çapındaki nervürlü inşaat demirlerini, farklı işlem parametresi ve simülasyon varsayımı ile Tempcore işlemine tabi tutulan çubukların iç mikroyapısını ve genel mekanik özelliklerini tahmin etmek adına bir metodoloji geliştirilmiştir. Üç ardışık model önerilmiştir: (1) Termal profilleri tahmin etmek için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) simülasyonu kullanılan termal model, (2) iç mikroyapı değişimini tahmin etmek için JMatPro yazılımı ve martenzit hacim yüzdesini hesaplayan bir denklem kullanan metalurjik model ve (3) mekanik özellikleri tahmin etmek için karışım kuralına dayalı regresyon modelleri. Doğrulama sonuçları, hesaplanan ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum göstermektedir; ortalama mutlak yüzde hataları sırasıyla sertlik için %2,8, çekme mukavemeti için %2,8 ve akma mukavemeti için %3,8'dir [15].

2020 yılında Chun Su Park ve ark. Tempcore işlemi sırasında çelik çubukların soğutulmasını hızlandırmak için yeni bir su soğutma borusu tasarlamışlardır. Yeni geliştirilen su soğutma borusunda, geleneksel düz yüzeyli soğutuculara kıyasla, türbülans oluşturmak için kıvrımlı bir yüzey kullanılmıştır. Kıvrımlı soğutucunun soğutma performansını tahmin etmek için, Tempcore işlemi sırasında toplam ortalama taşınım katsayısı, bir sonlu hacim yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Kıvrımlı soğutucu sayesinde oluşan türbülans, buhar hacim fraksiyonunu azalttığı ve toplam ortalama taşınım katsayısını %10'a kadar arttırdığı gözlemlenmiştir. Elde edilen toplam ortalama taşınım katsayıları daha sonra, Tempcore işleminden sonra çubuğun dış katmanında oluşan martenzit hacmini tahmin etmek için sonlu elemanlar modelinde kullanılmıştır. Deney düzeneği hazırlanmış ve kıvrımlı soğutma borusu monte edilerek çelik çubukların hızlıca soğutabilme yeteneği değerlendirilmiştir.

Kıvrımlı soğutucularla tempcore su soğutma prosesi için, kendi kendini temperleme sıcaklığında 13 °C'lik bir azalma ile martenzit hacminde %6,54'lük bir artış elde edilmiştir [20].

Hany Khalifa ve ark. 10 ila 16 mm çapında ve 400 MPa ila 700 MPa arasında değişen mukavemete sahip B500B çeliği üzerinde Tempcore işlemini simüle etmek için bir matematiksel modelleme üzerine çalışmışlardır. Oluşturulan bu model, çelik çubuğun dış tabakada oluşan martenzit alanını ve ferrit-perlit merkezini hesaplamak için kullanılmaktadır. Çubuğun akma mukavemetini, martenzit ve ferrit-perlit hacim fraksiyonu ile ilişkilendirmek için kompozit karışım kuralı (ROM) kullanılmaktadır. Model, çeşitli işlem parametrelerinin (çubuk çapı, haddeleme sıcaklığı, soğutma nozullarının sayısı ve ayarı, soğutma suyu debisi ve su verme süresi gibi), sürecin farklı aşamalarında çubuk boyunca termal koşullar üzerindeki etkisini, oluşan yapıyı ve çelik çubuğun akma davranışını tahmin edebildiği görülmüştür.

Temperleme başlangıç sıcaklığı için yapılan tempcore parametrelerinin kontrol edilmesi, akma mukavemetinin 400 ila 700 MPa arasında değişmesine neden olduğu gözlemlenmiştir. Tempcore işlemi ana parametrelerini, yani su akış hızını ve su verme süresini değiştirerek hassas bir şekilde kontrol edilebilir olduğu gözlemlenmiştir. Sonsuz fark modeli ile temperleme sıcaklığının, içyapıların hacim yüzdesinin ve akma mukavemetini belirlenmesi tahmin edilmiştir [18].

Özgür Galip Dikbaş 2021 yılında yapmış olduğu yüksek lisans tezinde, B420C düşük karbonlu beton çeliğinin mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Bu inceleme ile tempcore üretim sistemi ve parametrelerinin bu çeliğin özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Ayrıca, karşılaştırma amacıyla S420 kalite çelik malzemesi de kullanılmıştır. Çalışma, aynı kalite ancak farklı kompozisyona sahip B420C çelik kütük yarı mamulleri kullanarak benzer tavlama ve haddeleme rejimlerini sabit tutarak gerçekleştirilmiştir. Ancak tempcore işlemi sırasında su sıcaklığı, su debisi, tempcore prosesine giriş hızı ve malzeme sıcaklığı gibi parametreler değiştirilmiştir. Üretilen numuneler, optik görüntü analizi ve mekanik testlerle karakterize edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, kimyasal alaşım miktarının değişmesiyle mekanik özelliklerin doğrusal olarak değiştiğini, su debisi ve sıcaklığındaki değişikliklerin de mekanik özellikleri etkilediğini göstermiştir. Ayrıca, B420C çeliklerine tempcore işlemi uygulandığında, beklenen özelliklerin yüksek karbonlu S420 çelik malzemesinden

daha üstün olduğu bulunmuştur. S420 malzemesine tempcore uygulanması ise beton çeliğinin beklenen özelliklerini olumsuz etkilemiştir [3].

Choi ve ark. 2021 yılında yayımlamış oldukları makalede tempcore işlemi ile üretilen nervürlü inşaat çeliklerinin yüzeyinde temperlenmiş martenzit yapı, çekirdek kısmında ise yavaş soğutma hızından kaynaklanan ferrit-perlit yapı bulunduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, çubuğun mikroyapısı ve temperlenmiş martenzitin alan oranı, sonlu hacim yöntemi ve sürekli soğutma dönüşüm diyagramı kullanılarak tahmin edilmiştir. Tahmin edilen sertleştirilmiş martenzitin alan oranı %6'lık bir hata aralığında bulunmuştur. Ayrıca, mikroyapı ile sertlik arasındaki ilişki, bir temperleme deneyi ile belirlenmiş ve %98'lik bir yakınsama ile sonuçlandırmışlardır. Temperlenmiş martenzitin sertliği başarıyla tahmin edilmiştir [14].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Deney Numunelerinin Oluşturulması

Yapılan deneysel çalışmalar DİLER HOLDİNG bünyesinde faaliyet gösteren Diler Demir Çelik Endüstri ve Ticaret A.Ş. Dilovası tesislerinde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmalar esnasında Diler Demir Çelik'te S220-Mn Yüksek Manganlı olarak nitelendirilen CARES B500B kalitede 150x150x12000mm ebatlarında kütükler tav fırınında tavllanmış daha sonra BS4449:2005 üretim standartlarında haddeleme prosesinden geçirilerek Ø14, Ø20 ve Ø26 mm olarak üretilen nervürlü inşaat çelikleri olarak üretilmişlerdir.

Her çap için yapılan üretimde bazı parametreler ile düzenli olarak değişiklikler yapılmış ve akabinde soğutma platformuna düşen nervürlü inşaat çeliklerinden numuneler alınmıştır. Alınan her numune markalanmış ve saklanmıştır.

Deneylein yapılması esnasında BS4449:2005 üretim standartlarında gelen malzeme ilk numune kabul edilmiştir. Akabinde diğer üçer numunede aşağıdaki parametreler de değişiklikler yapılmıştır;

- **Finiş Tezgâh Hızının Değişimi:**

Finiş tezgâh hızı, standartlara uygun ilk numunedeki hıza göre arttırılmış ya da azaltılmıştır. Tempcore prosesinde sabit tutulan su soğutma borularının adedi değiştirilmeden, finiş tezgâh hızı ile değişim yapılarak, malzemenin su verme süresine etki edilmiştir.

- **Su Debisi Değeri Değişimi:**

Su debisi değeri, standartlara uygun ilk numunedeki değere göre arttırılmış ya da azaltılmıştır. Bu ayar yapılırken vana açıklığı kapatıldı, basınç otomatik olarak yükseldi. Basıncı sabitlemek için pompa motor devri düşürüldü. Bu sayede daha az vana açıklığı fakat aynı basınç şartları altında, düşük debide numune alındı. Yalnız Ø14mm-3 numunesinde ana pompa basınç hattındaki değer değiştirilirken, vana ile debi tekrar $550 \text{ m}^3/h$ ayarlanmaya çalışıldı lakin $510 \text{ m}^3/h$ değerine ayarlanabildi.

- **Basınç Değeri Değişimi:**

Basınç değeri standartlara uygun ilk numunedeki değere göre arttırılmış ya da azaltılmıştır. Basınç değerini arttırmak için pompa motor devir sayısı arttırıldı. Bununla birlikte su debisinde de artma oldu. Vana kısılarak su debisi ilk durum şartındaki su debisi değeri ile eşitlendi ve sadece basınç değeri değiştirilmiş oldu

Numunelerin üretimi esnasında uygulanan parametreler **Tablo 5.1**'de verilmiştir. Tabloda da görüleceği üzere ilk numuneler başlangıç kabul edildiği için gri satırlarda yer almaktadır. Sonrasında hangi numunede hangi parametre değiştirildiyse o hücre kırmızı ile renklendirilmiştir. Numune malzemeleri üretimleri esnasında, tempcore su soğutma kutusuna girdikleri andaki sıcaklıkları ve ızgara platformuna girdikleri andaki sıcaklıkları pirometreler ile ölçülmüştür.

Tablo 5.1: Deney numunelerin oluşturulduğu parametreler.

Numune	Malzeme Ebat	Su Soğtma Boru Ebat	Su Soğtma Boru Adedi	Su Soğtma Boru Metraji (l,1m)	Çubuk Hızı (m/s)	Suya Maruz Kalma Süresi (s)	Su Basıncı (Bar)	Su Debisi (m ³ /h)
Ø14mm-1	Ø 14	Ø 30	7	7,7	11,60	0,66	11,4	550,0
Ø14mm-2	Ø 14	Ø 30	7	7,7	11,60	0,66	11,4	479,0
Ø14mm-3	Ø 14	Ø 30	7	7,7	11,60	0,66	12,4	510,0
Ø14mm-4	Ø 14	Ø 30	7	7,7	10,85	0,71	11,4	550,0
Ø20mm-1	Ø 20	Ø 35	11	12,1	11,00	1,10	10,9	350,0
Ø20mm-2	Ø 20	Ø 35	11	12,1	11,00	1,10	10,9	330,0
Ø20mm-3	Ø 20	Ø 35	11	12,1	11,00	1,10	11,9	350,0
Ø20mm-4	Ø 20	Ø 35	11	12,1	11,50	1,05	10,9	350,0
Ø26mm-1	Ø 26	Ø 45	10	11	6,45	1,71	11,2	310,0
Ø26mm-2	Ø 26	Ø 45	10	11	6,45	1,71	11,2	289,0
Ø26mm-3	Ø 26	Ø 45	10	11	6,45	1,71	12,1	310,0
Ø26mm-4	Ø 26	Ø 45	10	11	6,60	1,67	11,2	310,0

5.2. Deney Numunelerinin Testleri ve İncelemeleri

Deney numuneleri oluşturulduktan sonra Diler Demir Çelik Filmaşın Tesisleri Kalite Kontrol biriminde test ve incelemeleri yapılmıştır.

Deney numuneleri üzerinde yapılan test ve incelemeler şunlardır;

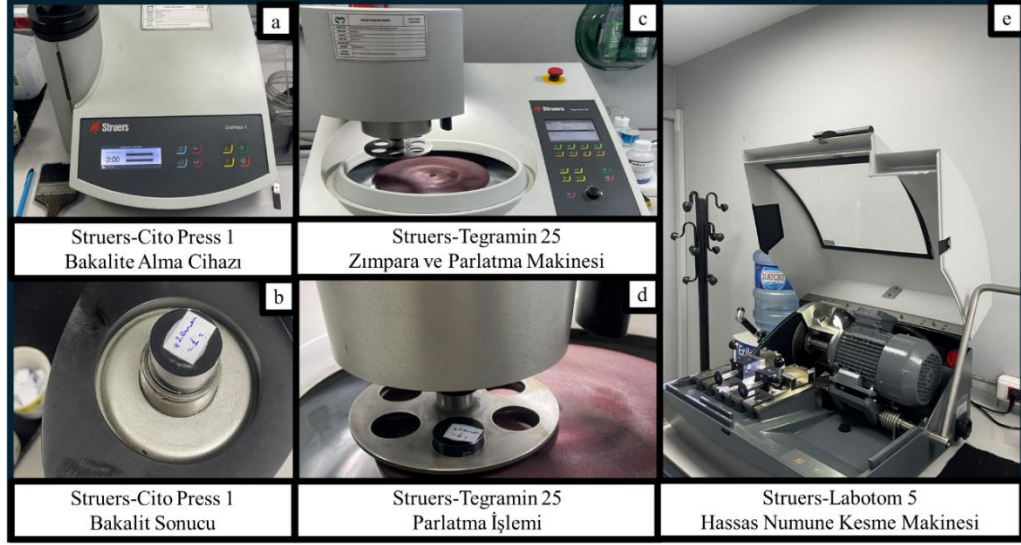
- Akma ve çekme mukavemeti testleri
- Çekirdekten yüzeye sertlik dağılımları
- Numuneler üzerinden martenzit hacim yüzdesinin hesaplanması
- Mikroyapı incelemeleri

5.2.1. Numune Hazırlama Süreci

Deney numunelerinden çekme testi öncesinde, mikroyapı incelemeleri için bir parça kesilmektedir. Kesim işlemi **Şekil 5.1: e'**de görülen Struers markanın Labatom 5 model hassas numune kesme makinesinde yapılmaktadır. Kesilen kısım artık sertlik ölçümü ve mikroyapı incelmesi için hazır hale getirilmek üzere Bakalite alma makinesine gönderilir, numunenin kalan kısmı ise çekme testine gönderilir.

Kesilen parça sertlik dağılımı ve mikroyapı incelemesi için tekrardan bir hazırlık süreci geçirmektedir. Bu hazırlık sürecinde kesilen numune ilk önce bakalite alma işleminden geçer. Bakalite alma işlemi için Struers markanın Cito Press-1 makinesi kullanılmaktadır (**Şekil 5.1: a**). Bakalite alınan numuneler artık zımparalama ve parlatma operasyonu için hazır hale gelir (**Şekil 5.1: b**).

Zımparalama ve parlatma işlemi Struers markanın Tegramin 25 model cihazlarında yapılır (**Şekil 5.1: c**). Bu cihaza alınan bakalitli malzemeler birkaç aşamadan geçer. İlk olarak Silisyum Karbür zımpara ile sadece su desteği ile yaklaşık 1.5 dk. kadar zımparalanır. İkinci olarak, largo adı verilen malzeme ile özel bir solüsyon kullanılarak zımparalama-parlatma arası bir seviyede olacak şekilde işlem görür. Üçüncü aşamada Dac adı verilen bir aparat ile yine özel bir sıvı kullanılarak parlatma işlemi yapılır. Beşinci ve son olarak Nap adı verilen bir aparat ile 1 mikron seviyesinde bir parlatma elde edilir. Beşinci aşamanın görseli **Şekil 5.1: d'**de gösterilmiştir.



Şekil 5.1: a) Struers-Cito Press 1 bakalite alma cihazı. b) Struers-Cito Press 1 bakalit işlemi sonucu. c) Struers-Tegramin 25 zımparalama ve parlatma makinesi. d) Struers-Tegramin 25 parlatma işlemi. e) Struers-Labatom 5 hassas numune kesme makinesi.

5.2.2. Akma ve Çekme Mukavemet Testleri

Diler Demir Çelik Filmaşın Tesisleri Kalite Kontrol biriminde akma ve çekme mukavemetlerinin ölçümü için kullanılan cihaz marka ve modeli Zwick/ROELL markanın Z1600 modelidir. Cihaz en fazla 160 Ton çekme gücüne sahip olmakla birlikte farklı çap ölçülerinin çekme testini yapabilmektedir. Cihazın görseli **Şekil 5.2:** a'da verilmiştir.

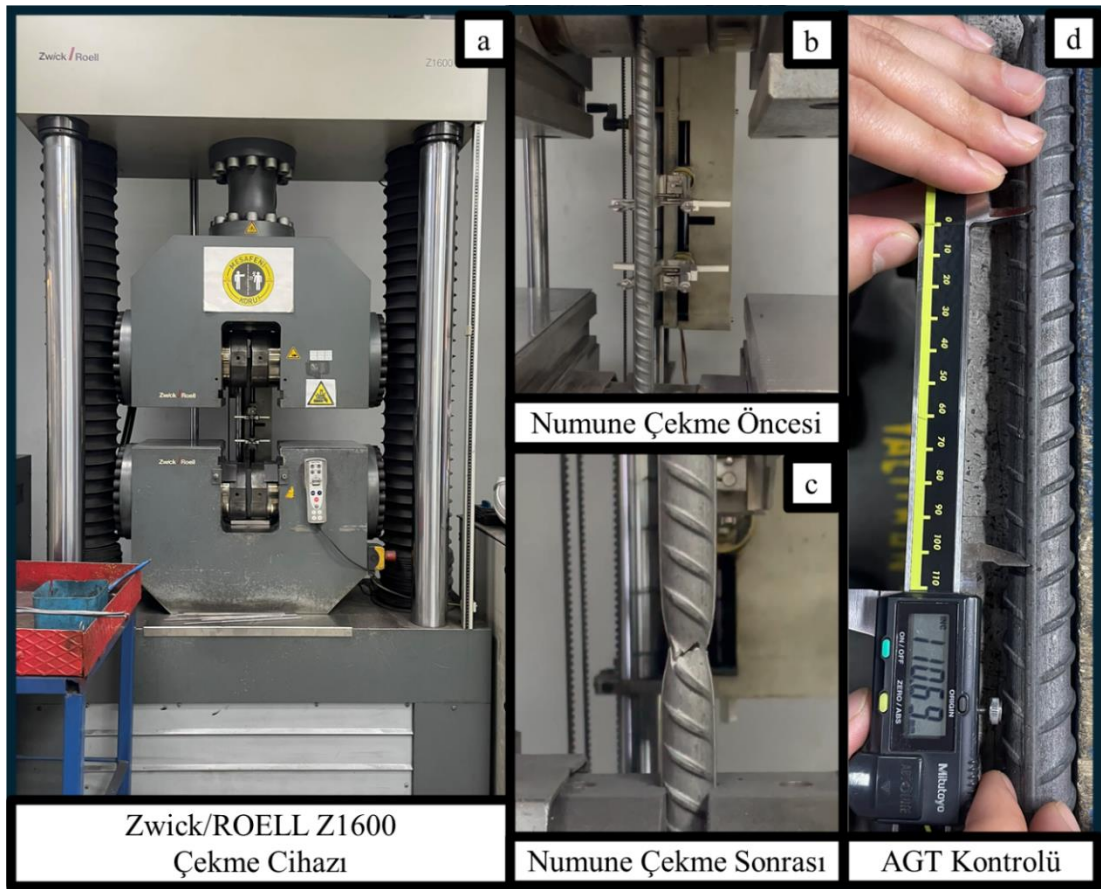
Cihaz üzerinde bir extansiyometre bulunmaktadır. Bu extansiyometre sayesinde numune çekilmeye başladıktan sonra en ufak kesit daralmasını algılar ve akma noktasının başlangıcını çok daha hassas belirleyebilir.

Cihazda çekme öncesinde Extansiyometreler bağlanır ve kopma gerçekleşene kadar cihaz çalışmaya devam eder. Kopma gerçekleştiği esnada cihaz durur. Akabinde ölçtüğü tüm verileri kendi bilgisayar programına aktarır. Bu sayede çekme eğrisi ve içerdiği tüm parametrelerin değeri hem grafik hem tablo olarak saklanır. **Şekil 5.2:** b ve **Şekil 5.2:** c'de numunenin çekme testi öncesi ve sonrası durumları gösterilmiştir.

Cihaz kullanılmadan önce numunenin uzun tarafının en dip noktasından 5 cm gerisinden başlamak koşulu ile numune üzerinde 1'er cm ara ile 10 adet iz bırakılır. Toplamda 10 cm'lik alan işaretlenmiş olur.

Cihazda çekme işlemi yaptıktan sonra uzun kısımda boyca uzama da meydana gelir. En yüksek kuvvet altında gerçekleşen göreceli toplam boyca uzama miktarına AGT denir [25]. Boyca uzama miktarı ilk durum boyu ile karşılaştırılır. Sonrasında çekme gerilmesine bağlı bir fonksiyonda Denklem 5.1'deki gibi ifade edilir. Bulunan değer AGT değeri olarak bilinmektedir. Bu yapılan ölçüm ve hesaplama ile de yüzdesel olarak uzama miktarı konusunda bilgi edinilmiş olur. AGT değerinin ölçülmesi ile alakalı görsel **Şekil 5.2:** d'de verilmiştir.

$$AGT = \left\{ \left(\frac{l_{son} - l_{ilk}}{100} \right) + \left(\frac{\sigma_{\epsilon}}{2 \times 10^5} \right) \right\} \times 100 \quad (5.1)$$



Şekil 5.2: a) Zwick/ROELL Z1600 çekme cihazı. b) Numune çekme testi öncesi. c) Numune çekme testi sonrası. d) AGT ölçümü.

Tüm numunelerin akma ve çekme testleri ve AGT değerleri ölçülmüştür. Buna göre aşağıdaki **Tablo 5.2** oluşmuştur.

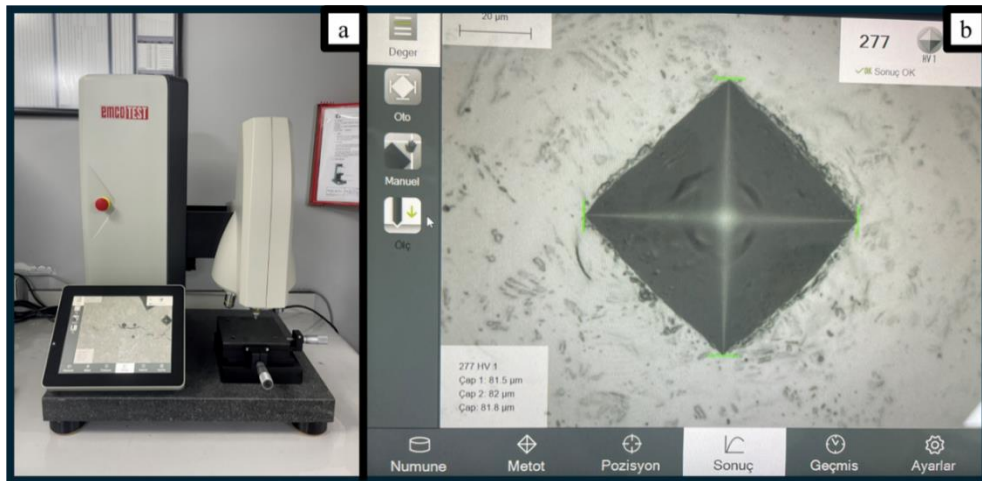
Tablo 5.2: Numunelerin akma, çekme testleri ve AGT sonuçları tablosu.

Numune	Akma Muk.	Çekme Muk.	İlk Boy (mm)	AGT Ölçülen	AGT Sonuç
Ø14mm-1	596,00	702	70,00	112,76	13,11
Ø14mm-2	509,00	626	70,00	113,93	14,24
Ø14mm-3	519,00	635	70,00	113,17	13,49
Ø14mm-4	630,00	727	70,00	107,7	8,06
Ø20mm-1	576,00	677	100,00	110,69	11,03
Ø20mm-2	574,00	685	100,00	111,5	11,84
Ø20mm-3	571,00	677	100,00	111,43	11,77
Ø20mm-4	564,00	664	100,00	111,01	11,34
Ø26mm-1	595,00	686	100,00	106,12	6,46
Ø26mm-2	586,00	676	100,00	107,43	7,77
Ø26mm-3	604,00	710	100,00	106,02	6,38
Ø26mm-4	593,00	698	100,00	106,2	6,55

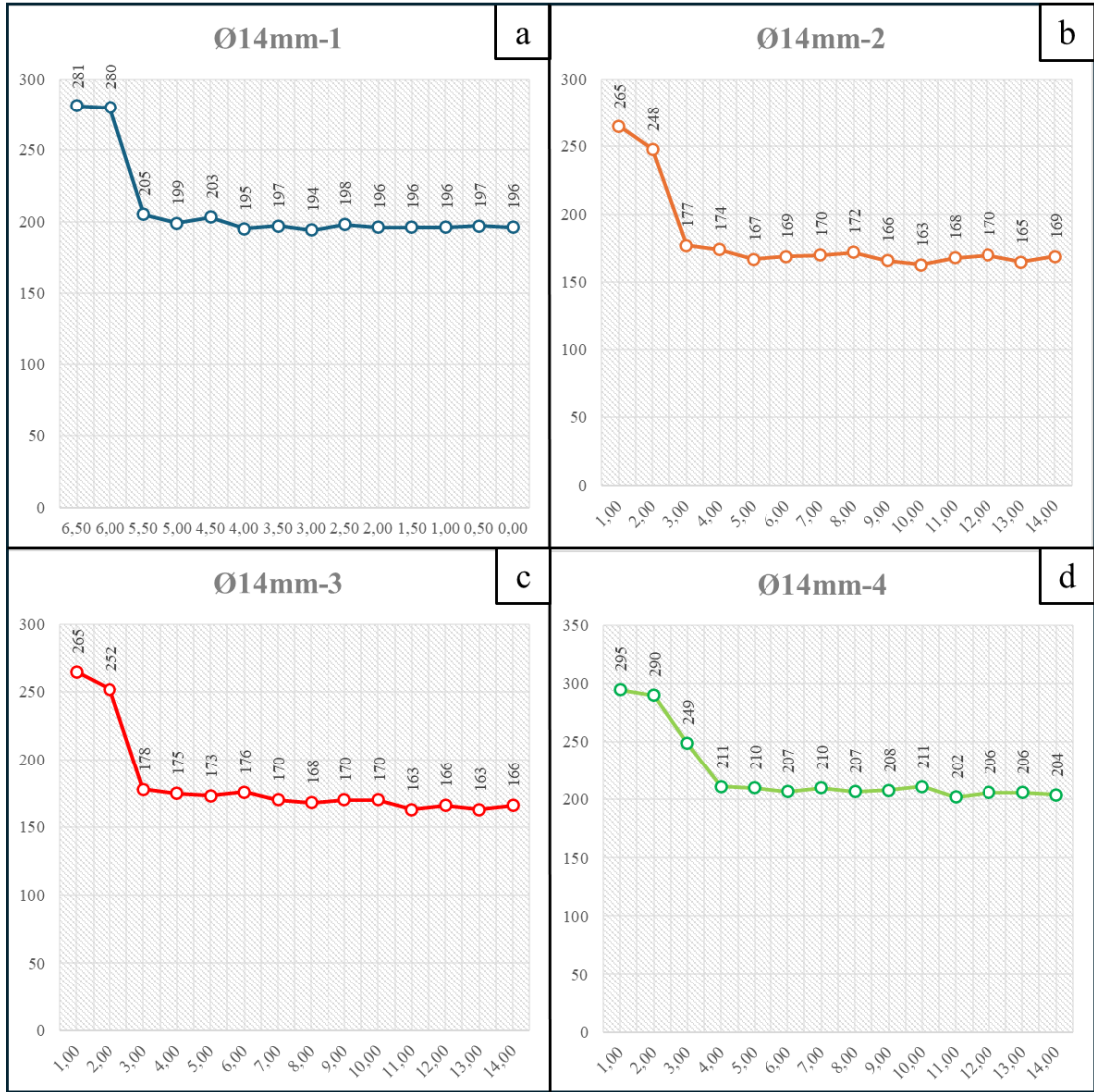
5.2.3. Çekirdekten Yüzeye Sertlik Dağılımları

Çekirdekten yüzeye kadar olan sertlik dağılımı için Diler Demir Çelik Filmaşın Tesisleri Kalite Kontrol biriminde kullanılan Vickers sertlik ölçüm cihazı olan EMCO Test marka Durascan model cihaz kullanılmıştır. Cihaz 10 gramdan (Hv 0,01) 60 kilograma (Hv 60) kadar vuruşlar ile test yapabilmektedir. Cihazın çalışma aralığında Hv 0,01 ile Hv 0,2 aralığında yapılan testler mikro Vickers olarak geçmektedir. Hv 5 ve üstünde yapılan testler ise normal Vickers testleridir.

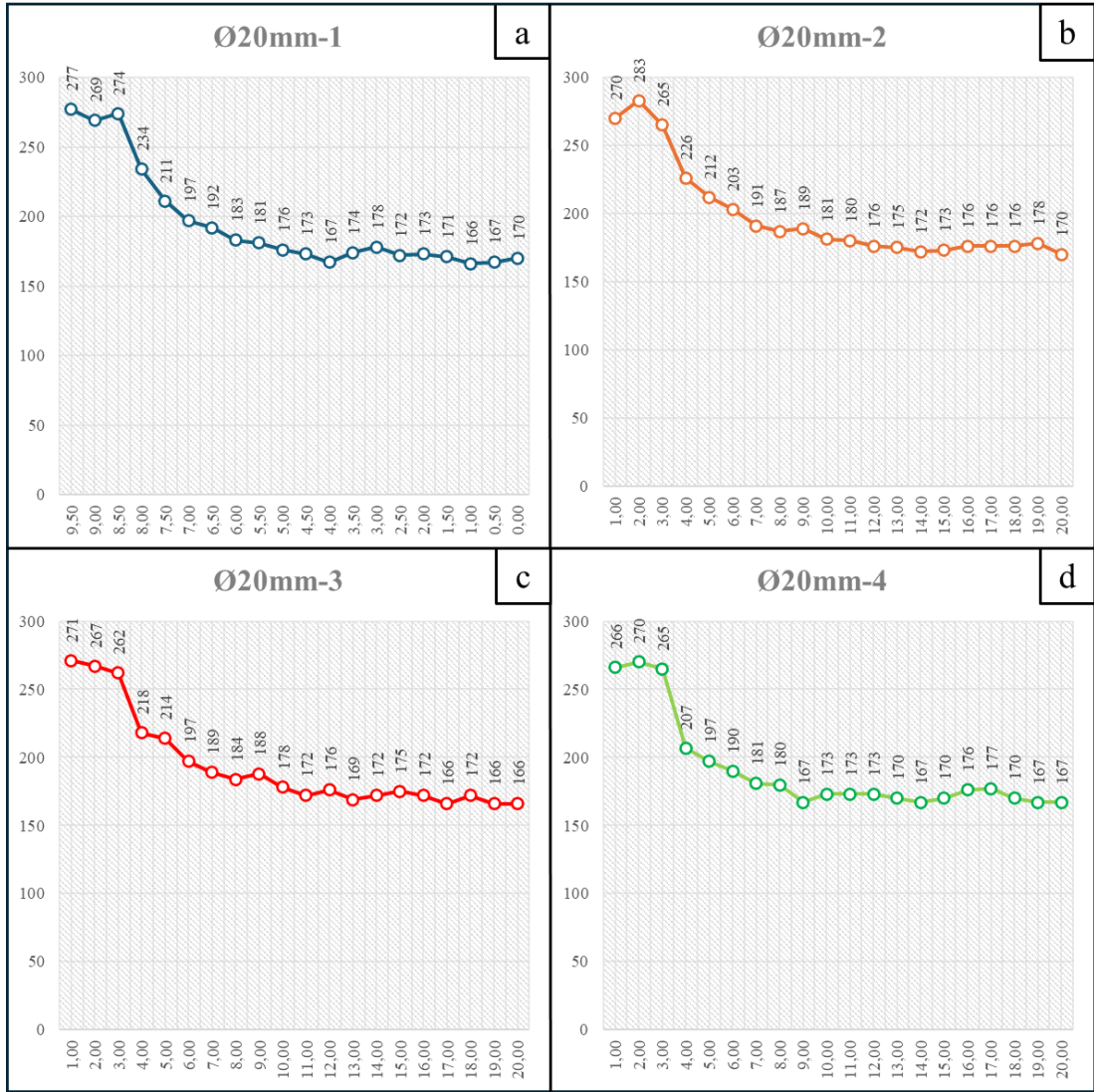
Çalışmamızda ortaya çıkan numuneler 10 kilogram yükteki vuruşlar ile (Hv1) test edilmiştir.



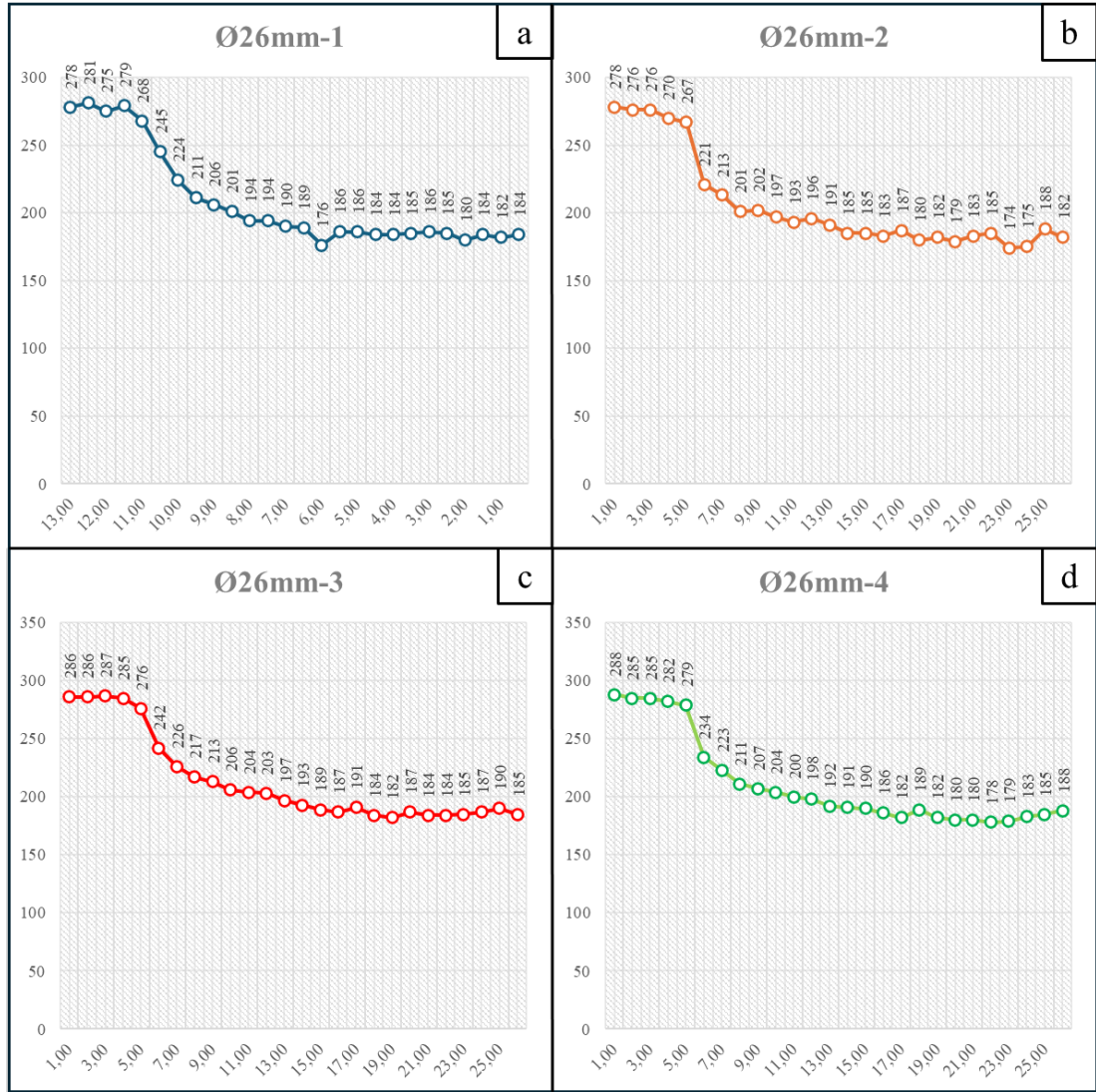
Şekil 5.3: a) EMCO test Vickers sertlik ölçüm cihazı. b) Sertlik ölçme anı.



Şekil 5.4: a) Ø14mm-1 sertlik dağılımı. b) Ø14mm-2 sertlik dağılımı. c) Ø14mm-3 sertlik dağılımı. d) Ø14mm-4 sertlik dağılımı.



Şekil 5.5: a) Ø20mm-1 sertlik dağılımı. b) Ø20mm-2 sertlik dağılımı. c) Ø20mm-3 sertlik dağılımı. d) Ø20mm-4 sertlik dağılımı.



Şekil 5.6: a) Ø26mm-1 sertlik dağılımı. b) Ø26mm-2 sertlik dağılımı. c) Ø26mm-3 sertlik dağılımı. d) Ø26mm-4 sertlik dağılımı.

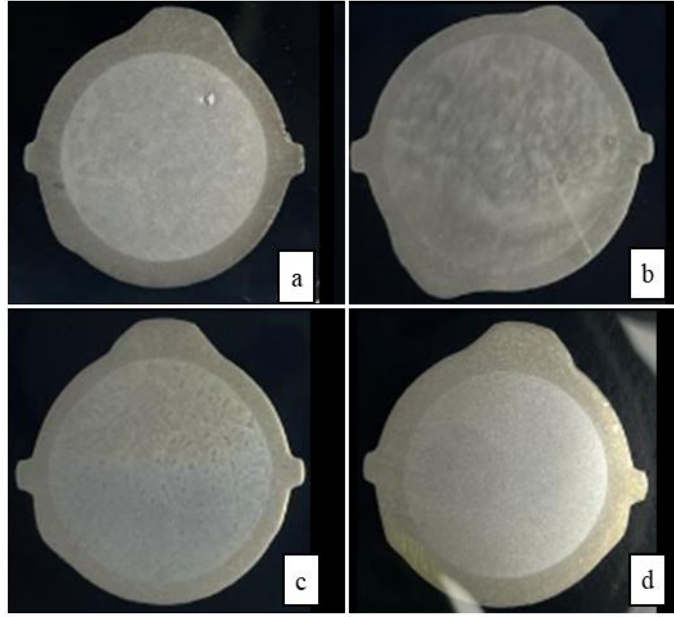
5.2.4. Deney Numuneleri Üzerinden Martenzit Hacim Yüzdelerinin Hesaplanması

Bakalite alınan numuneler tarayıcı üzerine konulup taramaları gerçekleştirildi. Görüntüler tek tek AutoCAD LT 2024 programına atıldı. Burada çubukların dış kabuk ölçüleri, çekirdekten martenzite kadar olan çap ölçüleri çizildi. Sonrasında ilgili numunenin üzerinden dış çap ölçüsü alınarak hizalama yapıldı. AutoCAD programı alan hesaplama özelliği sayesinde martenzit hacim yüzdeleri hesaplandı.

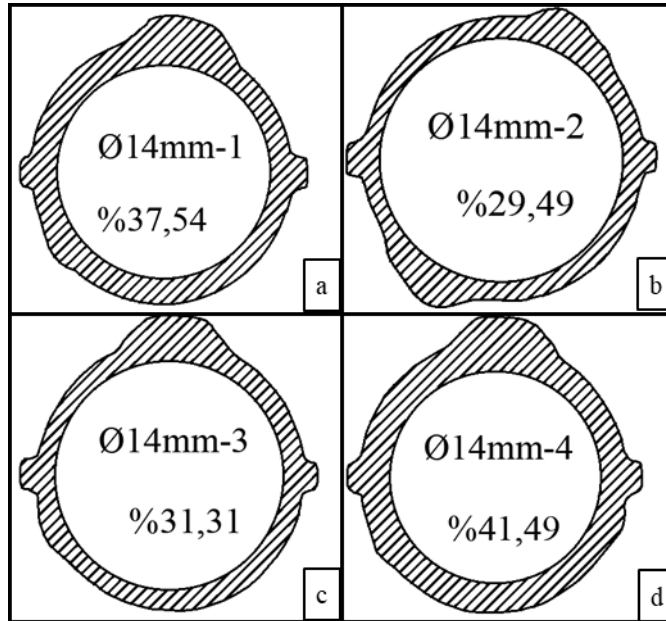
Tüm numunelerin AutoCAD LT 2024 Programından yararlanılarak hesaplanan martenzit hacim yüzdeleri **Tablo 5.3**'teki gibidir.

Tablo 5.3: Deney numunelerinin hesaplanan martenzit hacim oranları.

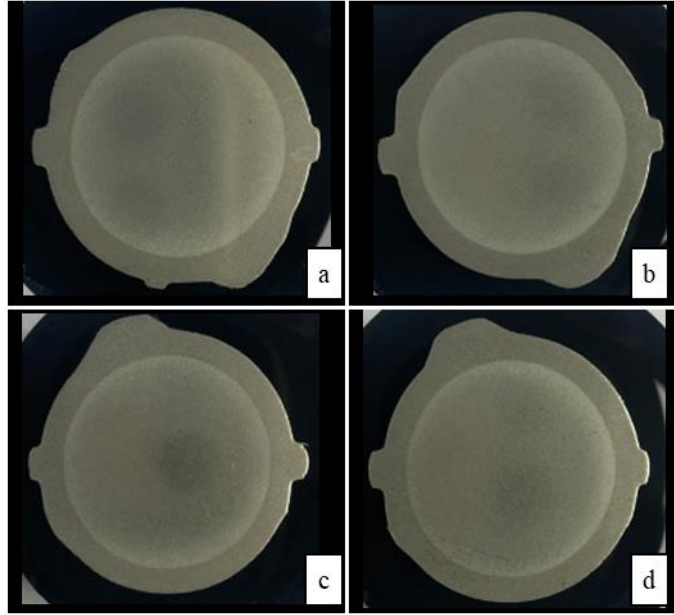
Numune	% Martenzit Hacim Oranı Deneysel
Ø14mm-1	37,54%
Ø14mm-2	29,49%
Ø14mm-3	31,31%
Ø14mm-4	41,49%
Ø20mm-1	37,98%
Ø20mm-2	37,72%
Ø20mm-3	37,62%
Ø20mm-4	37,88%
Ø26mm-1	26,45%
Ø26mm-2	24,86%
Ø26mm-3	26,88%
Ø26mm-4	25,96%



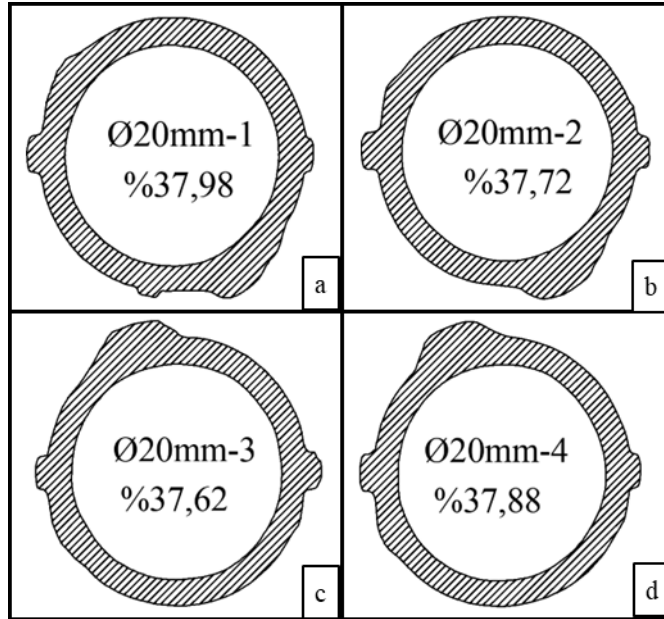
Şekil 5.7: a) Ø14mm-1 bakalit numunesi. b) Ø14mm-2 bakalit numunesi. c) Ø14mm-3 bakalit numunesi. d) Ø14mm-4 bakalit numunesi.



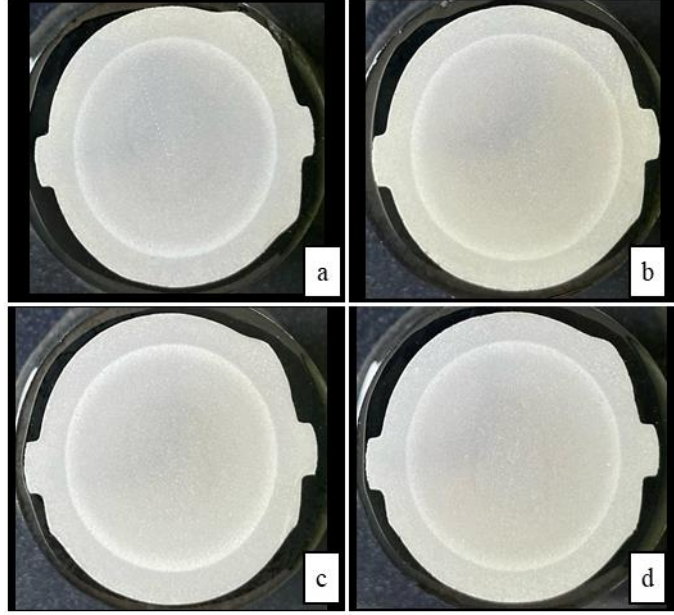
Şekil 5.8: a) Ø14mm-1 martenzit hacim yüzdesi. b) Ø14mm-2 martenzit hacim yüzdesi. c) Ø14mm-3 martenzit hacim yüzdesi. d) Ø14mm- martenzit hacim yüzdesi.



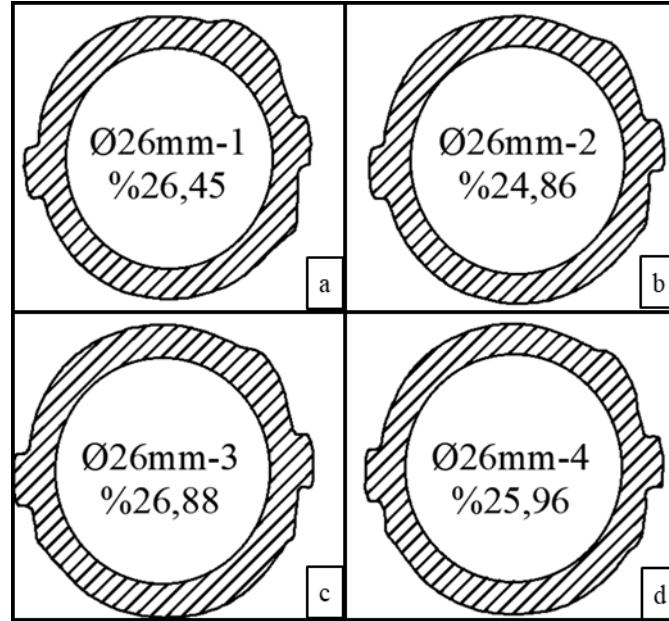
Şekil 5.9: a) Ø20mm-1 bakalit numunesi. b) Ø20mm-2 bakalit numunesi. c) Ø20mm-3 bakalit numunesi. d) Ø20mm-4 bakalit numunesi.



Şekil 5.10: a) Ø20mm-1 martenzit hacim yüzdesi. b) Ø20mm-2 martenzit hacim yüzdesi. c) Ø20mm-3 martenzit hacim yüzdesi. d) Ø20mm- martenzit hacim yüzdesi.



Şekil 5.11: a) Ø26mm-1 bakalit numunesi. b) Ø26mm-2 bakalit numunesi. c) Ø26mm-3 bakalit numunesi. d) Ø26mm-4 bakalit numunesi.



Şekil 5.12: a) Ø26mm-1 martenzit hacim yüzdesi. b) Ø26mm-2 martenzit hacim yüzdesi. c) Ø26mm-3 martenzit hacim yüzdesi. d) Ø26mm- martenzit hacim yüzdesi.

5.2.5. Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri

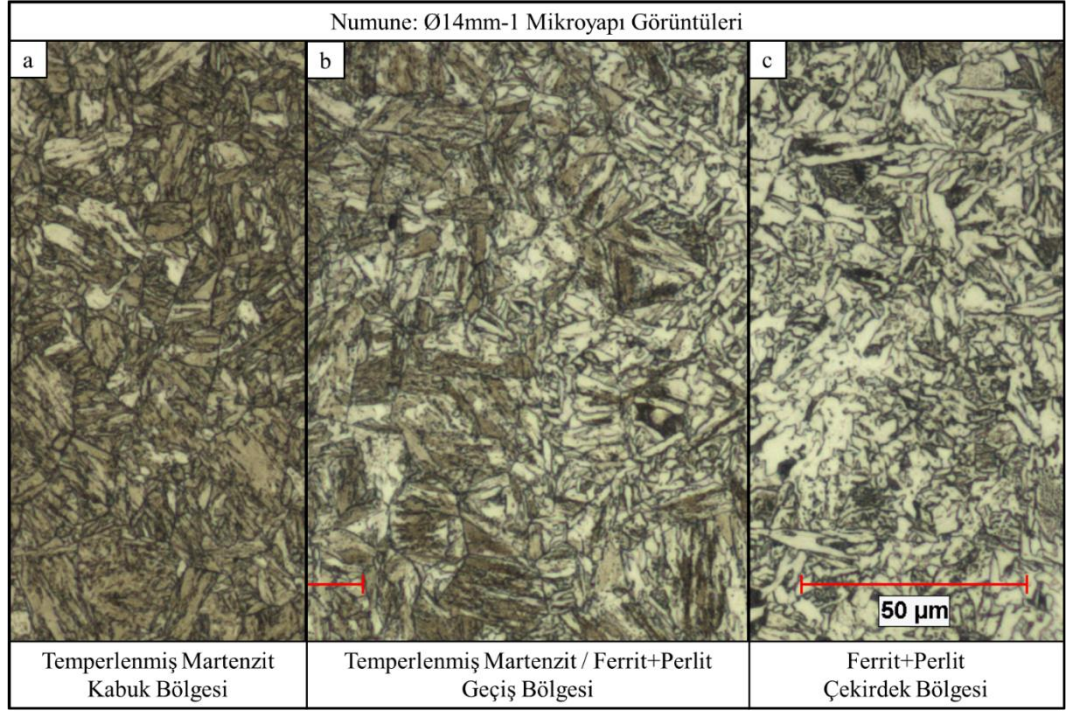
Bakalite alınan numuneler mikroyapı incelemesi öncesinde dağlama denilen bir işleme daha tabi tutulurlar. Dađlama; bakalit numunesinin yüzeyine %3 nitrik asit, %97 etil alkol oranlı bir sıvı dökülerek yüzeydeki parlatma çok daha iyi bir hale getiriliyor. Nitrik asit ve etil alkol oranlarına göre aldığı isim nitrik asitte bağlı olarak veriliyor. Örnek olarak yukarıda bahsi geçen dağlama sıvısı %3 derişiklikte bir sıvıdır.

Bakalit numunesinde dağlama işlemi gerçekleştirildikten sonra numuneler optik mikroskoba götürülür. Diler Demir Çelik Filmaşın Tesisleri Kalite Kontrol biriminde Olympus marka BX51M model optik mikroskop vardır. Optik mikroskop sayesinde incelenen numunelerinin tane boyutlarına, faz dağlılımlarına, dekarbürizasyon olup olmadığına rahatlıkla bakılabilmektedir.

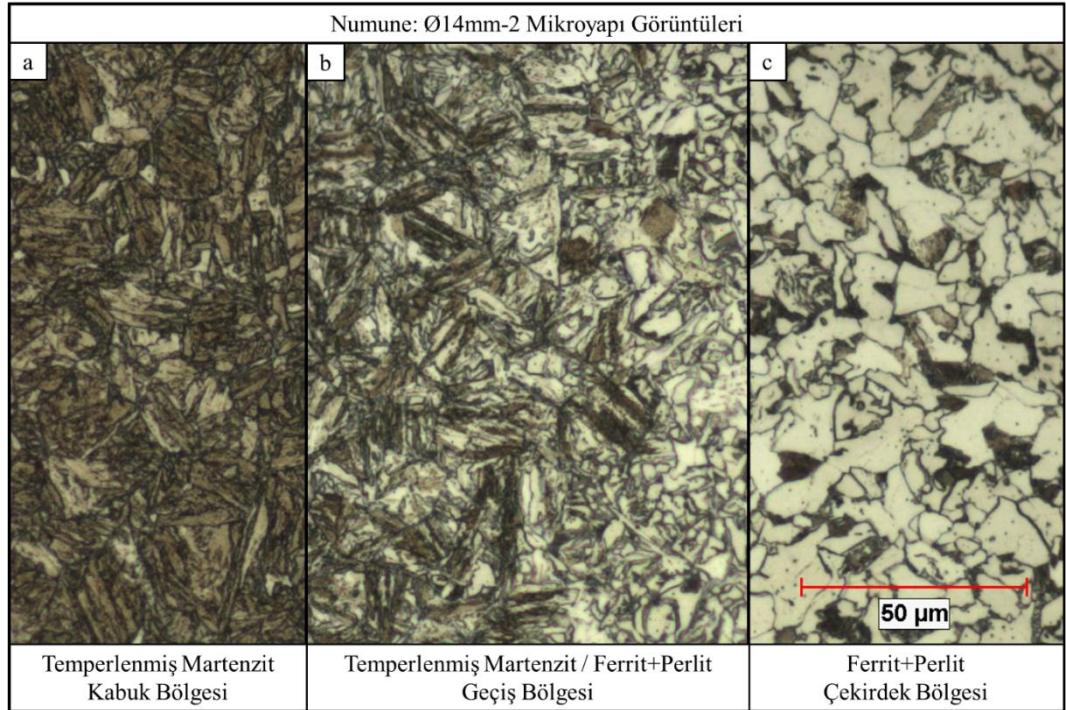
Optik mikroskop kendi başına x25 ila x500 büyütme yapabiliyorken, bu optik mikroskopa bağlı Clemex marka kamera ve onunla çalışabilen bir bilgisayar yazılımı mevcuttur. Clemex kamera sayesinde büyütme kabiliyeti x125 ila x1500 büyütmeye kadar çıkarılabilmektedir. Deney numunelerimiz x250 yakınlaştırmaya ile gözlemlenmiştir.



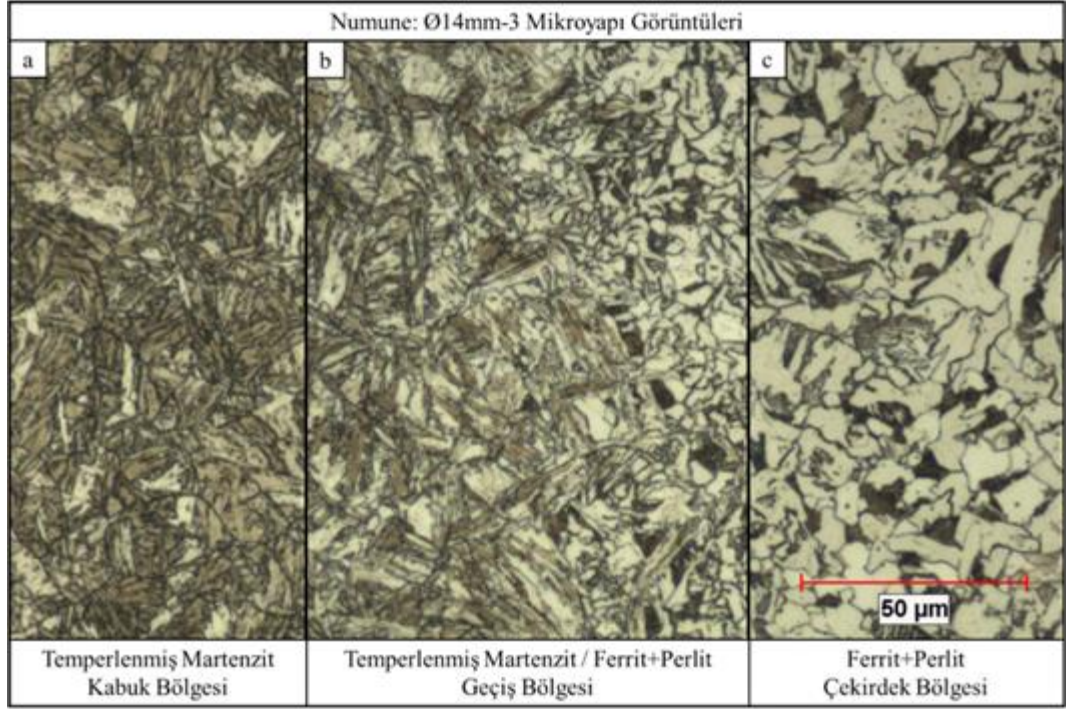
Şekil 5.13: Olympus BX51M ve Clemex kamera.



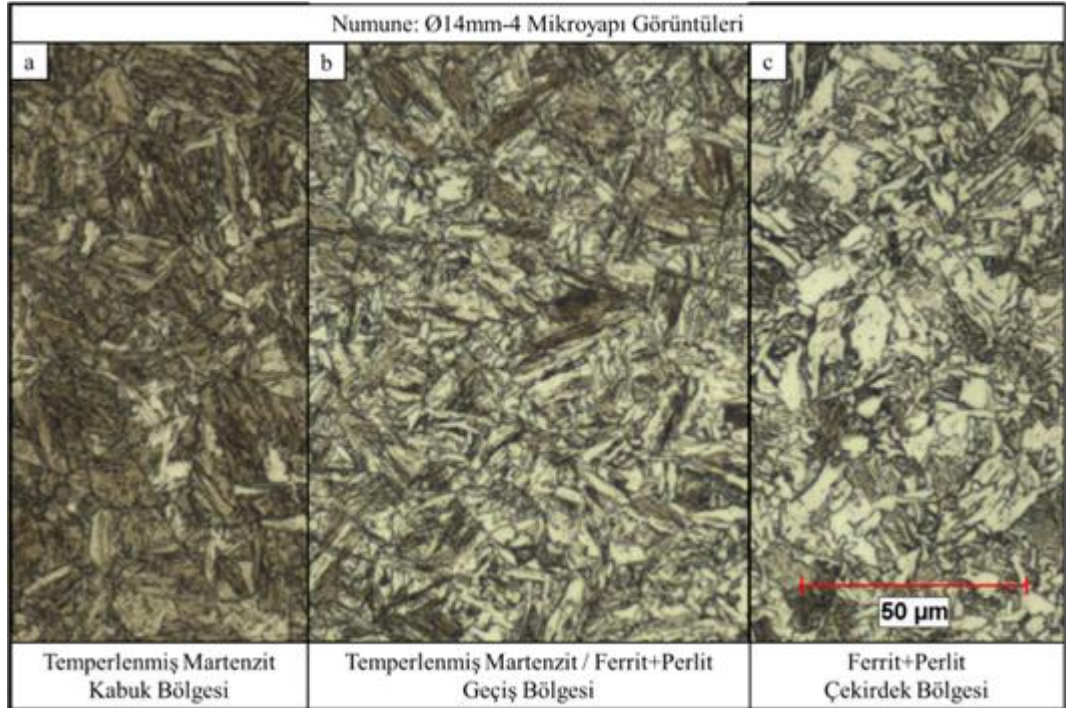
Şekil 5.14: a) Ø14mm-1 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø14mm-1 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø14mm-1 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri



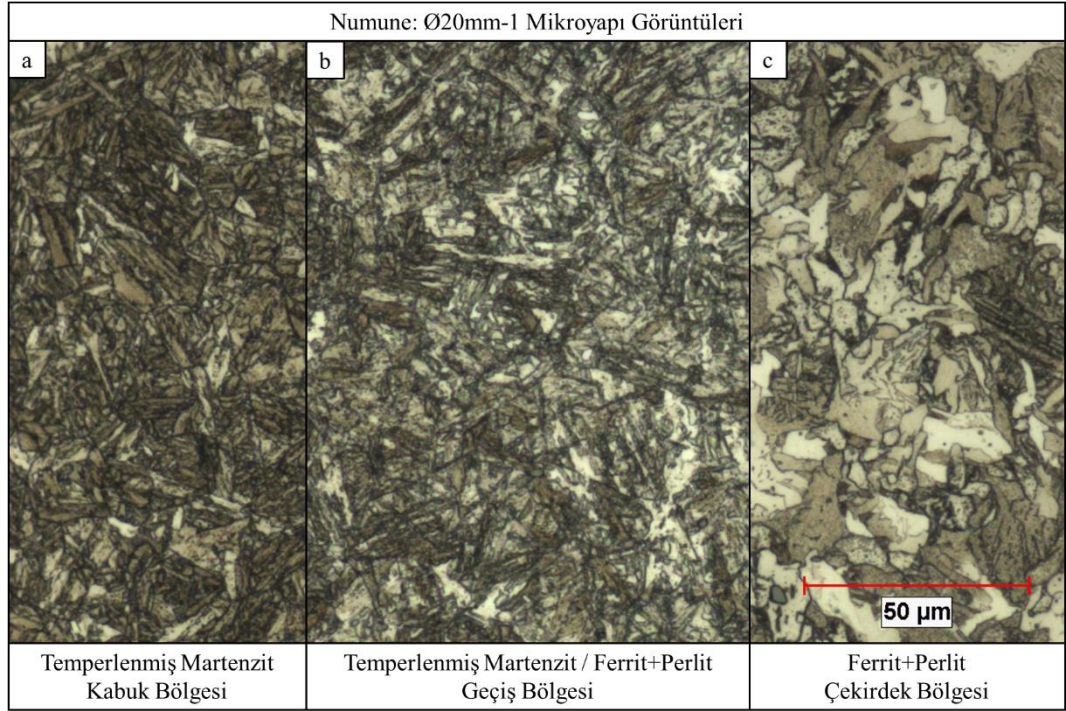
Şekil 5.15: a) Ø14mm-2 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø14mm-2 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø14mm-2 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.



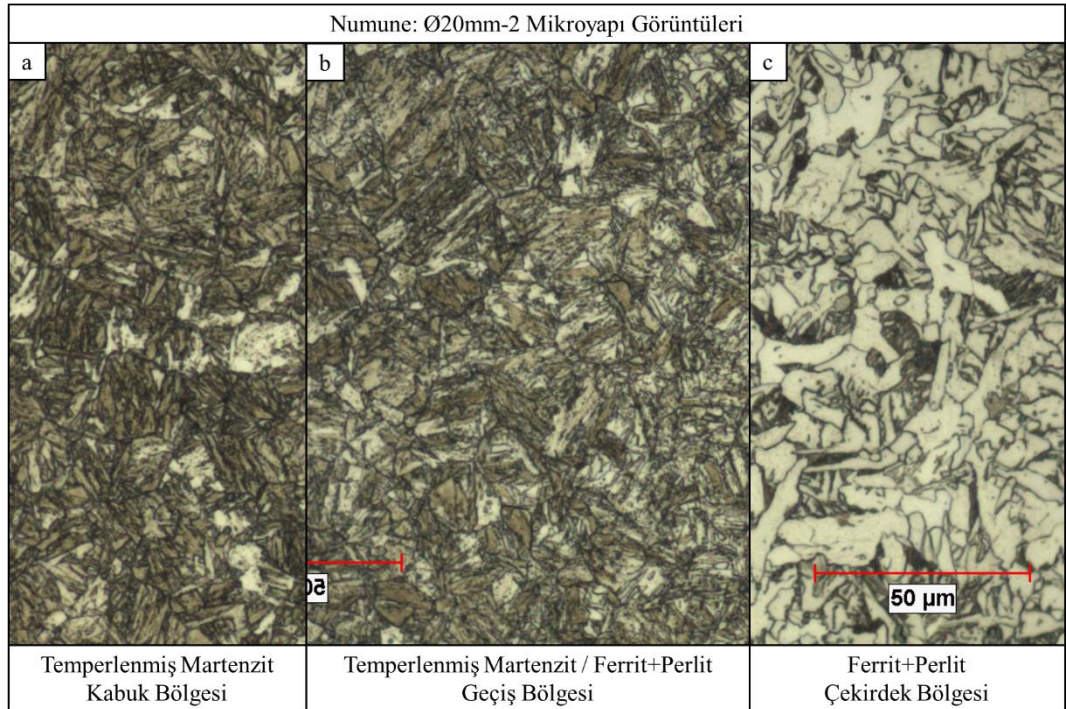
Şekil 5.16: a) Ø14mm-3 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø14mm-3 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø14mm-3 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.



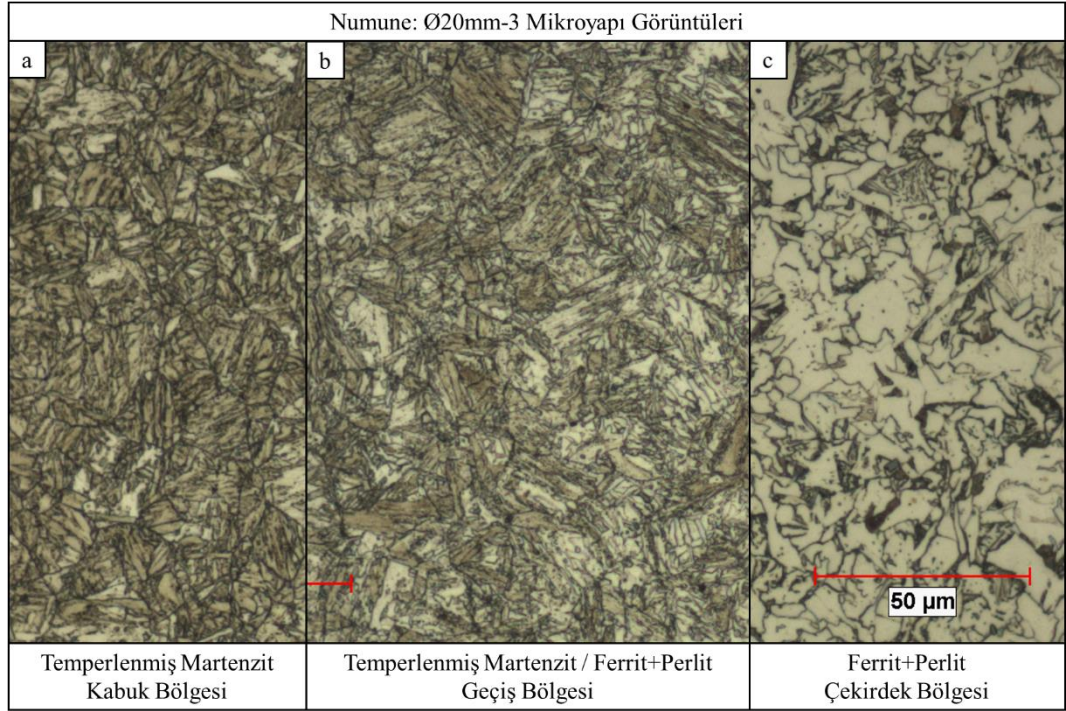
Şekil 5.17: a) Ø14mm-4 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø14mm-4 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø14mm-4 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri..



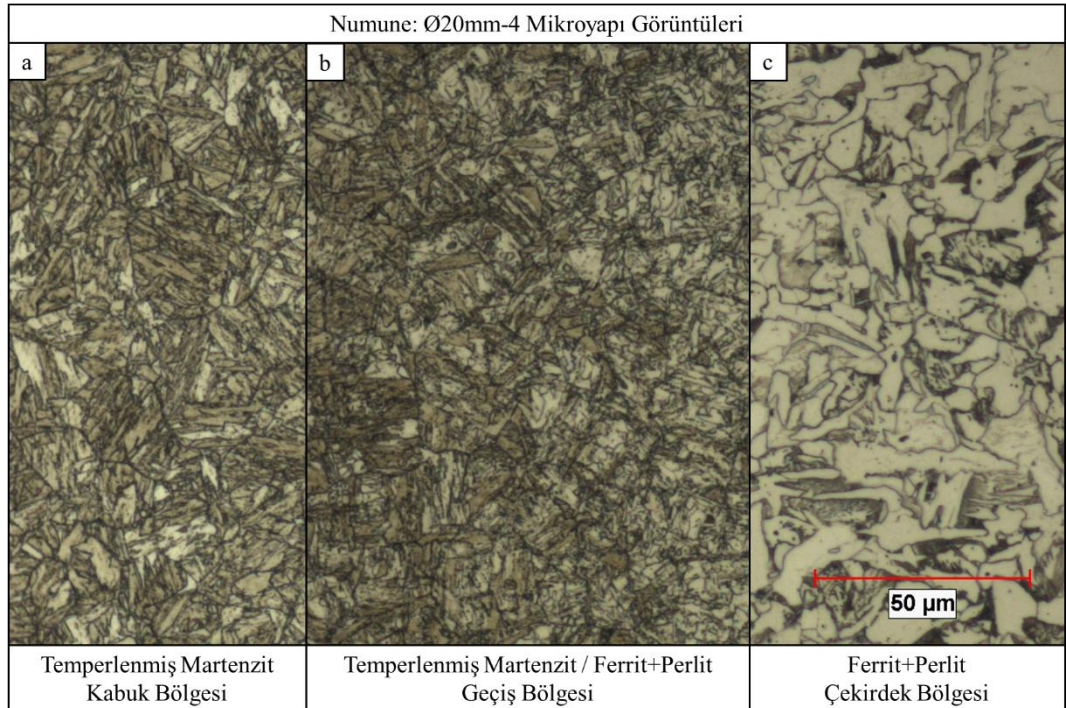
Şekil 5.18: a) Ø20mm-1 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø20mm-1 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø20mm-1 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.



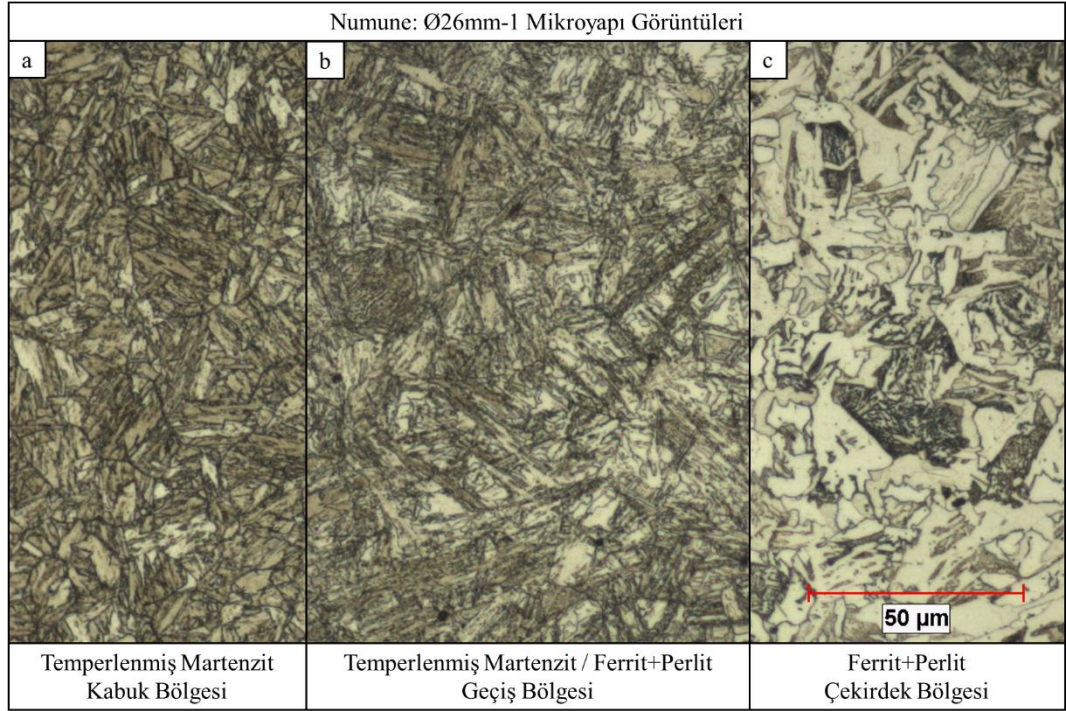
Şekil 5.19: a) Ø20mm-2 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø20mm-2 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø20mm-2 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.



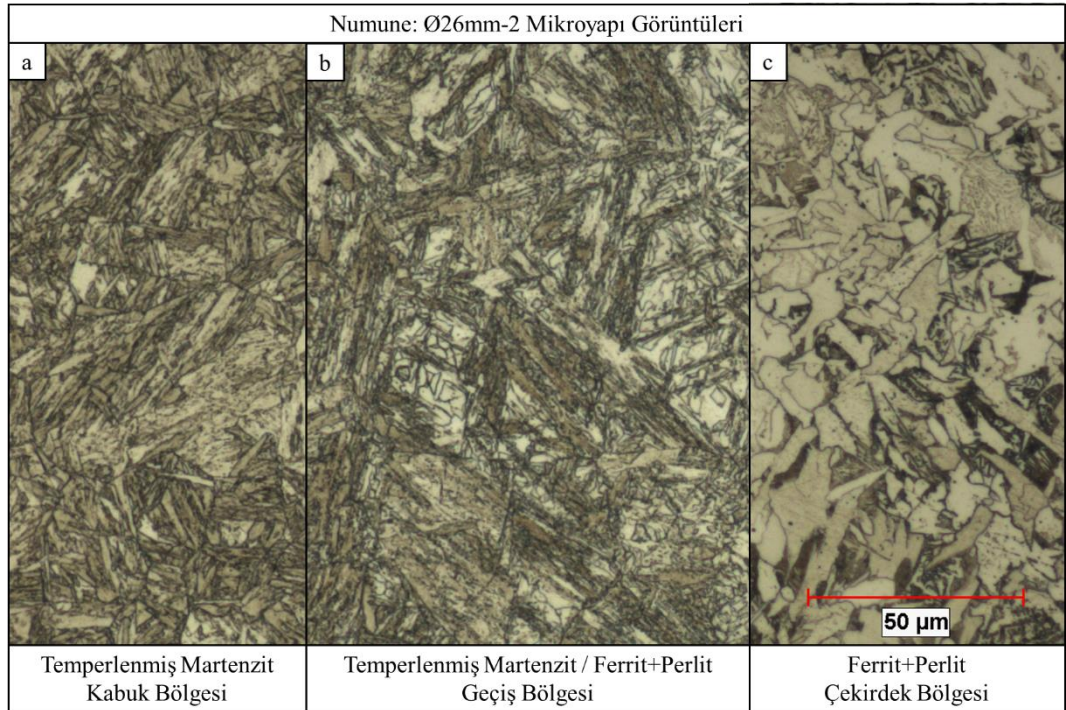
Şekil 5.20: a) Ø20mm-3 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø20mm-3 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø20mm-3 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.



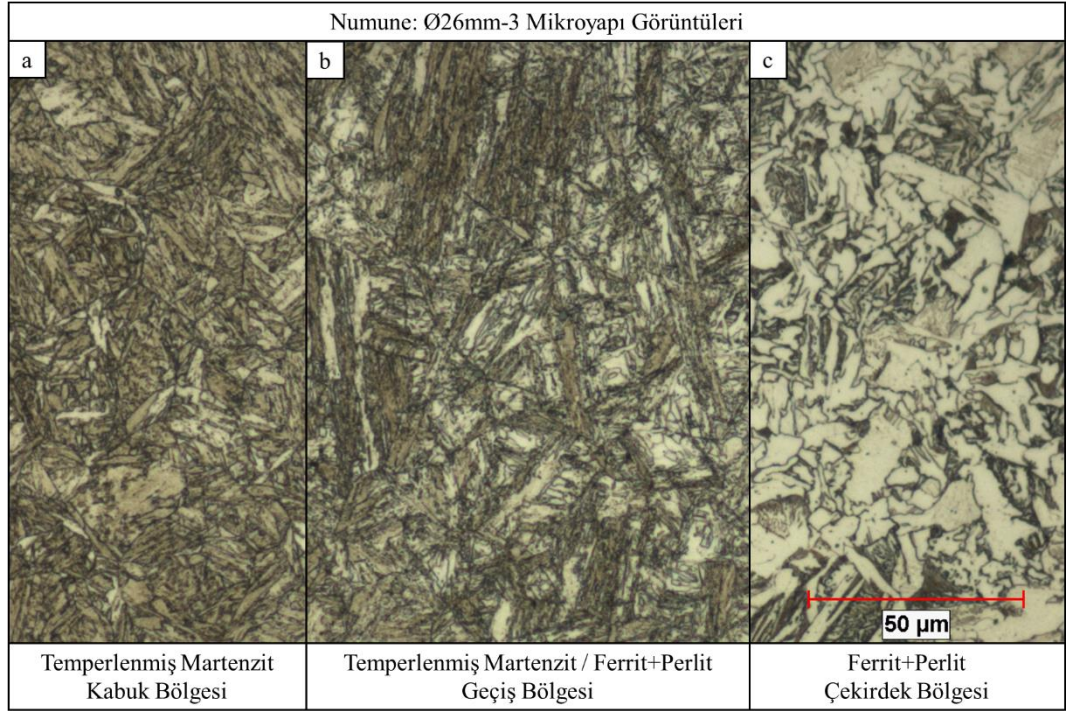
Şekil 5.21: a) Ø20mm-4 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø20mm-4 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø20mm-4 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.



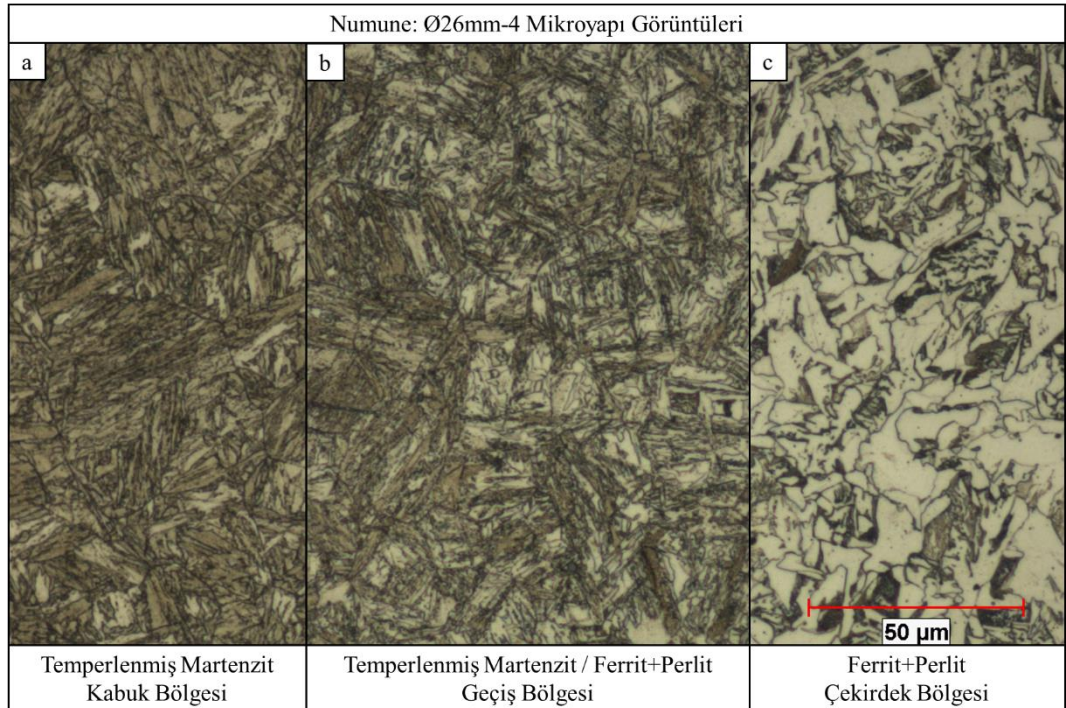
Şekil 5.22: a) Ø26mm-1 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø26mm-1 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø26mm-1 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.



Şekil 5.23: a) Ø26mm-2 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø26mm-2 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø26mm-2 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.



Şekil 5.24: a) Ø26mm-3 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø26mm-3 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø26mm-3 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri.



Şekil 5.25: a) Ø26mm-4 numunesi temperlenmiş martenzit. b) Ø26mm-4 numunesi temperlenmiş martenzit / ferrit+perlit geçiş bölgesi. c) Ø26mm-4 numunesi ferrit+perlit çekirdek bölgesi 250 yakınlaştırmalı Optik Mikroskop görüntüleri..

5.3. Haddelme Parametrelerinin Martenzit Hacim Oranına Etkilerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi

Deneysel çalışmaların yapılması esnasında, 5.1 numaralı başlık altında işlenen Deney Numunelerinin Oluşturulması konusu altında yer alan **Tablo 5.1'** deki gibi her çapta farklı parametreler ile deney numuneleri oluşturulmuştur.

Sonlu elemanlar analizlerinin yapılması için ANSYS 2024 programı kullanılmıştır.

Tempcore prosesinde su verme esnasında gerçekleşen durum, ısı transfer mekanizmalarından, konveksiyon ile ısı transferi mekanizmasıdır. Bu bağlamda ANSYS programında her bir çubuk için geometrik tasarımlar yapılmış ve “Transient Thermal Analysis” modülü çalıştırılmıştır. Bu modül içerisine de konveksiyon ile ısı transferi yöntemi eklenmiştir.

Konveksiyon ile ısı transfer mekanizması için hesaplama modülünün bizden beklediği değerlerden biri ise $(\bar{h})$, konveksiyonla toplam ortalama taşınım katsayısıdır. $[W/m^2K]$.

Konveksiyonla toplam ortalama taşınım katsayısı değerinin her numune için hesaplanabilmesi adına bir matematiksel hesaplama modülü oluşturulmuştur.

Hesaplama sonucuna göre çıkan $(\bar{h})$ değerleri ANSYS programına girilmiştir.

ANSYS Programında ihtiyaç olan diğer değerler ise malzemenin ilk giriş sıcaklık bilgisi ve verilen suyun sıcaklık bilgisidir. Deneysel çalışmalarda, malzemenin tempcore prosesine giriş sıcaklığı her numune için 1000 °C ve soğutma uygulayan suyun sıcaklığı ise 22 °C olarak ölçülmüş ve bu değerler programa girilmiştir.

ANSYS programında istenen koşullarda oluşturulan modelleme çalıştırılmış ve sıcaklık dağılım görselleri ve grafikleri oluşmuştur. Su verme süresine göre oluşan grafikte o an için oluşan sıcaklık dağılım görseli alınmıştır. Alınan sıcaklık dağılım görseli AutoCAD LT 2024 programına aktarılmış ve burada görsel üzerinde oluşan sıcaklık hareleri dairesel çizimleri oluşturulmuştur.

Bu noktada martenzit alanın başlayıp bittiği noktaları kısımları belirlemek önemlidir. Dış katman martenzitin başladığı noktanın başlangıcı olarak kabul edilmiştir.

Martenzitin bittiği nokta ise, martenzit başlangıç sıcaklığının, oluşan görselde nereye denk geldiğine göre değişmektedir.

Dolayısı ile bu noktada martenzit başlangıç sıcaklığının da teorik olarak hesaplamaları yapılmıştır.

ANSYS görsellerinde yer alan sıcaklık dağılımlarında oluşan harelerden, dış katmanda oluşan daire ve martenzit başlangıç sıcaklığına yaklaşık olarak oluşan hare için AutoCAD LT 2024 programında çizilen daireler belirlenmiştir. Dış katman ile martenzitin bittiği daire alanı ve martenzit katmanının daire alanı, AutoCAD LT 2024'te hesaplatılmıştır. Bu iki arasındaki alan tüm alana oranlanarak, martenzit hacim yüzdesi yaklaşık olarak hesaplanmıştır.

5.3.1. Haddelme Parametrelerine göre Toplam Ortalama Taşınım Katsayısının Matematiksel Hesaplama Modülünün Oluşturulması

Toplam ortalama taşınım katsayısının her numune için hesaplanabilmesi adına Microsoft Office Excel programında bir çalışma sayfası oluşturulmuştur. 3.2 numaralı başlık altında işlenen Nervürlü İnşaat Demirlerinin Üretiminde Isı Transfer Mekanizmaları konusunda yer alan (3.29), (3.30), (3.31), (3.32), (3.33), (3.34), (3.35), (3.36) ve (3.37) numaralı denklemlerden yararlanılarak hesaplamalar yaptırılmıştır.

Örnek olarak, deney numunelerinden Ø14mm-4 numunesi için, 10,85 m/s hızda giden Ø14 malzemenin 30mm iç çaplı 7 adet su soğutma borusu içerisinde 550 m³/saat su debisi ile su soğutmasına maruz kalması esnasında oluşan toplam ortalama taşınım katsayısının hesaplanması ile alakalı görsel **Şekil 5.26**'da verilmiştir.

DEĞİŞKEN PARAMETRELER	Rc (m)	0,030
	Rb (m)	0,014
	Q toplam su debisi (m ³ /sa)	550
	N nozul sayısı	7
	Vçubuk (m/s)	10,85
SABİT DEĞERLER	Su yoğunluğu	1
	Suyun dinamik vizkozitesi	6,57E-07
	Prandtl sayısı	4,34
	kw termal iletkenlik	6,06E-01
HESAPLANAN DEĞERLER	Q toplam su debisi (m ³ /sn)	7,64E-02
	A (m ²)	2,21E-03
	Q her nozuldaki su debisi (m ³ /sn)	1,09E-02
	Vsu	4,94
	Vbağıl	5,91
	Islak çevre	1,38E-01
	Dh	6,40E-02
	Reynold Sayısı	576.036,85
	$\bar{h}$ (Toplam Ortalama Taşınım Katsayısı) (0<Re<5000) (W/m ² C)	2.275,76
	$\bar{h}$ (Toplam Ortalama Taşınım Katsayısı) (0<Re<5000) (W/m ² C)	22.654,53

Şekil 5.26: Ø14mm-4 numunesi için h hesaplanmasının yapıldığı Excel hesaplaması.

Bu hesaplama modülünde hadde parametreleri değişken parametreler olduğu kısımlara girilmektedir. Değişken hadde parametreleri **Tablo 5.4**'te gösterilmiştir.

Sabit değerler kısmında yer alan suyun dinamik vizkozitesi $0,657 \times 10^{-6}$ m²/sn olarak alınmıştır. Prandtl sayısı 4,34 ve su için termal iletkenlik değeri kw ise 0,606 W/mK olarak ele alınmıştır [23].

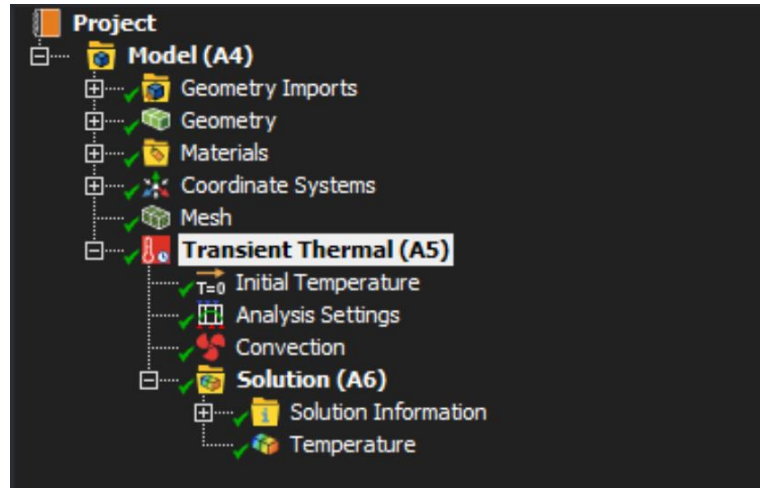
Tüm deney numuneleri için gerçekleşen hadde parametrelerine göre tek tek toplam ortalama taşınım katsayıları hesaplatılmış ve Reynolds sayısının değerine göre seçimi yapılmıştır. Bulunan değerler **Tablo 5.4**'te gösterilmiştir.

Tablo 5.4: Deney numunelerinin hesaplanan toplam ortalama taşınım katsayıları.

Numune	Malzeme Ebat	Su Soğtma Boru Ebat	Su Soğtma Boru Adedi	Su Soğtma Boru Metrajı (l,1m)	Çubuk Hızı (m/s)	Suya Maruz Kalma Süresi (s)	Su Basıncı (Bar)	Su Debisi (m ³ /h)	Toplam Ortalama Taşınım Katsayısı $\bar{h}$ (W/m ² C)
Ø14mm-1	Ø 14	Ø 30	7	7,7	11,60	0,66	11,4	550,0	24925,0
Ø14mm-2	Ø 14	Ø 30	7	7,7	11,60	0,66	11,4	479,0	27051,0
Ø14mm-3	Ø 14	Ø 30	7	7,7	11,60	0,66	12,4	510,0	24925,0
Ø14mm-4	Ø 14	Ø 30	7	7,7	10,85	0,71	11,4	550,0	22634,0
Ø20mm-1	Ø 20	Ø 35	11	12,1	11,00	1,10	10,9	350,0	28015,0
Ø20mm-2	Ø 20	Ø 35	11	12,1	11,00	1,10	10,9	330,0	28590,0
Ø20mm-3	Ø 20	Ø 35	11	12,1	11,00	1,10	11,9	350,0	28015,0
Ø20mm-4	Ø 20	Ø 35	11	12,1	11,50	1,05	10,9	350,0	29483,0
Ø26mm-1	Ø 26	Ø 45	10	11	6,45	1,71	11,2	310,0	17332,0
Ø26mm-2	Ø 26	Ø 45	10	11	6,45	1,71	11,2	289,0	17763,0
Ø26mm-3	Ø 26	Ø 45	10	11	6,45	1,71	12,1	310,0	17332,0
Ø26mm-4	Ø 26	Ø 45	10	11	6,60	1,67	11,2	310,0	17802,0

5.3.2. ANSYS Programı Termal Analizleri

ANSYS programında kurgulanan ve çalıştırılan analiz modülünün görseli Şekil 5.27’te verilmiştir.



Şekil 5.27: ANSYS Programı hesaplama yöntemi görseli.

Program için ilk önce her numunenin geometrik şekli oluşturulmuştur. Akabinde her numunenin Mesh tasarımı ayarlanmıştır.

Numunelerin sıcaklık girdi değerleri 1000 °C olarak belirlenmiştir. Sonrasında analizin hangi adımlarla kaç saniyede tamamlanması gerektiği (suya maruz kalma süresi) bilgileri **Tablo 5.1**'deki verilerden yola çıkılarak girilmiştir.

Konveksiyon adımı malzemeye temas eden su bilgileri girilmiştir. Bu adımda suyun sıcaklık değeri 22 °C olarak girilmiştir. Ayrıca yine burada malzeme ve suyun temas ettiği yüzey belirlenmiş ve **5.3.1** başlığında anlatıldığı gibi hesaplanıp bulunan toplam ortalama taşınım katsayısı olan h değeri her bir numune için girilmiştir.

Girilen tüm bilgiler ışığında her bir numune için program ayrı ayrı çalıştırılmış ve ardından martenzit başlangıç sıcaklık değerinin teorik hesaplamasına geçilmiştir.

5.3.3. Martenzit Başlangıç Sıcaklık Değerinin Teorik Hesaplaması

Martenzit başlangıç sıcaklığı, haddelenen malzemenin kimyasal kompozisyonundaki materyallerin yüzdesel oranlarına bağlı bir sıcaklık değeridir. Bu konuda literatürde de çeşitli ampirik formüller üretilerek yakınsak bir sıcaklık değeri hesaplanmaya çalışılmıştır.

Yapmış olduğumuz deneysel çalışmalarda S220-Mn Yüksek Mangan içerikli olarak nitelendirilen CARES B500B kalitede 150x150x12000mm ebatlarında kütükler kullanılmıştır.

Diler Demir Çelik firmasının kimya laboratuvarlarında, deneylerde kullanılan kütükler ile aynı döküm numarasına sahip kütüklerden numune alınmış ve kimyasal analizleri yapılmış. Kimyasal analizleri **Tablo 5.5**'te gösterilmiştir.

Tablo 5.5: S220-Mn kimyasal analiz tablosu.

S220-Mn Yüksek Manganlı Kütük Kimyasal Analiz Tablosu				
%C	%Si	%S	%P	%Mn
0,21	0,3	0,017	0,017	1,23
%Ni	%Cr	%Mo	%V	%Cu
0,11	0,14	0,018	0,0051	0,53
%W	%Sn	%Co	%Al	%Alsol
0,004	0,025	0,01	0,0047	0,0044
%Alinsol	Alsol / Al	%Pb	%B	%Bsol
0,0003	0,94	0,0031	0,0002	0,0002
%Binsol	%Sb	%Nb	%Ca	%Casol
0	0,007	0,003	0,001	0,0007
%Cainsol	%Zn	%N	%Ti	%Tisol
0,0003	0,0093	0,0073	0,0026	0,0026
%Fe	%Ce _q	%Radyasyon		
97,341	0,49	10		

Daha öncesinde **3.1.5.1** numaralı başlık altında işlenen Martenzit Yapı Başlangıç Sıcaklığı konusunda yer alan **(3.3)**, **(3.4)**, **(3.5)**, **(3.6)** ve **(3.7)** numaralı denklemlerden yararlanılarak hesaplamalar yaptırılmıştır. Yapılan bu hesaplamalara göre 5 farklı ampirik formül sonucunun da kendi aralarında farklı değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre en düşük 369 °C olurken en yüksek değer de 406,8 °C olmuştur. Hesaplama yaptırılan Excel sayfasının örnek görseli **Şekil 5.28**'de verilmiştir.

Element		Martenzit Başlangıç Sıcaklığı	
C	0,23	Ms1	406,8
Mn	1,23	Ms2	400,4
Cr	0,14	Ms3	397,0
Ni	0,11	Ms4	375,4
Mo	0,018	Ms5	369,0
Si	0,017		
Cu	0,53		

Şekil 5.28: Martenzit Başlangıç Sıcaklığı hesaplama.

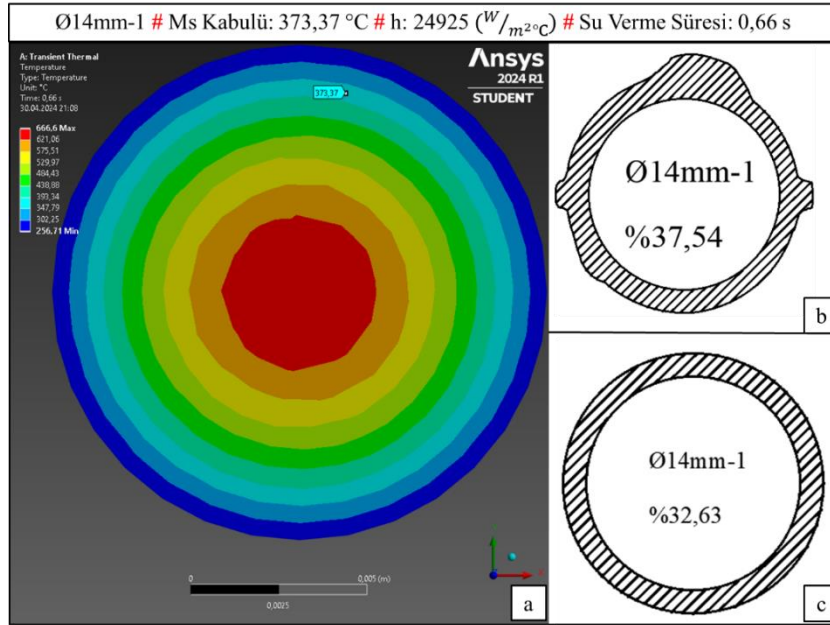
5.3.4. ANSYS Analiz Sonuçlarının AutoCAD Programında İşlenerek DeneySEL Sonuçlar ile Karşılaştırılması

ANSYS analizleri sonucu, tüm numuneler için sıcaklık dağılımları oluşturulmuştur. Oluşan sıcaklık dağılım görselinin en dışındaki dairesel yüzey martenzit tabakanın başlangıcı olarak kabul edilmiştir. Martenzit tabakanın bittiği daire ise **5.3.3.** başlığında, **Şekil 5.28**'de hesaplanan değerlerden belirlenmiştir. Literatürde en sık kullanılan ampirik denklem, **(3.7)** denklemdir. Bu denkleme göre hesaplanan değer 369 °C'dir.

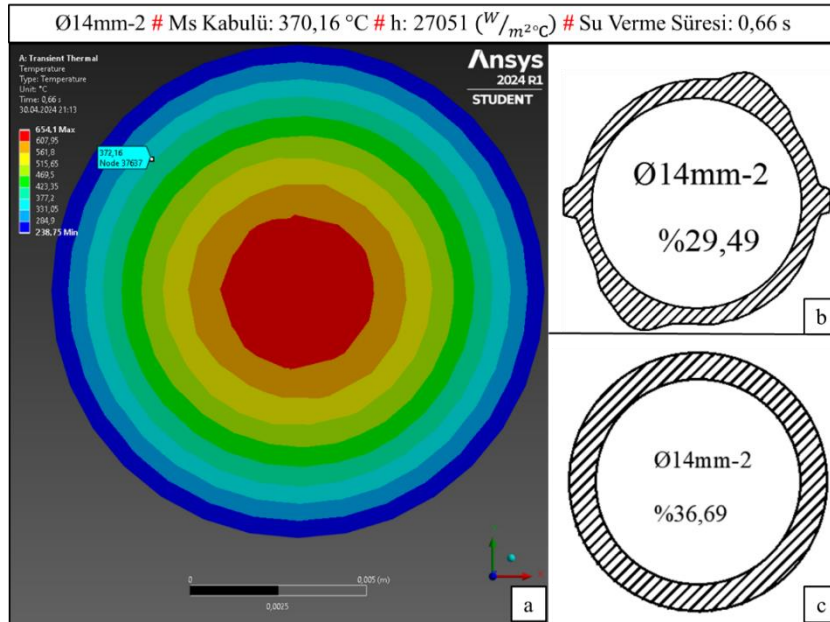
ANSYS programında oluşan mesh kalitesine göre sıcaklık değerleri, tek bir değer üzerinden bulunamamaktadır. Bu çalışma yapılırken 369 °C baz alınmış ve mümkün mertebede bu sıcaklığa en yakın sıcaklık noktaları seçilmiştir. Bu yöntem ile tüm deney numuneleri içerisinde en düşük sıcaklık noktası 369,23°C, en yüksek sıcaklık noktası ise 373,87 °C olarak belirlenmiştir.

Tüm bunlardan yola çıkılarak, görselin en dış daire çapı martenzit alanın başlangıcı, martenzit başlangıç sıcaklığının ortalama 369 °C olduğu nokta ise bittiği noktayı

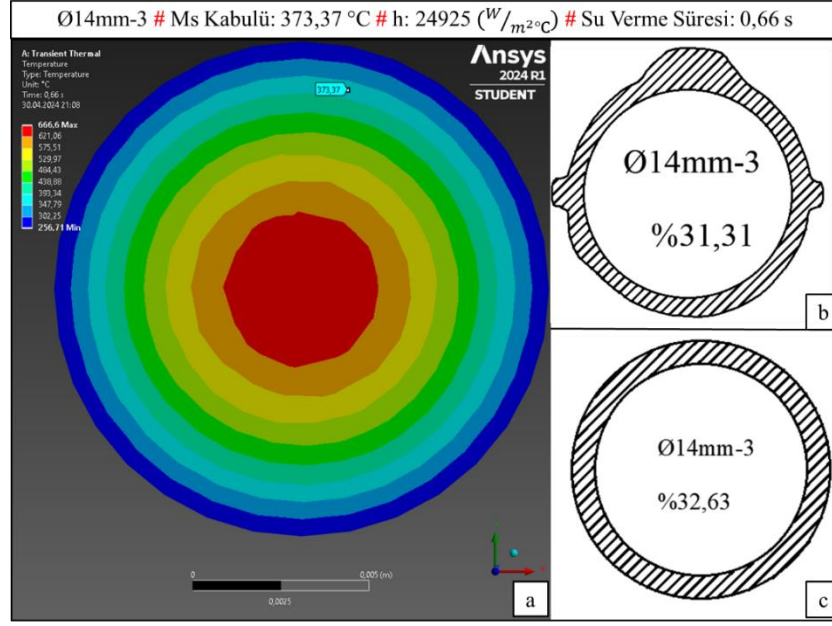
belirtmektedir. Bu bağlamda tüm numune görselleri AutoCAD programına atılmış ve martenzit hacim oranları belirlenmiştir.



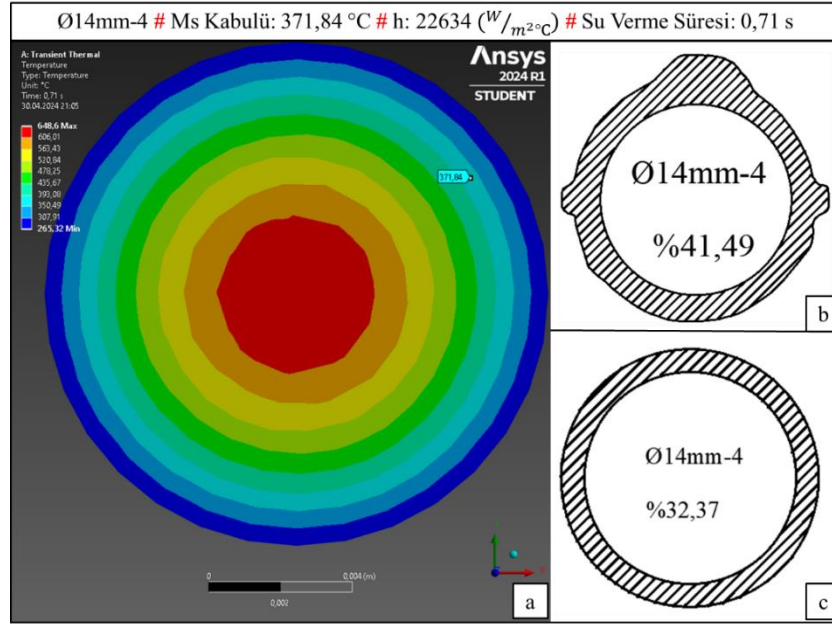
Şekil 5.29: a) Ø14mm-1 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø14mm-1 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø14mm-1 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.



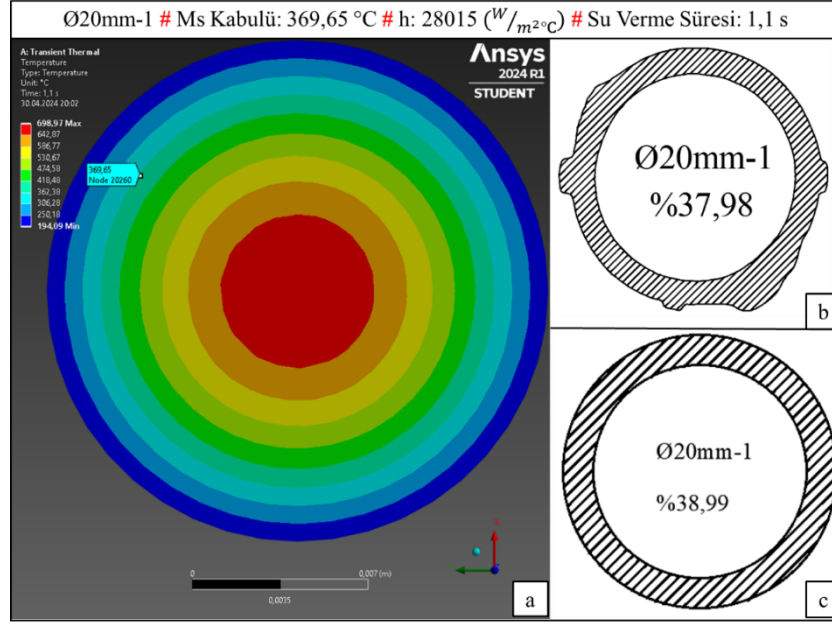
Şekil 5.30: a) Ø14mm-2 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø14mm-2 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø14mm-2 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.



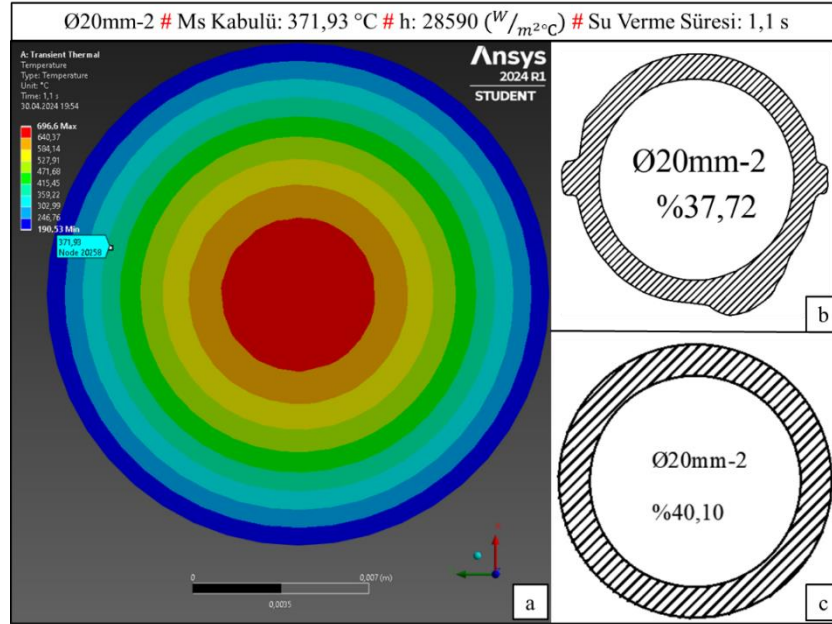
Şekil 5.31: a) Ø14mm-3 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø14mm-3 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø14mm-3 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.



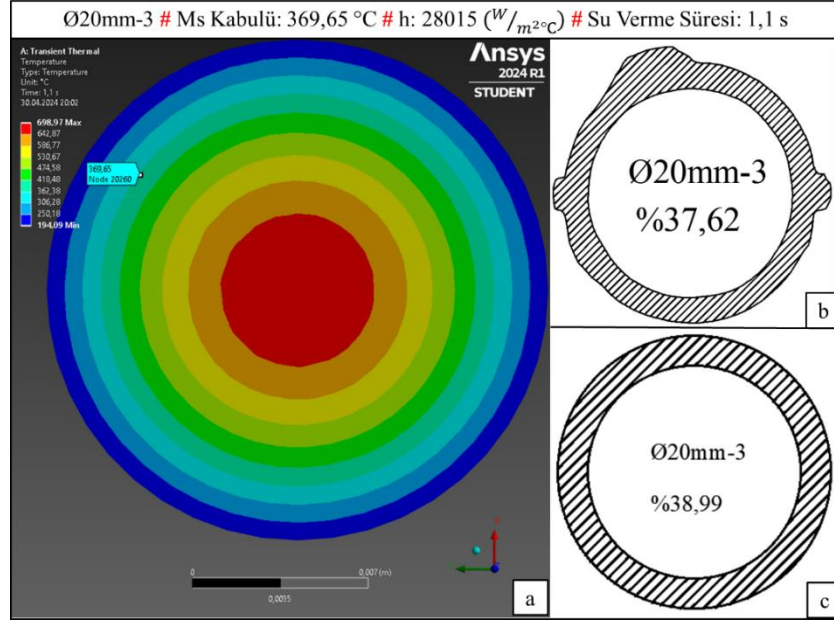
Şekil 5.32: a) Ø14mm-4 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø14mm-4 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø14mm-4 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.



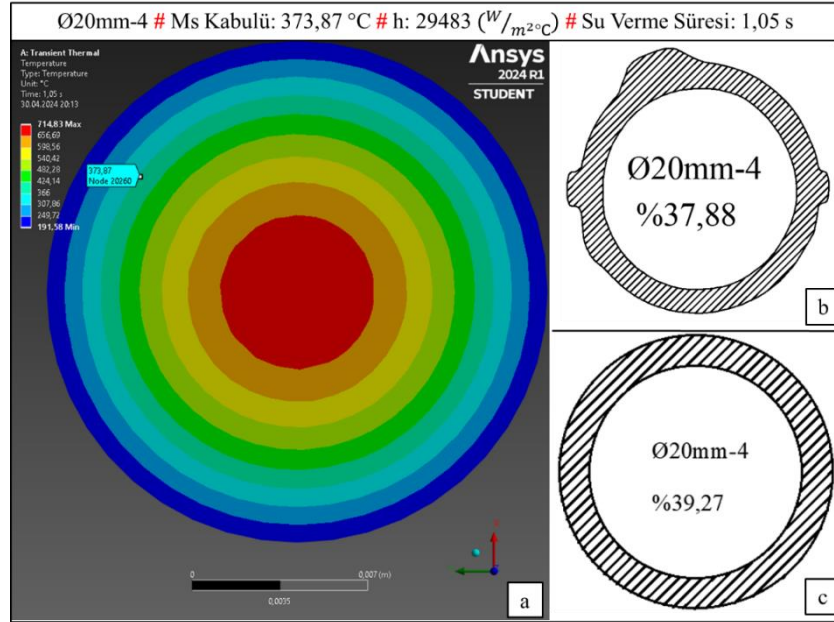
Şekil 5.33: a) Ø20mm-1 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø20mm-1 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø20mm-1 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.



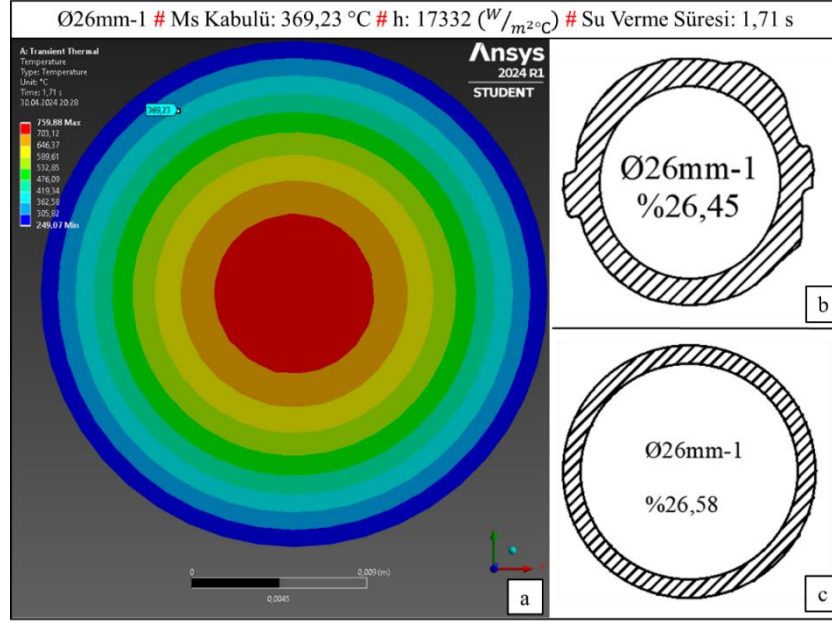
Şekil 5.34: a) Ø20mm-2 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø20mm-2 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø20mm-2 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.



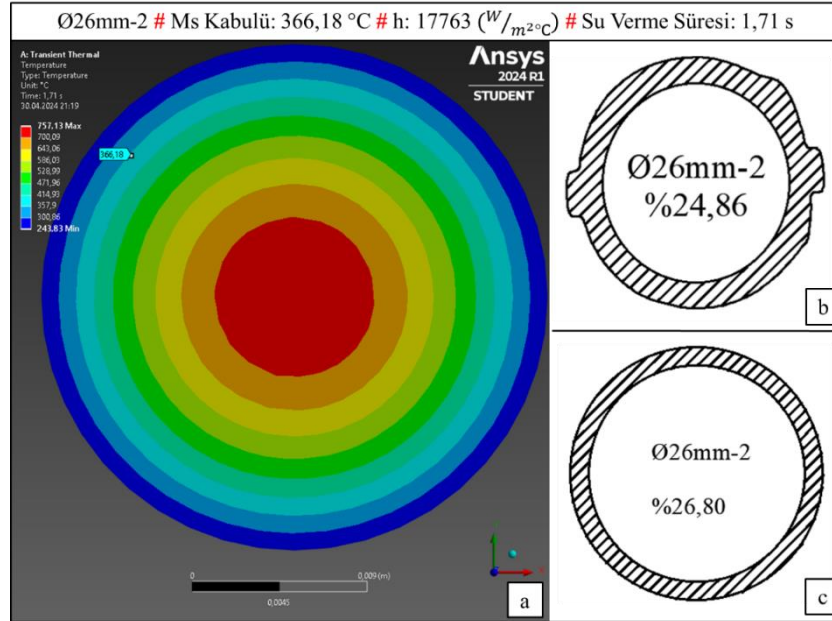
Şekil 5.35: a) Ø20mm-3 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø20mm-3 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø20mm-3 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.



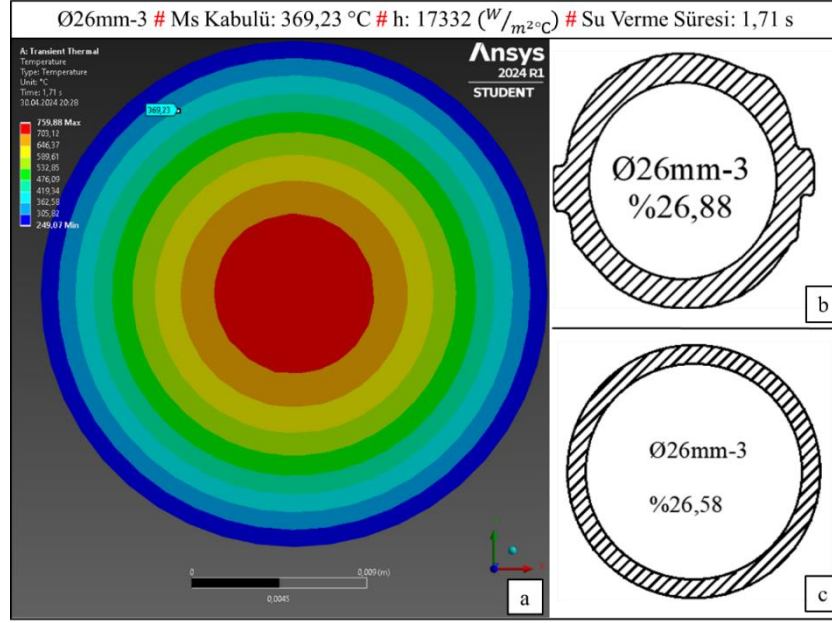
Şekil 5.36: a) Ø20mm-4 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø20mm-4 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø20mm-4 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.



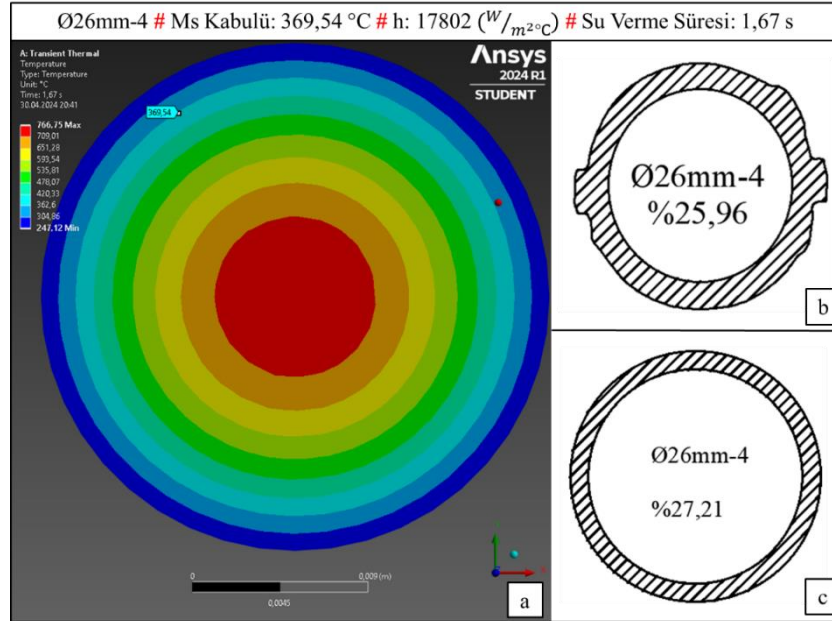
Şekil 5.37: a) Ø26mm-1 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø26mm-1 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø26mm-1 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.



Şekil 5.38: a) Ø26mm-2 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø26mm-2 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø26mm-2 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.



Şekil 5.39: a) Ø26mm-3 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø26mm-3 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø26mm-3 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.



Şekil 5.40: a) Ø26mm-4 Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve martenzit bitiş noktasının belirlenmesi. b) Ø26mm-4 deneysel martenzit hacim yüzdesi. c) Ø26mm-4 Sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan martenzit hacim yüzdesi.

Tablo 5.6: Deneysel sonuçlar ile ANSYS analizleri sonuçları ve birbirleri ile kıyaslanması.

PARAMETRELER						DENEYSEL SONUÇLAR						SONLU ELEMANLAR ANALİZ SONUÇLARI																																															
Suya Maruz Kalma Süresi (s)						Akma Muk.						Çekme Muk.						İlk Boy (mm)						AGT Ölçülen						AGT Sonuç						% Martenzit Hacim Oranı Deneysel																							
Su Basıncı (Bar)						550						596						702,0						70,0						112,76						13,11						37,54%																	
Su Debisi (m³/h)						11,40						509						626,0						70,0						113,93						14,24						29,49%																	
Çubuk Hızı (m/s)						11,60						519						635,0						70,0						113,17						13,49						31,31%																	
Su Soğtma Boru Metraji (1,1m)						10,85						630						727,0						70,0						107,70						8,06						41,49%																	
Su Soğtma Boru Adedi						11						576						677,0						100,0						110,69						11,03						37,98%																	
Su Soğtma Boru Ebat						Ø 35						574						685,0						100,0						111,50						11,84						37,72%																	
Malzeme Ebat						Ø 20						571						677,0						100,0						111,43						11,77						37,62%																	
Numune						Ø 20mm-2						564						664,0						100,0						111,01						11,34						37,88%																	
						Ø 20mm-3						595						686,0						100,0						106,12						6,46						26,45%																	
						Ø 20mm-4						586						676,0						100,0						107,43						7,77						24,86%																	
						Ø 26mm-1						604						710,0						100,0						106,02						6,38						26,88%																	
						Ø 26mm-2						593						698,0						100,0						106,20						6,55						25,96%																	
						Ø 26mm-3																																																					
						Ø 26mm-4																																																					

6. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Bu çalışmada Diler Demir Çelik'te S220-Mn Yüksek Manganlı olarak nitelendirilen CARES B500B kalitede 150x150x12000mm ebatlarında kütükler tav fırınında tavllanmış daha sonra BS4449:2005 üretim standartlarında haddeleme prosesinden geçirilerek Ø14, Ø20 ve Ø26 mm olarak üretilen nervürlü inşaat çelikleri olarak tempcore prosesine tabii tutularak üretilmişlerdir.

Üretilen her ebatta, normal üretim prosesi şartlarından bir adet numune, bir adet debi parametresine değiştirilerek üretilen numune, bir adet ana basınç hattındaki pompa üzerinden basınç değişimi yapıp sisteme giden vana ile debi miktarı ilk numuneye göre korunan numune ve son olarak da çubuk hızını değiştirerek su verme süresi parametresinin değiştirildiği bir numune alınmıştır.

Bu şekilde her bir ebattan 4 farklı numune olmak üzere toplamda 12 numune oluşturulmuştur. Tüm numunelerin akma-çekme testleri, boyca uzama miktarları, AGT ölçümleri, mikroyapı incelemeleri ve mikroskop altında kesit alanında oluşan faz dağılımı sonuçları elde edilmiştir.

Elde edilen bu deneysel verilerden yola çıkılarak, sanal ortamda numunelerin faz dağılım sonuçları fotoğraflanmış, AutoCAD 2024 programında martenzit hacim oranları belirlenmiştir.

Martenzit hacim oranları sonlu elemanlar yöntemi ile de belirlenip kıyas edilmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda ANSYS LT 2024 programında termal analiz yapılmıştır. Termal analiz girdi parametresi olan toplam ortalama taşınım katsayısı literatürden elde edilen formüllerce her bir numune için hesaplatılıp, ANSYS programında gerçek durum simüle edilmiştir.

Yine literatürde yer alan martenzit başlangıç sıcaklığı hesaplama formülleri için bir hesaplama modülü oluşturulmuş ve üretimi yapılan S220-Mn Yüksek Manganlı CARES B500B kalitede çeliğinin, elementlerine göre martenzit başlangıç sıcaklığı bulunmuştur.

Bulunan bu martenzit başlangıç sıcaklık değeri ANSYS programında yapılan analizde, oluşan sıcaklık dağılımı simülasyonunda, tempcore da suya maruz kalma süresi de

dikkate alınarak sanal proplar konulup belirlenmiştir. Belirlenen nokta, merkezden çap mesafesi martenzitin bittiği nokta olarak kabul edilmiştir. Martenzit tabakanın başlangıç noktası ise üretilen çubuğun en dış çapı olarak belirlenmiştir.

Bu bağlamda oluşan ve tahminde bulunulan martenzit tabakanın iç ve dış çapı AutoCAD LT 2024 programında tekrardan hesaplatılmış ve sanal martenzit hacim yüzdesi bulunmuştur.

Bulunan gerçek martenzit hacim yüzdesi ile sanal martenzit hacim yüzdesi kıyaslanmıştır.

Tüm deneysel ve simülasyon verileri **Tablo 5.6**'da verilmiştir.

Tüm bu bilgiler ışığında;

1. Malzemenin tempcore prosesi ile üretimi esnasında, uygulanan su debisi düşürüldüğünde, malzemenin akma ve çekme mukavemeti ile martenzit hacim oranının da düştüğü görülmüştür.
2. Çubuk hızını azaltmanın, malzemenin suya maruz kalma süresini arttırdığı, çubuk hızını arttırmanın da suya maruz kalma süresini azalttığı görülmüştür. Buna binaen suya maruz kalma süresi azaldığında malzemenin akma ve çekme mukavemeti ile martenzit hacim oranının da düştüğü görülmüştür.
3. Martenzit başlangıç sıcaklığı değerinin hesaplanması için literatürde yer verilen ampirik denklemlerin, malzeme içeriğindeki elementler ile aynı oranda formülde yerleşimleri yapılırken matematiksel olarak hesaplanabilmiştir.
4. Tempcore ile üretimi yapılan malzemenin kesitinin mikroskop altında görüntüleri alınıp, bir CAD programı ile martenzit tabakanın yüzdesel oranının hesaplanabildiği, bu yüzdesel oranın arttıkça mukavemet değerlerinin arttığı, azaldıkça da azaldığı gözlemlenmiştir.
5. Tempcore prosesi içerisinde gerçekleşen ısı transfer mekanizmasının, zorlanmış taşınım ile ısı transferi olduğu görülmüştür.
6. Aynı çaptaki malzemelerden alınan numuneler ile yapılan akma çekme testleri ve mikroyapı görüntüleri birlikte incelendiğinde, çekme mukavemet değeri düştükçe, ferrit+perlit tane yapılarının büyüdüğü gözlemlenmiştir.
7. Deney numunelerinin üretimleri esnasında uygulanan proses verilerine göre toplam ortalama taşınım katsayısının literatürdeki formüller ile hesaplanabilmiştir.

8. Tempcore prosesi için toplam ortalama taşınım katsayısının etken parametrelerinin, çubuk çapı, soğutma suyu borusunun iç çapı, soğutma suyunun toplam debisi, soğutma suyu boru adedi ve çubuk hızına bağlı olarak hesaplanabilmiştir.
9. Yapılan sonlu elemanlar analizi ile simüle edilen martenzit hacim oranları ile deney numuneleri üzerinden hesaplanan martenzit hacim oranları %90,88 oranında uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.
10. Literatürde yer verilen $P_M = f(t, d, T_0, M_S)$ fonksiyonuna bağlı parametrelere ilaveten, martenzit hacim fonksiyonu aynı zamanda, soğutucu su debisi, soğutma suyu sıcaklığı ve soğutucu borunun iç çapına da bağımlı olduğu gözlenmiştir.
11. Yapılan bu çalışma ile haddeleme öncesinde sistem parametreleri sanal ortamda girilerek ve sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılarak, üretilecek malzemedeki martenzit hacim yüzdesi hesaplanabilir.

7. ÖNERİLER

1. QTS (Quenching Tempering Systems) sistemlerde Waterbox Su Soğutma kutuları ile üretilen çeliklerin mekanik özelliklerinin oluşma süreci ve sonlu elemanlar ile analizi yapılabilir.
2. Waterbox Su Soğutmalı sistemlerde Waterboxlar arası mesafelerde kendi kendini temperleme süreci oluşur mu? Bunun toplam ortalama taşınım kat sayısına etkisi ve dolayısı ile martenzit hacim miktarına etkisi incelenebilir.
3. Son dönemlerde popüler olan nervürlü inşaat demiri üretim şekillerinden Spooler yöntemi ile yapılan üretimlerde, kendi kendini temperleme sürecinde, sarımın en dışındaki çelik mikroyapısı ile sarımın orta kısmında kalan çelik mikroyapısı arasında bir fark oluşur mu? Mikroyapı görselleri incelenip yorumlanabilir.
4. Nervürlü çubuk demir üretiminde, üretim öncesi sistem parametreleri girilerek ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tahmin edilen martenzit hacim oranları ile üretilcek her çap için oluşan martenzit hacim oranına göre akma ve çekme testi sonucunda oluşacak mukavemet değerlerin tahmini yapılabilir mi? Bu konuda her çap için oluşan martenzit hacim yüzdesi ile sonucunda oluşan akma çekme mukavemet değerleri arasında bir ilişki kurulabilir.

KAYNAKLAR

- [1] İkiz B., (2009), “Sıcak Haddelemede Tempcore Prosesi”, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi.
- [2] Barbar M., (2019), “Sıcak Haddelemede Tempcore Prosesindeki Soğutma Suyu Debisinin Nervürlü Çeliğin Özellikleri Üzerindeki Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi.
- [3] Dikbaş Ö. G., (2021), “Tempcore Soğutma Yöntemi ile Beton Çeliğinin Güçlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi.
- [4] Tamsöz, H., Elmas, E., T., “Çelik Üretiminde Elektrik Ark Ocaklarında Enerji Maliyetlerinin ve Enerji Verimlilik Faktörlerinin Araştırılması”, FBU-DAE, 2021, 1 (3) : 163-180.
- [5] Aslan B. H., (2008), “Demir-Çelik Üretimindeki Gelişmeler ve Bir Entegre Tesis Modernizasyon Örneği”, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi.
- [6] Aydoğan K., İ., (2007), “Haddeleme Prosesinde Malzeme Karakteristiğindeki Değişimlerin İncelenmesi ve Modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi
- [7] Yelin Ö., (2018), “Çelik Şekillendirme Yöntemlerinden Soğuk Haddeleme İşleminin Sonlu Elemanlar Analizlerinin Değişik Parametrelere Göre Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi
- [8] Çetinel H., (1997), “an Investigation of Effect of Variable Parameters on the Material Quality in Tempcore Process”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi
- [9] Marek S., W., (2019), “Fabrication of Reinforcement Bars in Unalloyed Steel”, ICI Word of Journals, Institute of Welding Bulletin, 63 (2).
- [10] İ.D.Ç., (1997), “İsdemir Tempcore Eğitim Notları”, T.D.Ç.İ. İsdemir Eğitim Yayınları, İskenderun
- [11] Web 1, (2024), <https://tr.wikipedia.org/wiki/Martenzit> , (Erişim Tarihi: 01/03/2024)
- [12] Dimatteo A., Vannucci M., Colla V., (2016), “A Finite Element Method for the Prediction of Thermal, Metallurgical, and Mechanical Behavior of Rebars in the TempCore Process”, Steel Research, 87 (3).
- [13] Web 2, (2013), <https://www.metalurjik.com/celikte-bulunan-fazlar> , (Erişim Tarihi: 01/03/2024)
- [14] Choi W., Choi S., Bae S., Kang N., (2022), “Computational Modelling and Experimental Analysis of Hardness and Microstructure of Reinforcing Bars Produced by Tempcore Process”, Metarial Science & Engineering, 28:2252–2262

- [15] Hosny S., Gepreel M. A., Ibrahim M. G., Bassuony A. R., (2021), “Simulation of Tempcore Process for 500 MPa Steel Bars”, *Metals and Materials International*, 27:3359–3370
- [16] Web 3, (2013), https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/72277/mod_resource/content/0/HAFTA_2.pdf , (Erişim Tarihi: 06/03/2024)
- [17] Çengel Y., (2002), “Heat and Mass Transfer”, 3th Edition
- [18] Khalifa H., Megahed G.M., Hamouda R. M., Taha M A., (2016), “Experimental Investigation And Simulation Of Structure And Tensile Properties Of Tempcore Treated Rebar”, *Journal of Materials Processing Technology*, 230; 244–253
- [19] Çetinel H., Özyiğit H. A., Özsoyeller L., (2002), “Artificial Neural Networks Modeling of Mechanical Property and Microstructure Evolution in the Tempcore Process” *Computers and Structures*, 80; 213–218
- [20] Chun S. P., Seh W. B., Jin R. C., Habeom L., Yangjin K., Young H. M., (2020), “Corrugated Cooling Unit for Accelerated Cooling of Rebar Subjected to Tempcore Process” *Applied Thermal Engineering*, 167;114699
- [21] Çetinel H., Toparlı M., Özsoyeller L., (2000), “A Finite Element Based Prediction of the Microstructural Evolution of Steels Subjected to the Tempcore Process” *Mechanics of Materials*, 32; 339-347
- [22] Bandyopadhyay K., Leea J., Shimb J., Hwangc B., Lee M., (2019), “Modeling and Experiment on Microstructure Evolutions and Mechanical Properties in Grade 600 MPa Reinforcing Steel Rebar Subjected to Tempcore Process”, *Materials Science & Engineering, A* 745; 39–52
- [23] Web 4, (2024), <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/heat-transfer/introduction-to-heat-transfer/characteristic-numbers/what-is-prandtl-number/> , (Erişim Tarihi: 22/04/2024)
- [24] Ikumapayi O.M., Akinlabi E.T., Onu P., Abolusoro O.P., (2020), “Rolling Operation in Metal Forming: Process and Principles – A Brief Study”, *Materials Today: Proceedings*, 26; 1644–1649
- [25] Dongwen W., Yiling C., Yongqi S., Shiyuan L., (2023), “Dynamic Tensile Behaviors of HRB500E Connectedwith Extrusion Sleeves at Different Strain Rates”, *Materials*, 16, 828.

ÖZGEÇMİŞ

2007 yılında Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü kazanıp, 2011 yılında mezun oldum.

2013 yılında Diler Demir Çelik AŞ’de Haddehane Makine Bakım Mühendisi olarak göreve başladım ve bugüne dek pek çok yeni yatırım ve geliştirme projelerinin içerisinde yer aldım. 2022 yılından itibaren de Haddehane Makine Bakım Şefi görevini üstlenmekteyim.

2022 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans çalışmalarına başladım.

TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR

[1] Atilla A., Bedir F., (2024), “Nervürlü İnşaat Demirlerinin Üretiminde Kullanılan Tempcore Prosesinin Malzemenin Mekanik Özelliklerine Olan Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi”, 8. GTÜ Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu, Gebze Teknik Üniversitesi.