

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞERİT HADDE SONRASI SOĞUTMA PRATİĞİNİN ÇELİK MİKROYAPISI ve
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

EZGİ BOYOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ÜRETİM METALÜRJİSİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. MUHLİS NEZİHİ SARIDEDE**

İSTANBUL, 2014

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ŞERİT HADDE SONRASI SOĞUTMA PRATİĞİNİN ÇELİK MİKROYAPISI ve
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

Ezgi BOYOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 06/08/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Üretim Metalürjisi Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Muhlis Nezihi SARIDEDE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Muhlis Nezihi SARIDEDE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet EKERİM
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hanifi SARAÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Sıcak Sac Haddehanesinde şerit hadde sonrası malzemeye uygulanan soğutma pratiği, malzemenin mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerinde en etkin rolü oynamaktadır. Bu çalışma konusu ile ilgili olarak yüksek lisans tezim ve yüksek lisans eğitimim boyunca desteğini esirgemeyen, her konudaki üstün bilgi ve tecrübesine güvendiğim değerli hocam Sn. Prof. Dr. Muhlis Nezihi SARIDEDE'ye tüm ilgi ve alakalarından dolayı teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında desteğini eksik etmeyen Çolakoğlu Metalurji A.Ş. Sıcak Sac Haddehanesi Üretim Operasyonları Alan Yöneticisi Sn. Özgür ÖZSOY'a, Sıcak Sac Haddehanesi Üretim Yöneticisi Sn. Uğur PAMUK'a, Sıcak Sac Haddehanesi Üretim Mühendisleri Sn. Yusuf ÖZKUL'a, Sn. Emre KÖRMÜKÇÜ'ye ve Sn. Fehmi Emir ÖNEN'e; Teknik Hizmetler Yöneticisi Sn. Ramazan TÜTÜK'e, Kalite Kontrol Uzmanı Sn. Hasibe BÖLÜK'e, Teknik Hizmetler Uzmanı Sn. Muharrem MERAL'e ve Sn. Serkan OKTAY'a, Metalograf Sn. Yılmaz AYDIN'a desteklerinden dolayı minnettarım. Taramalı Elektron Mikroskobu incelemelerim için destek veren Sabancı Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi öğretim üyesi Sn. Mehmet Yıldız'a, Laboratuvar Sorumlusu Sn. Turgay Gönül'e ve öğrenci arkadaşlara teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca tez çalışma sürecimde her zaman yanımda olan ve beni destekleyen sevgili eşim ve değerli aileme sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Ağustos, 2014

Ezgi BOYOĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT.....	xii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez.....	2
BÖLÜM 2	
İKİNCİL ÇELİK ÜRETİMİ	3
2.1 İkincil Çelik Üretim Tanımı	3
2.2 Bir İkincil Çelik Üretim Tesisi: Çolakoğlu Metalurji	4
BÖLÜM 3	
SICAK HADDELENMİŞ SAC ÜRETİMİ	6
3.1 Sıcak Haddeleme Prosesi	7
3.2 Slab Tav Fırını	9
3.3 Tufal Temizleme, Dik Hadde ve Kaba Hadde	15
3.4 Coil Box, Makas ve Şerit Hadde	17
3.5 Duşlu Masa, Bobin Sarma ve Stoklama	19

3.6	Mekanik Testler ve Mikroyapısal İnceleme	24
BÖLÜM 4		
SOĞUTMA PRATİKLERİ		26
4.2	Erken Soğutma	26
4.3	Geç Soğutma	28
4.4	Çift Fazlı Soğutma	30
BÖLÜM 5		
ÇELİK KALİTELERİ		31
5.1	S 235 JR – Genel Yapı Çeliği	31
5.2	S 275 JR – Genel Yapı Çeliği	32
5.3	S 355 JR – Genel Yapı Çeliği	33
5.4	SAE 1010 – Karbon Çeliği	34
BÖLÜM 6		
SOĞUTMA PRATİKLERİ ile İLGİLİ ARAŞTIRMALAR.....		35
BÖLÜM 7		
DENEYSEL ÇALIŞMALAR		42
7.1	Kullanılan Malzeme ve Cihazlar	42
7.2	Parametrelerin Belirlenmesi ve Deneylerin Yapılışı.....	44
7.3	Optik Mikroskop İncelemeleri	53
7.4	Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemeleri	61
BÖLÜM 8		
DEĞERLENDİRME		67
BÖLÜM 9		
GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER		70
KAYNAKLAR		72
EK-A		
ÖZGEÇMİŞ		76

SİMGE LİSTESİ

mm	Milimetre
m	Metre
nm	Nanometre
μm	Mikrometre
mm^2	Milimetrekare
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat Derece
MW	Megawatt
Nm^3	Normal metreküp
~	Yaklaşık
sa	Saat
mt	Metrik ton
m^3	Metreküp
C	Karbon
Mn	Mangan
Si	Silisyum
Cr	Krom
Ca	Kalsiyum
Ni	Nikel
Sn	Kalay
Cu	Bakır
Al	Alüminyum
Mo	Molibden
Ti	Titanyum
lt	Litre
T	Kalınlık
KVc	Darbe Enerjisi
J	Joule
N	Newton
d	Çekme numunesi çapı
ml	Mililitre
%	Yüzde Oran

KISALTMA LİSTESİ

AISI	American Iron and Steel Institute
API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA	Cellular Automata
CM	Numune Kodu
CNC	Computer Numerical Control
DIN	Deutsches Institut für Norming
DP	Dual Phase (Çift Faz)
EQ	Early Quick (Erken Hızlı)
ES	Early slow (Erken Yavaş)
E1	Edger 1 (Dik Hadde 1)
F1	Finishing Mill 1 (Şerit Hadde 1)
F2	Finishing Mill 2 (Şerit Hadde 2)
F3	Finishing Mill 3 (Şerit Hadde 3)
F4	Finishing Mill 4 (Şerit Hadde 4)
F5	Finishing Mill 5 (Şerit Hadde 5)
F6	Finishing Mill 6 (Şerit Hadde 6)
F7	Finishing Mill 7 (Şerit Hadde 7)
HNO ₃	Nitrik Asit
IF	Interstitial Free
LPG	Liquefied Petroleum Gaz
LQ	Late Quick (Geç Hızlı)
LS	Late Slow (Geç Yavaş)
R1	Rougher 1 (Kaba Hadde 1)

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Çolakoğlu Metalurji üretim akım şeması.....	5
Şekil 3. 1 Sıcak sac haddehanesi üniteleri.....	8
Şekil 3. 2 Haddeleme işlemi ve kullanılan merdaneler	8
Şekil 3. 3 Slab tav fırını bölgeleri.....	11
Şekil 3. 4 Tav fırını şarj ve deşarj makineleri.....	13
Şekil 3. 5 Brülörde yanmanın gerçekleşmesi	14
Şekil 3. 6 Reküperatör modülü	14
Şekil 3. 7 Fırından alınan slabın hatta verilmesi.....	15
Şekil 3. 8 Tufal temizleme	15
Şekil 3. 9 Dik hadde	16
Şekil 3. 10 Kaba hadde	16
Şekil 3. 11 Coil box	17
Şekil 3. 12 Transfer malzemesinin alan-hacim oranları	18
Şekil 3. 13 Kırpıntı makası	18
Şekil 3. 14 Şerit hadde tezgahları.....	19
Şekil 3. 15 Duşlu masalar	20
Şekil 3. 16 Duşlu masa bölgeleri	21
Şekil 3. 17 Bobin sarma ünitesi	22
Şekil 3. 18 Çemberleme makinesindeki bobin.....	23
Şekil 3. 20 Çekme cihazında teste tabi tutulan numune	24
Şekil 3. 21 Bakalite alınmış numuneler	25
Şekil 4. 1 Erken soğutma pratiği.....	27
Şekil 4. 2 Early Quick (Erken Hızlı) soğutma pratiği	27
Şekil 4. 3 Early Slow (Erken Yavaş) soğutma pratiği.....	28
Şekil 4. 4 Geç soğutma pratiği.....	28
Şekil 4. 5 Late Quick (Geç Hızlı) soğutma pratiği	29
Şekil 4. 6 Late Slow (Geç Yavaş) soğutma pratiği.....	29
Şekil 4. 7 Çift fazlı soğutma eğrisi.....	30
Şekil 4. 8 Çift fazlı soğutma pratiği.....	30
Şekil 6. 1 Eski ve yeni sistem sarılma sıcaklıkları (a) eski sistem, (b) yeni sistem	36
Şekil 6. 2 DP çeliğinin iki kademeli soğutma sonrası mikroyapı görüntüsü.....	37
Şekil 6. 3 Deneysel düzenek.....	38
Şekil 6. 4 Plakanın 26°C ve 6 lt/dak su altında soğuma adımları	38
Şekil 6. 5 Soğutma için kullanılan farklı sistemler	39
Şekil 6. 6 Malzemenin sırayla soğutma suyunun altından geçiş evreleri	40

Şekil 7. 1 CNC Tezgahı	42
Şekil 7. 2 Çekme Testi Cihazı	43
Şekil 7. 3 Sıcak Bakalite Alma ve Zımparalama-Parlatma Cihazları	43
Şekil 7. 4 Optik Mikroskop	44
Şekil 7. 5 Taramalı Elektron Mikroskobu	44
Şekil 7. 6 Bakalite alınmış numuneler	53
Şekil 7. 7 CM1 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü	53
Şekil 7. 8 CM2 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü	54
Şekil 7. 9 CM3 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü	54
Şekil 7. 10 CM4 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü	55
Şekil 7. 11 CM5 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü	55
Şekil 7. 12 CM6 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü	56
Şekil 7. 13 CM7 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü	56
Şekil 7. 14 CM8 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü	57
Şekil 7. 15 CM9 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü	57
Şekil 7. 16 CM10 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü	58
Şekil 7. 17 CM11 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü	58
Şekil 7. 18 CM12 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü	59
Şekil 7. 20 CM14 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü	60
Şekil 7. 21 CM15 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü	60
Şekil 7. 22 CM16 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü	61
Şekil 7. 23 CM1 nolu numunenin SEM’de 13.000 büyütmedeki görüntüsü.....	62
Şekil 7. 24 CM2 nolu numunenin SEM’de 2.000 büyütmedeki görüntüsü.....	62
Şekil 7. 25 CM3 nolu numunenin SEM’de 7.000 büyütmedeki görüntüsü.....	63
Şekil 7. 26 CM4 nolu numunenin SEM’de 5.000 büyütmedeki görüntüsü.....	63
Şekil 7. 27 CM5 nolu numunenin SEM’de 300 büyütmedeki görüntüsü.....	64
Şekil 7. 28 CM9 nolu numunenin SEM’de 5.000 büyütmedeki görüntüsü.....	64
Şekil 7. 29 CM10 nolu numunenin SEM’de 5.000 büyütmedeki görüntüsü.....	65
Şekil 7. 30 CM11 nolu numunenin SEM’de 5.000 büyütmedeki görüntüsü.....	65
Şekil 7. 31 CM12 nolu numunenin SEM’de 3.000 büyütmedeki görüntüsü.....	66
Şekil 7. 32 CM13 nolu numunenin SEM’de 200 büyütmedeki görüntüsü.....	66

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1 Soğutma pratikleri	9
Çizelge 3. 2 Sıcak sac haddehanesi slab tav fırını bilgileri.....	11
Çizelge 5. 1 S235JR kalitesine ait kimyasal analiz	31
Çizelge 5. 2 S235JR kalitesi haddeleme ve soğutma pratiği	31
Çizelge 5. 3 S235JR kalitesi mekanik özellikleri.....	32
Çizelge 5. 4 S275JR kalitesine ait kimyasal analiz	32
Çizelge 5. 5 S275JR kalitesi haddeleme ve soğutma pratiği	32
Çizelge 5. 6 S275JR kalitesi mekanik özellikleri.....	33
Çizelge 5. 7 S355JR kalitesine ait kimyasal analiz	33
Çizelge 5. 8 S355JR kalitesi haddeleme ve soğutma pratiği	33
Çizelge 5. 9 S355JR kalitesi mekanik özellikleri.....	33
Çizelge 5. 10 SAE 1010 kalitesine ait kimyasal analiz	34
Çizelge 5. 11 SAE 1010 kalitesi haddeleme ve soğutma pratiği.....	34
Çizelge 6. 1 HSLA çeliğinin kimyasal kompozisyonu (% ağırlık)	39
Çizelge 7. 1 Deneysel çalışmalarda değiştirilemeyen parametreler.....	45
Çizelge 7. 2 CM1 ve CM2 nolu numunelerde soğutma stratejisi değişikliği.....	46
Çizelge 7. 3 CM1 ve CM2 nolu numunelere ait kimyasal analiz	46
Çizelge 7. 4 CM3 ve CM4 nolu numunelere ait kimyasal analiz	47
Çizelge 7. 5 CM3 ve CM4 nolu numunelerde nozullar arası mesafe değişikliği	47
Çizelge 7. 6 CM5 ve CM6 nolu numunelerde soğutma stratejisi değişikliği.....	48
Çizelge 7. 7 CM5 ve CM6 nolu numunelere ait kimyasal analiz	49
Çizelge 7. 8 CM7 ve CM8 nolu numunelere ait kimyasal analiz	49
Çizelge 7. 9 CM7 ve CM8 nolu numunelerde nozullar arası mesafe değişikliği	49
Çizelge 7. 10 CM9 ve CM10 nolu numunelerde soğutma stratejisi değişikliği.....	50
Çizelge 7. 11 CM9 ve CM10 nolu numunelere ait kimyasal analiz	50
Çizelge 7. 12 CM11 ve CM12 nolu numunelerde nozullar arası mesafe değişikliği	50
Çizelge 7. 13 CM11 ve CM12 nolu numunelere ait kimyasal analiz	51
Çizelge 7. 14 CM13 ve CM14 nolu numunelerde soğutma stratejisi değişikliği.....	51
Çizelge 7. 15 CM13 ve CM14 nolu numunelere ait kimyasal analiz	52
Çizelge 7. 16 CM15 ve CM16 nolu numunelere ait kimyasal analiz	52
Çizelge 7. 17 CM15 ve CM16 nolu numunelerde nozullar arası mesafe değişikliği	52
Çizelge 8. 1 S355 ve S275 kalite numunelerin lameler arası mesafe ölçüm değerleri ...	68

**ŞERİT HADDE SONRASI SOĞUTMA PRATİĞİNİN ÇELİK MİKROYAPISI ve
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

Ezgi BOYOĞLU

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Muhlis Nezihi SARIDEDE

Sıcak haddemeleme işlemi sonucu elde edilen malzemenin mikroyapısı ve mekanik özellikleri çeliğin kullanım alanına göre değişmekle birlikte çok önemli bir yere sahiptir. Malzemeden beklenen mekanik özelliklerin sağlanması ve istenilen mikroyapının eldesi ise büyük ölçüde çeliğin soğutulması ile sağlanmaktadır.

Çolakoğlu Metalurji A.Ş. Sıcak Sac Haddehanesinde yapılan çalışmada, 4 farklı çelik kalitesi için farklı soğutma parametreleri belirlenmiş ve aynı kalite malzeme grupları için uygulanan farklı parametrelerin malzemenin mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sıcak haddelenmiş malzemenin duşlu masada soğutulması ve bobin sarmada sarılması sonrası, malzemeden alınan test numuneleri bir dizi mekanik teste ve mikroyapı incelemesine tabi tutulmuştur. Testler sonucunda soğutma parametrelerindeki değişikliğin, malzemenin mekanik özelliklerinde ve mikroyapısında değişikliğe yol açtığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Şerit hadde, sıcak haddemeleme, duşlu masa, çelik mikroyapısı, mekanik özellikler

ABSTRACT

EFFECT OF COOLING PRACTISE AFTER FINISHING MILL ON STEEL MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES

Ezgi BOYOĞLU

Department of Metallurgical and Materials Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Muhlis Nezihi SARIDEDE

The microstructure and mechanical properties of a hot rolled material have an important role even they may differ according to material's area of usage. To obtain the required mechanical properties and microstructure, the most efficient parameter is cooling.

With the experiments that were performed in Çolakoğlu Metalurji A.Ş., 4 different steel quality were chosen. For those different qualities distinct cooling parameters were determined and applied. The effect of these parameters on material's mechanical properties and microstructure were investigated. After cooling and coiling of the hot rolled material, the samples were taken in order to subject to mechanical tests and microstructural observation. It has been observed that changing the cooling parameters cause changes in the mechanical properties and microstructure of the steel.

Keywords: Finishing mill, hot rolling, laminar cooling, steel microstructure, mechanical properties

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE

1.1 Literatür Özeti

Sıcak haddeme yöntemi ile üretilen malzeme, slab olarak üretime girer ve bobin olarak elde edilir. Bu üretim aşamasında malzeme, slab tav fırınından başlayarak birçok aşamadan geçerek haddelenir. Haddeme sonrasında malzemedeki beklenen mekanik özelliklerin ve istenen mikroyapının elde edilmesi için malzeme su verme işlemine tabi tutulur. Çolakoğlu Metalurji A.Ş. firmasında yapılan çalışmalarda su verme işlemi duşlu masa sistemi ile sağlanmıştır. Malzemenin kullanım alanına göre bazı mekanik değerleri sağlaması gerektiği için her malzeme için farklı soğutma yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemleri belirleyen parametreler ise çelik malzemenin şerit hadde çıkış sıcaklığı (ikmal sıcaklığı) ve bobin sarmadaki sarılma sıcaklığıdır.

İkmal ve sarılma sıcaklığının yanı sıra; malzemenin kalitesi, üretim hızı, su debisi ve daha birçok parametre de malzemeye uygulanacak soğutma pratiğini etkilemektedir. Yapılan birçok çalışmada farklı parametrelerin malzemenin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmış ve genel olarak elde edilen sonuçlar; malzemenin mekanik özelliklerinin malzeme hızı ile ters, soğutma suyu debisi ile doğru, soğutma suyu nozulları arası mesafe ile ters orantılı olduğu yönünde olmuştur. Bu tez çalışmasında, farklı denemeler yapılarak bu parametrelerin etkisinin ölçülmesi amaçlanmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında; S235JR, S275JR, S355JR ve SAE1010 kalite malzemelerin sıcak haddelenmesi ve şerit hadde çıkışı sonrası duşlu masa sistemi ile soğutulması, soğutma işlemi sonrası malzemedan istenen mekanik özelliklerin ve mikroyapının elde edilmesi amaçlanmıştır. Aynı zamanda, aynı malzeme kaliteleri için farklı uygulamaların denenmesi ile elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve malzemenin mekanik değerleri ile mikroyapısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Bu tezin amacı, farklı soğutma pratiklerinin malzemenin mekanik özelliklerine ve mikroyapısına etkisini araştırmaktır.

1.3 Hipotez

Yapılan deneysel çalışmalarda, aynı kalite malzemelerde farklı soğutma parametrelerinin uygulanması sonucu malzemenin mekanik özelliklerinde ve mikroyapısındaki değişimler araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, aynı kalite malzemeler için kullanılan farklı parametrelerin malzemenin hem mekanik özelliklerinde hem de mikroyapısında değişikliklere yol açtığı yönünde olmuştur.

İKİNCİL ÇELİK ÜRETİMİ

2.1 İkincil Çelik Üretim Tanımı

İkincil çelik üretiminde Elektrik Ark Ocağı'nda ergitilen hurda; çeliğin kimyasal bileşiminin ayarlanması, deoksidasyon ve desülfürizasyon işlemleri için Pota Fırını'na gönderilir. Pota Fırını'na gelen dökümün istenilen kalite ve sıcaklığa ayarlanmasının ardından sıvı çelik ya sürekli döküme ya da vakumla gaz giderme tesisine gönderilir. Eğer yarı mamul kütük olacak ise sıvı çelik vakuma girmeden direk olarak sürekli döküm tesisine gider ve buradan kütük olarak çıkar. Eğer yarı mamul slab olacak ise sıvı çelik vakuma girer, burada sıvı çelik içerisindeki oksijen, azot, özellikle de hidrojen gazları uzaklaştırıldıktan sonra slab döküm tesisine gelir ve buradan slab halinde yarı mamül olarak elde edilir [1].

Haddeleme; malzemeye, merdaneler arasından geçerken uygulanan basma kuvvetleri etkisiyle plastik şekil verme işlemidir. Sıcak haddeleme ve soğuk haddeleme olarak ikiye ayrılan haddeleme işleminde sıcak ve soğuk haddeleme yöntemlerini birbirinden ayırt etmek amacıyla yeniden kristalleşme sıcaklığı kullanılır. Yeniden kristalleşme sıcaklığı; şekil değiştirme oranı, tavlama süresi, şekil değiştirmiş iç yapının tane büyüklüğü, kimyasal bileşim gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Plastik şekil değişimine uğramış bir malzemenin bir saat içerisinde yeniden kristalleşmesini tamamlayabildiği sıcaklık genellikle yeniden kristalleşme sıcaklığı olarak tanımlanır. Yeniden kristalleşme sıcaklığı altında yapılan haddeleme işlemine soğuk haddeleme, yeniden kristalleşme sıcaklığı üzerinde yapılan haddeleme işlemine sıcak haddeleme denir. Kütük ve

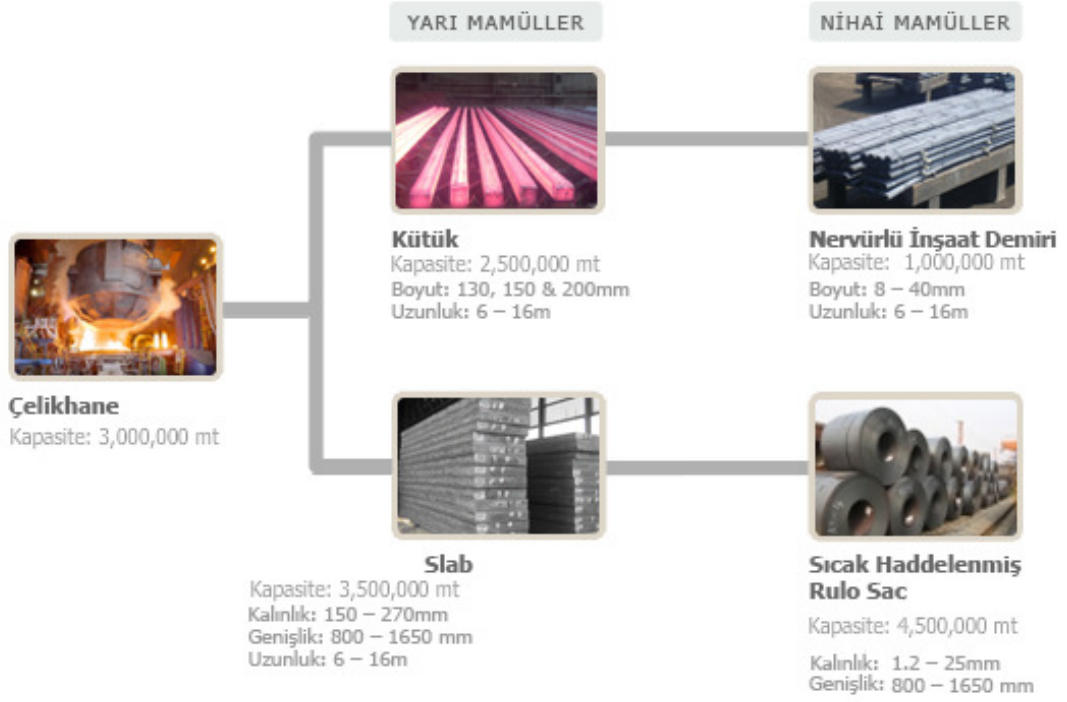
blumların sıcak haddelenmesi ile profil ve çubuklar, slabların sıcak haddelenmesi ile daha küçük kesitli levha veya bobin gibi yassı ürünler elde edilir [2, 3].

Yassı ürünler, pazar ihtiyaçlarına ve yapılacak haddeleme işlemi teknik kapasitelerine göre şu boyutlara göre tanımlanırlar: Bobinler, 1,2mm ile 25mm arasında değişen kalınlıklarda ve 900mm ile 2000mm arasında genişliğe sahiptirler. Levhalar ise kalınlığı 6mm'den büyük ve genişlikleri 4200mm'yi geçebilen ebatlardadır. Saclar, 300mm ile 1200mm arasında genişliğe ve 1,2mm ile 6mm arasında kalınlığa sahiptirler [4, 5].

2.2 Bir İkincil Çelik Üretim Tesisi: Çolakoğlu Metalurji

Çolakoğlu Metalurji A.Ş., demir çelik faaliyetine 1945 yılında kurucusu Mehmet Rüştü Çolakoğlu'nun Karaköy'deki çelik ticarethanesi ile başladı, ilk haddehanesini 1960 yılında İstanbul Söğütözü'nde devreye aldı. Ülkedeki kütük ihtiyacını karşılamak amacıyla 1969 yılında Dilovası'nda ilk çelikhane üretime başladı. Sektördeki öncü konumunu 1985 yılında özel sektörde filmaşın üretimini gerçekleştirerek pekiştiren Çolakoğlu, 1990 yılı itibari ile ürün gamına nervürlü inşaat demirini de ekledi.

Yaptığı yatırımlar ile en son teknolojiyi ülkemize kazandırmaya önem veren Çolakoğlu Metalurji, 2007 yılında yaptığı çelikhane ve yassı üretime geçiş yatırımları ile bu konudaki istikrarını göstermiştir. Çelikhane devreye alındığı tarihte, Çolakoğlu Metalurji dünyanın o tarihe kadar yapılmış en büyük ark ocağına sahipti. Özel sektörde ilk sıcak sac yatırımını da gerçekleştiren Çolakoğlu Metalurji, bu alandaki öncü konumunu sürdürmektedir. Şekil 2.1'de Çolakoğlu Metalurji üretim akım şeması verilmiştir [6].



Şekil 2. 1 Çolakoğlu Metalurji üretim akım şeması

SICAK HADDELENMİŞ SAC ÜRETİMİ

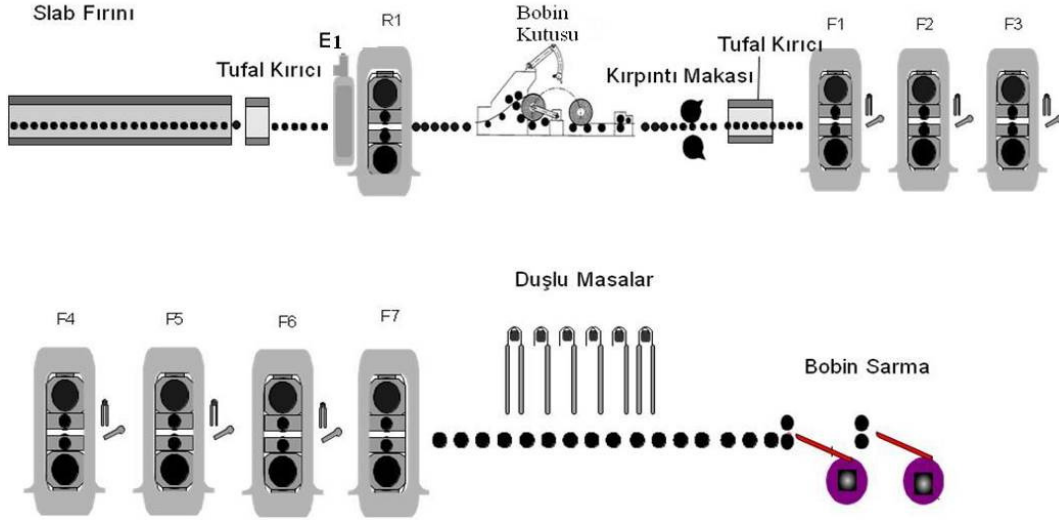
Çelik, günümüz endüstrisinde en geniş kullanım alanına sahip malzemelerden biridir. AHSS (advanced high strength steels) sanayinin farklı alanlarında kullanım alanı bulan ve sürekli gelişen önemli çeliklerdir. Çelik sac malzemeler otomobil gövdelerinden içecek kutularına kadar kullanım alanı bulmaktadır. Bu malzemelerin %25-30'u sıcak haddeleme yöntemi ile üretilmektedir. Sıcak haddelenmiş sac malzemeler boru, otomotiv parçaları, demiryolu araçları ve diğer birçok uygulamada kullanılmaktadır [7].

Küresel pazarda, teknolojideki hızlı gelişmelerle birlikte daha yüksek performanslı ve daha kusursuz malzeme arayışı ve isteği bulunmaktadır. Günümüzde; tavlama sıcaklığı, hadde hızı, soğutma suyu akışı ve pozisyonu, haddeleme sıcaklığı ve ezme oranı gibi haddeleme parametrelerini değiştirerek farklı mikroyapılarda ve mekanik özelliklerde malzeme üretimi mümkündür. Ancak bu faktörlerden herhangi birindeki değişikliğin son malzeme üzerindeki etkisini birebir görmek, nihai üründe çok iyi sonuç verse dahi hem malzeme hem de zaman açısından maliyetli olabilmektedir. Bu nedenle genellikle laboratuvar ölçekli fiziksel simülasyonlar kullanılmaktadır. Daha çok ilgi gören yaklaşım ise prosesin matematiksel modellenmesi yönündedir. Sadece birkaç dakikalık bilgisayar kullanımı, teorik formüller ve yeterli deneysel verilerle temel ısı ve kütle transferi prensipleri ve mikroyapısal oluşumlara ait modeller oluşturulabilmektedir. Bu bağlamda malzemenin duşlu masa üzerinde iken şerit sıcaklık kontrolünün hassas olarak matematiksel modellenmesi büyük önem taşımaktadır, ancak ısı transferi ve durumun karmaşık olması nedeni ile bu modellemeyi hassas bir şekilde yapabilmek oldukça zordur [8, 9].

Kalınlığı 2mm'den daha düşük değerlere kadar üretimin olduğu sıcak haddeleme prosesi çelik endüstrisinde en önemli proseslerden biridir. Sıcak haddeleme işleminde malzeme, istenilen metalurjik özelliklerin kazanılması amacı ile faz dönüşüm sıcaklığının üzerinde haddelenir. Bu da malzemenin şerit haddenin son standından faz dönüşüm sıcaklığının üzerinde çıkması anlamına gelmektedir. Mikroyapı ve yüzey düzgünlüğünün kontrolü için haddeleme sonrası malzeme soğutma işlemine tabi tutulur. Malzemenin nihai mekanik özelliklerin kontrolü açısından duşlu masa soğutma işleminin gerekliliği bilinmektedir. Bu nedenle sıcak haddelenmiş malzeme üretiminde çeliğin duşlu masa ile soğutulması yaygın hale gelirken, soğutma işlemi sırasındaki termal ve metalurjik değişimleri ölçebilmek amacı ile de dünya genelinde önemli çaba sarfedilmektedir. Öyle ki, malzeme düşük karbon içeriğine sahip olsa bile, çökeltme sertleşmesi yöntemi ile ferrit tane büyüklüğü değiştirilerek yüksek dayanımlı çelik üretimi mümkündür. Karbon içeriğinin düşük olması sonucu mikroyapıda az miktarda perlit oluşur ki bu da malzemenin kaynaklanabilirliğini ve tokluğunu artırır. Malzemenin duşlu masa ile soğutulmasındaki amaç yüksek hızda ısı akışı sağlayarak ince ferrit taneleri elde etmektir ($\sim 10\mu\text{m}$). Malzemenin kalınlığı boyunca homojen sıcaklık alanı gereklidir, ancak çeliğin ısı direnci buna engel teşkil eder. Öyle ki, mekanik özelliklerdeki değişkenlik ve malzemede çarpıklık bölgesel soğutmadan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle bu tür problemlerin önüne geçebilmek amacı ile soğutma modelinin optimizasyonu gereklidir [10, 11, 12].

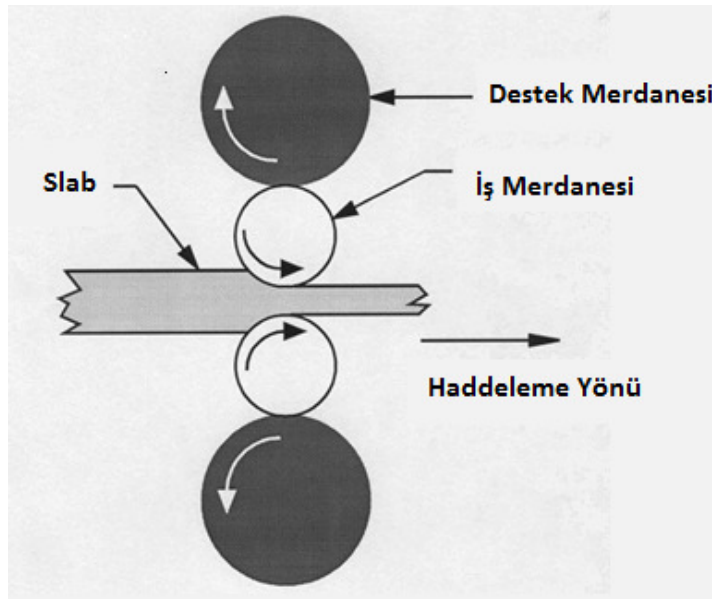
3.1 Sıcak Haddeleme Prosesi

Sıcak Sac Haddehanesi, çelikhanede slab döküm işlemi sonucu üretilen, boyutları ve kimyasal özellikleri bilinen slabların üretim planına göre, belirlenmiş olan boyut ve özellikteki bobin haline gelmesini sağlayan bir tesistir. Genel olarak bir sıcak sac haddehanesi sürekli döküm tesisini takip eder ve slab tav fırını, tufal temizleme (descaler), dik hadde (edger), kaba hadde (roughing mill), bobin kutusu (coil box), kırpıntı makası (crop shear), ikincil tufal temizleme (secondary descaler), şerit hadde (finishing mill), duşlu masa (runout table) ve bobin sarma (coiler) ünitelerini içerir [10].



Şekil 3. 1 Sıcak sac haddehanesi üniteleri

Sıcak haddeleme sıcaklığı, yeniden kristalleşme için gerekli olan en düşük sıcaklıktan oldukça yüksektir. Yassı ürünün sıcak olarak haddelenmesinde, merdaneler arasındaki basma kuvveti ile tav fırınından çıkan uygun sıcaklıktaki slab öncelikle haddeleme yönünde uzar. İşlem sürekli olduğu için şekil değişim hızı giderek artar. Malzemenin yeniden kristalleşmesi büyük ölçüde bir hadde tezgahından diğer hadde tezgahına geçerken meydana gelir. Proseste ısı kaybını minimuma indirmek için şekil değişim oranı yüksek işlem kademeleri birbiri ardına uygulanır. Aynı yönde birbirini izleyen çok sayıda işlem, önceden belirlenmiş bir kalınlığın ortaya çıkmasını sağlar [2, 3].



Şekil 3. 2 Haddeleme işlemi ve kullanılan merdaneler

Silindirik merdaneler kullanılarak metal malzemeye şekil verilmesi haddeleme işleminin temelini oluşturmaktadır. Yüksek kaliteli bir çelik sacın, sadece fiziksel ve mekanik özellikleri ile değil aynı zamanda geometrik ve boyutsal toleransları da sağlaması gerekmektedir. Yassı ürünler; sadece sıcak haddelenmiş olarak veya sıcak haddeleme işleminin ardından soğuk haddelenerek otomobil, boru, beyaz eşya, gemi, silah, gıda, motor sanayiinde ve endüstriyel yapılarda geniş kullanım alanı bulmaktadır [2, 13].

Duşlu masa boyunca malzemedeki faz dönüşüm prosesini kontrol altında tutmak ve malzemenin düzlüğünü sağlayabilmek için kontrollü soğutma sistemleri uygulanır. Yapıdaki karbür ve nitratların çökmesi ve dayanım artışı ise bobin sarma sırasında ve bobin sarma sonrası soğuma esnasında gerçekleşir. Son 40 yılda elde edilen kısıtlı deneysel datalar ve matematiksel modelleme tabanlı uygulamalar ile sıcak haddeleme sırasında termomekanik ve metalurjik değişimler üzerine önemli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar ise duşlu masa soğutma prosesinin çelik şerit malzemenin mekanik özelliklerinin kontrolünde merkez teşkil ettiğini göstermiştir [10].

Soğutma prosesinin kontrolü ile iyi bir mikroyapı ve bunun sonucu olarak da iyi mekanik özellikler elde etmek amaçlanmaktadır. Her bir çelik kalitesi, istenilen mekanik özelliklerin elde edilebilmesi adına farklı termal ve soğutma pratiği uygulamalarına ihtiyaç duymaktadır. Çizelge 3. 1’de tipik soğutma pratikleri ve hangi ürünler için dizayn edildiği verilmiştir [10].

Çizelge 3. 1 Soğutma pratikleri

Erken soğutma (early cooling)	Sert malzemeler, IF Çelikleri
Geç soğutma (late cooling)	Yumuşak malzemeler, Soğuk haddelenmiş ürünler
Kesintili soğutma (interrupted cooling)	Dual faz çelikleri, C-Mn çelikleri, Galvanizli ürünler

3.2 Slab Tav Fırını

Stok sahasında istiflenen slablar haddeleme kriterlerine, dolayısı ile üretim planına göre haddehaneye alınırlar. Slabların haddehanede ilk geldiği bölüm slab tav fırınıdır. Haddeleme işleminden önce slablar tav fırınına girerek yeniden ısıtılırlar. Tav fırınının temel görevlerini ve kullanım sebeplerini aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür [2, 14].

- ✓ Malzemeyi istenilen haddeleme sıcaklığına çıkarmak – böylece haddeleme işlemini tamamen östenitik bölgede gerçekleştirmek (karbon çelikleri genel olarak 1200-1320°C arasında fırından çıkar)
- ✓ Slabın dış ve merkezi arasındaki sıcaklık farkını azaltmak
- ✓ Haddeleme sonrası çökecek olan karbür ve nirtatları çözeltiye almak
- ✓ Malzemedeki döküm kaynaklı dentritik yapıları yok etmek, alaşım elementlerini homojen olarak tane sınırlarında tutmak

Slab tav fırınının yıllara göre tarihsel gelişimi aşağıda maddeler halinde verilmiştir [15]:

- ✓ 1970'li yıllarda itmeli tip fırınlar kullanılmaktaydı. 35 metre uzunluğunda olan brülörler fırının üst kısımlarında bulunuyordu.
- ✓ 1975 ve 1980 yıllarında yürüyen tabanlı fırınlar aynı ısıtma şekline sahip olarak kullanılmaya başlandı.
- ✓ 1985 ve 1990 yılları arasında yürüyen tabanlı fırınlara kubbe tarzı brülörler eklendi.
- ✓ 1990 ve 1995 yıllarında bu sistemin alt kısımlarına her iki tarafta karşılıklı bulunan brülörler eklendi fakat fırınların üst bölgeleri kubbe şeklindeki brülörler ile ısıtılmaya devam ediyordu.
- ✓ 1995 yılının ardından fırın kontrol sistemi, tamamıyla bilgisayarda yapılan ve ısı ihtiyacını her bir slab için ayrı hesaplayabilen sistem ile tekrar dizayn edildi. Bu sistemin getirdiği en büyük avantaj ise gerekli ısı ihtiyacını hesaplayabildiği için gereksiz yanmalardan fırını kurtarıyor ve ciddi bir biçimde yakıt maliyet kaybını önliyordu. Bu sistem ile birlikte tav fırınlarının tüm brülörleri iki yana karşılıklı olarak yerleştirilmiş brülörlerden oluşuyor ve uzunluğu ise 60 metreye kadar çıkabiliyordu.

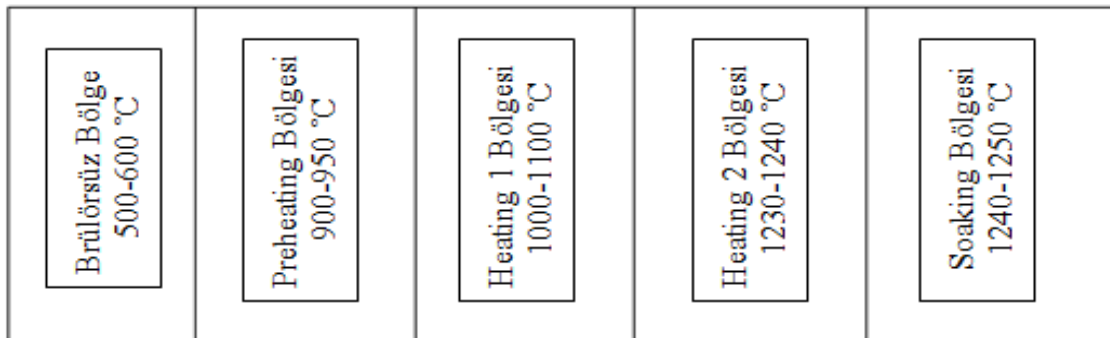
Çolakoğlu Metalurji A.Ş. sıcak sac haddehanesindeki fırının tipi “walking beam” ismine sahip hareketli tabana sahip olan bir fırındır. Yani fırının şarj kısmında fırın içerisine verilen slablar yukarıya kaldırılıp ileri taşınarak bir sonraki adıma verilir. Hareketli taban olmasının avantajı ise slabın hem üst hem de alt yüzeyinden ısınmanın gerçekleşmesi

ve daha homojen bir ısı yayılımı sağlamasıdır. Aynı zamanda ısınma çok daha hızlı gerçekleşir. İtmeli tiplerde ise slab arka taraftan sağlanan bir itici ile ileriye taşınır. Bu tür fırınlarda alt kısımdaki ısınma üst tarafa göre daha yavaş olur. Hassas kalitede (haddeleme ve soğutma esnasında sabit sıcaklık istenen malzemelerde) bu hareketlilik bir avantajdır. Bu hareketli tabana rağmen fırın içerisinde slabın “skid” adı verilen bazı bölgelerde zemin ile teması vardır. Bu kısımlar daha geç ısınır ve bu lokal bölgelerdeki sıcaklık farkı da ortalama 25°C’dir. Yürüyen tabanlı slab tav fırınına ait genel bilgiler Çizelge 3.2’de verilmiştir [2, 14].

Çizelge 3. 2 Sıcak sac haddehanesi slab tav fırını bilgileri

Kapasite	450 ton/saat – Soğuk şarj 600 ton/saat – Sıcak şarj (500 °C’de)
Uzunluk (Şarj ve deşarj hattı arası)	55,12 m
Genişlik	12,8 m
Brülör adedi	52
Yakma Gücü	157 MW
Bölge Adedi	5 (Brülörsüz-Ön ısıtma-Isıtma1-Isıtma2-Soaking)
Kullanılan Yakıt	Doğal Gaz (19.000 Nm ³ /sa)
Yakma Hava Fanı adedi	3
Yakma Hava debisi	173.000 Nm ³ /sa
Yakma Hava sıcaklığı	Brülörlerde 600 °C
Fırın ateşlemesi	Pilot brülörler ile
Fırın çıkışında atık gaz sıcaklığı	812 °C
Rekuperatör çıkışında atık gaz sıcaklığı	254 °C

Fırında 5 bölge bulunmaktadır ve her bir bölgenin sıcaklığı ise birbirinden farklıdır. Fırının bölümleri, bu bölgelerde gerçekleşen olaylar, sıcaklık aralıkları ve kısımlara ait özellikler Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3. 3 Slab tav fırını bölgeleri

1.Bölge: Bu bölgede brülör yoktur ve slabın ısısındaki artış bu bölgedeki yanan gazların verdiği sıcaklık ile sağlanır. Burada slabın sıcaklık aralığı 500-600°C'dir.

2.Bölge: Bu bölge preheating zone olarak isimlendirilen ön ısıtmanın yapıldığı kısımdır. Burada bulunan brülörler düşük kapasitelidir. Slab sıcaklığı artış göstererek 900-950°C aralığına yükselir.

3.Bölge: Asıl ısınmanın sağlandığı bölge bu bölgedir ve heating 1 zone olarak isimlendirilir. Bu bölgede yüksek kapasiteli brülörler bulunur ve slabın ulaştığı sıcaklık 1000-1100°C'dir.

4.Bölge: Heating 2 zone olarak isimlendirilen bu bölgede ısıtma işlemi devam eder. Alev modülasyonu bu bölgededir ve işleme göre alev modülasyonu devreye girerek sıcaklık ayarlaması yapılır. Ulaşılan sıcaklık aralığı ise 1230-1240°C'dir.

5.Bölge: Bu bölge slab çıkış sıcaklığının ayarlandığı soaking zone adı verilen bölgedir. Slab sıcaklığının homojenitesi ve slab ısısının merkez ile kabuk arasında aynı olması için ateşlemenin kesildiği bölgedir [1].

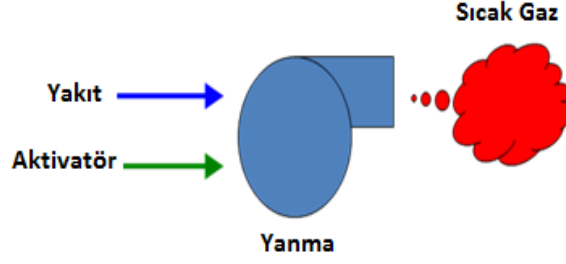
Fırın şarj kolları sayesinde şarj merdaneleri üzerine vinç ile bırakılan slablar fırın içerisine şarj edilir. Şarj esnasında slabın gerçek sıcaklığı pirometreler sayesinde ölçülür. Şarj makinesi, slabları şarj esnasında ilgili lazer telemetreler ile slabı gerçek ölçülerinde ebatlandırır ve bu bilgi ile slabın fırın içerisinde pozisyonlayacağı alana hesap edilir. Ayrıca bu bilgi slabın ısı ihtiyacının hesaplanmasında da kullanılır. Fırının sonunda bulunandeşarj makinesi kolları yardımıyla, şarj makinesinin yolladığı bilgiler doğrultusunda fırının içerisindeki sıcak slabın yerini tespit ederek, sıcak slabı haddeleme işlemi için hat boyuna gönderir. Şekil 3.4'te tav fırını şarj vedeşarj makineleri gösterilmektedir [2].



Şekil 3. 4 Tav fırını şarj ve deşarj makineleri

Fırın içersindeki slablar, fırının altında bulunan ve hidrolik silindirler ile rampa şeklinde konumlandırılmış yürüyen taban sayesinde ısı ihtiyaçlarına göre şarj kısmından deşarj bölgesine doğru hareket ederler. Yürüyen taban bu hareketi, bünyesinde bulunan hidrolik silindirler ve fırın içersinde konumlandırılmış sabit ve hareketli taşıyıcı kolonlar sayesinde yapar. Fırın yürüyen taban rampa silindirleri orta konumdayken fırın içersindeki sabit taşıyıcı kolonlar ile aynı seviyede bulunurlar. Rampa silindirleri yukarı doğru hareket ettikleri anda tüm slabları sabit kolon seviyesinden yukarı kaldırır. İleri doğru transfer hareketi gerçekleşir. Silindirler orta pozisyonuna geri dönerler ve sabit kolonların üzerine slabları bırakırlar ve aşağı pozisyonlarına inerek geri doğru gelirler fakat slablar fırın içersinde ötelenmiş olur. Bu hareket tekrar edilerek slablar fırın içersinde ilerler [2].

Fırındaki brülörler karşılıklı olarak yerleştirilmiş ve slabların ısı ihtiyaç kapasitelerini karşılayabilmek için özel olarak tasarlanmıştır. Brülör tasarımının temeli yakıtın, aktivatör ile uygun şekilde birleşerek yanma işlemini gerçekleştirmesidir. Buna başka bir açıdan bakarsak brülörler; kimyasal enerjiyi ısı enerjisine çeviren ekipmanlardır. Brülöre aktivatör ve yakıt girişi pnömomatik valflerin kontrol ettiği klepelerden geçerek fırın içersine ısı enerjisi olarak gönderilir. Şekil 3.5'te brülörde gerçekleşen yanma şematik olarak gösterilmiştir [2].



Şekil 3. 5 Brülörde yanmanın gerçekleşmesi

Yanma işlemi için gerekli olan aktivatör, fırında farklı şekillerde temin edilebilir. Bunlardan en basit ve en az maliyetlisi havadır. Bazı fırınların yakma hava hatlarına saf oksijen bağladıkları ve yanma verimini arttırdıkları da görülmüştür. Ayrıca aktivatör olarak saf oksijen de kullanılabilir fakat maliyet açısından tercih edilmese bile yanma verimini arttırarak, fırın verimini artırır. Yakıtın tutuşması için aktivatör elementi ne kadar yüksek sıcaklıkta brülöre gönderilirse, tutuşma o kadar kolay olur. Bu duruma istinaden fırın dizaynında sıcak atık gazı değerlendirmek amacıyla reküperatörler kullanılır. Yakma hava fanları sayesinde sisteme gönderilen hava ayrı bir hat ile reküperatörü oluşturan ince borulardan geçirilir, bu borular sıcak atık gazın atmosfere çıkmasından hemen önce konumlandırılır. Böylece reküperatör içersindeki soğuk yakma havası ile sıcak atık gaz arasında bir ısı transferi gerçekleşir. Bu ısı transferi sayesinde yakma havası ısınır ve tutuşma kolaylaşır. Ayrıca atık gazın sıcaklığı düşer ve atmosfere bu şekilde gönderilir. Şekil 3.6’te reküperatörü oluşturan bir modül gösterilmiştir [2].



Şekil 3. 6 Reküperatör modülü

Fırına şarj edilen slablar sıcak ve soğuk şarj olarak ayrılmaktadırlar. Sıcak şarj 250°C ve üzeri sıcaklıklarda, soğuk şarj ise bu sıcaklığın altında fırına şarj edilen slablardır. Fırına

sıcak şarj yapıldığında enerji tasarrufu sağlanır. Ancak şarj ister sıcak ister soğuk olsun her ikisinin çıkış sıcaklığı da aynıdır. Bir slabın fırından çıkması yaklaşık 3 saattir, fırın hızı ise 350 mm/dakikadır. Fırında slablar arasındaki mesafe ise 50 mm'dir. Şekil 3.7'de slab tav fırını deşarjı sonrası haddeleme hattına verilecek olan slab gösterilmiştir [1].



Şekil 3. 7 Fırından alınan slabın hatta verilmesi

3.3 Tufal Temizleme, Dik Hadde ve Kaba Hadde

Fırından çıkan slab ilk olarak “descaler” denen üniteye gelerek tufal temizleme işleminden geçer. Bu bölümde yapılan işlem slabın yüzeyine yüksek basınçta (~210 bar) su püskürterek malzeme yüzeyindeki tufali (oksit tabakası) temizlemektir. Tufal temizleme işlemi haddeleme hattı boyunca önce kaba hadde öncesi, daha sonra da şerit hadde öncesi olmak üzere iki kere yapılmaktadır. Şekil 3.8’de tufal temizleme ünitesine ait görüntü verilmiştir [1].



Şekil 3. 8 Tufal temizleme

Tufal temizleme ünitesinden geçen slab daha sonra kaba haddeye gelir. Kaba hadde tersinir olarak çalışır. Her slab en az 5 en çok 9 pasoda istenilen transfer kalınlığına getirilir. Kaba haddelemede genişlik her bir pasoda artar. Transfer genişliğini istenilen ölçülerde tutmak amacıyla dik hadde (edger) merdaneleri prosese eklenmiştir. Dik hadde merdaneleri slabın genişliğini 100mm kadar daraltabilir fakat paso sayısını arttırmamak ve üretim hızını sabit tutmak amacıyla genişlik daralması 50 mm'yi geçmez [1, 2].



Şekil 3. 9 Dik hadde

Kaba haddede işlenen malzeme sıcaklığı yüksek olduğu için transfer malzemesi tamamıyla rekristalize olmuş, iç gerilmelerinden kurtulmuş ve eşit tane büyüklüğüne sahiptir. Kaba haddede iş merdaneleri arasından geçen malzeme 220 mm'den minimum 25 mm maksimum 50 mm'ye kadar haddelenir. Ancak fiili olarak sağlanan incelme 34 mm'dir. Bu sırada sıcaklık ise 1250°C'den 1140°C'ye kadar düşer [16, 17].



Şekil 3. 10 Kaba hadde

Tüm haddeleme hattında her bir ayakta 2 adet iş merdanesi (work roll) ve 2 adet destek merdanesi (back up roll) bulunmaktadır. İş merdanesi çapları 1125 – 1250 mm, destek merdanesi çapları ise 1350 – 1500 mm arasında olabilmektedir. İş merdaneleri 20.000-22.000 tondan sonra, destek merdaneleri ise 100.000-150.000 tondan sonra aşınır, değiştirilir ve bu aşınmanın giderilmesi için taşlamaya gönderilir. Taşlamada merdanenin yüzeyi düzgün hale getirildikten sonra tekrar kullanılmak üzere bekler. İş merdaneleri en fazla 1125 mm, destek merdaneleri ise en fazla 1350 mm çapa kadar kullanılabilirler. Bu çap değerlerinden daha düşük olan merdanelerin ömrü de dolmuş olur. Her bir ayakta iş merdanelerinin yanında destek merdanelerinin kullanılmasının en büyük amacı iş merdanesinde haddeleme sırasındaki elastik deformasyonu minimuma indirmektir. Bunun yanında destek merdaneleri ezme yükünü de destelemektedir [1].

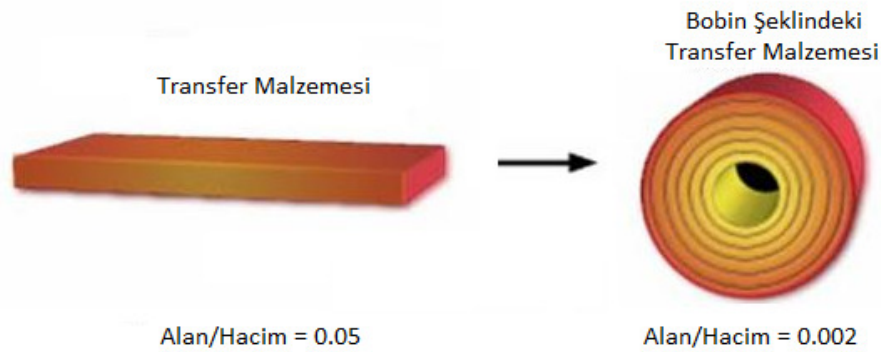
3.4 Coil Box, Makas ve Şerit Hadde

Kaba haddeden çıkan malzeme Coil Box adı verilen kısma gelir ve burada sarılır. Bu sarım işleminin iki ana amacı vardır. Birisi yerden kazanç sağlamak ve arkadan gelen ürünün yolunu açmak, diğeri ise yüzey alanını düşürerek ısı homojenizasyonunu sağlamaktır. Sarılmış malzemede yüzey alanının daralması sonucu ısı kaybı azalır ve fırındaki ısıtmadan dolayı “skid mark” oluşmuş olan kısımlardaki bölgesel soğumalar giderilir. Bu ünitenin bir diğeri işlevi ise slabin baş kısmını kuyruk, kuyruk kısmını baş yapmasıdır [1]. Şekil 3.11’de Coil Box’a ait görüntü verilmiştir.



Şekil 3. 11 Coil box

Coil Box teknolojisi 1970'li yıllarda Kanada'da STELCO STEEL firması tarafından bulunmuş, geliştirilmiş ve sıcak sac haddehanelerine entegre edilmiştir. Coil Box, kaba haddeden gelen transfer malzemesini bobin haline getirerek uygun hızda şerit haddeye sevk ederken aynı zamanda üretim hızını da arttırır. Kaba hadde ile şerit hadde arasındaki kısıtlı mesafeden dolayı (85 metre) bir malzeme şerit haddede haddeleninceye kadar kaba haddede başka malzeme haddelenemez. Bu durum ise üretimde azalmaya neden olur. Ancak transfer malzemesi Coil Box ile sarıldığında kaba haddede diğer malzemenin haddelenebilmesi için yer kazanılmış olur. Şekil 3.12'de transfer malzemesinin alan hacim oranları gösterilmektedir [2, 18].



Şekil 3. 12 Transfer malzemesinin alan-hacim oranları

Coilbox'tan sonra açılan ve şerit haddeye alınacak olan malzeme önce kırpıntı makasına (crop shear) gelir ve burada düzgün olmayan bobin baş ve son kısımları kesilir. Buradaki kırpıntı makasının tek amacı malzeme baş ve son kısmında haddelemeden dolayı meydana gelen şekil bozukluğunu gidermektir. Makastan sonra malzeme ikincil tufal temizleme (secondary descaler) kısmına gelir ve burada ~190 bar basınç ile malzeme yüzeyine yine su püskürtülerek tufal temizleme işlemi yapılır [1].



Şekil 3. 13 Kırpıntı makası

İkincil tufal temizleme işleminden sonra malzeme şerit haddeye (finishing mill) girer. Şerit hadde 4 ile 8 tezgahtan oluşabilir, çoğunlukla ise 6 ve 7 tezgahlı olanlar tercih edilir. Çolakoğlu'nda şerit haddenin 7 tezgahı bulunmaktadır. Bunlar F1, F2, F3, F4, F5, F6 ve F7 olarak isimlendirilmektedir. Her bir tezgahta aynı kaba haddede olduğu gibi 4 adet merdane (2 iş, 2 destek) bulunmaktadır. Bu haddeden çıkan malzeme ise yaklaşık 960°C'de çıkar. Kalınlık ise şerit haddede 25-50 mm'den 1,2-25 mm'ye kadar düşürülür. Genişlik ise 800-1650 mm arasında değişebilmektedir. Burada malzemenin çıkış kalınlığı son kalınlığıdır. Şerit haddede istenilen kalınlıkta çıktıktan sonra haddeleme işlemleri sonlanır ve artık sac soğutma işlemine tabi tutulur. Şekil 3.14' te şerit hadde tezgahları görülmektedir [2, 16, 17].



Şekil 3. 14 Şerit hadde tezgahları

3.5 Duşlu Masa, Bobin Sarma ve Stoklama

Nihai ürünün şerit haddeden çıkmasının ardından gerekli mekanik özellikleri malzemeye kazandırmak amacıyla duşlu masalarda (laminar cooling) malzemeye kontrollü ve hassas bir şekilde su verilir. Şerit malzeme duşlu masa üzerinde hem üstten hem de alttan gelen sular ile soğutulur. Malzemedan beklenen mekanik ve metalurjik özelliklerin elde edilebilmesi için soğutma hızı ve malzemenin üretim hattından çıkış sıcaklığı (sarılma sıcaklığı) su akışının kontrolü ile sağlanmalıdır. Çoğu işletmede şerit hadde ile bobin sarma ünitesi arası 80-90 metre uzunluğunda bir alana

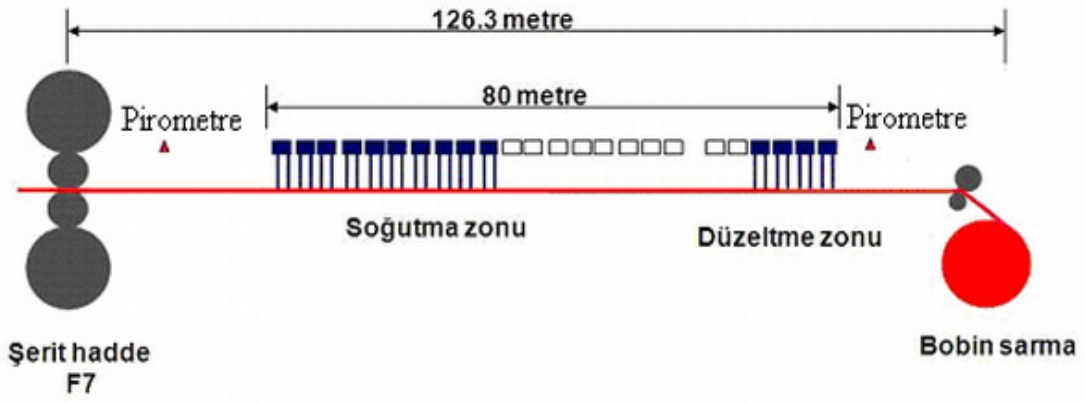
sahip olup 0,7 bar basınçla 12.700 m³/sa debi sağlayabilen 16 adet üst 49 adet alt su kolektörlerinden oluşmaktadır. Malzemeye verilen su direkt olarak malzemenin mekanik özelliklerine etki edeceğinden dolayı hassas pirometreler ile sürekli sıcaklık kontrolü ve çıkış hedef sıcaklığını korumak amacıyla akış debisi ve miktarı valfler ile kontrol edilir. Şekil 3.15'te duşlu masalar görülmektedir [1, 2, 19].



Şekil 3. 15 Duşlu masalar

Otomasyon sistemi; malzeme kalitesi, şerit hadde çıkış hızı, şerit hadde çıkış sıcaklığı ve duşlu masalar sonunda istenen malzeme sıcaklığına (sarılma sıcaklığı) göre gerekli su miktarını ve açılması gereken heder miktarını belirler. Haddeleme sırasında yukarıdaki parametrelerden herhangi birinin değişmesi durumunda su debisini ve heder miktarını değişen duruma uyum sağlayacak şekilde değiştirir [2].

Duşlu masalar soğutma bölgesi ve düzeltme bölgesi olarak iki bölgeye ayrılmıştır. Soğutma bölgesi ana soğutmanın yapıldığı yerdir. Düzeltme bölgesinde, malzemenin bobin sarma girişinde ölçülen sıcaklığına göre varsa hedef sıcaklıktaki sapmalar düzeltilir. Her kolektör üst grubu hidrolik silindirler ile kontrol edilir ve istenildiği zaman bu kolektörler manüel olarak kumanda edilebilir. Şekil 3.16'da duşlu masanın şematik olarak bölgeleri gösterilmiştir [2].



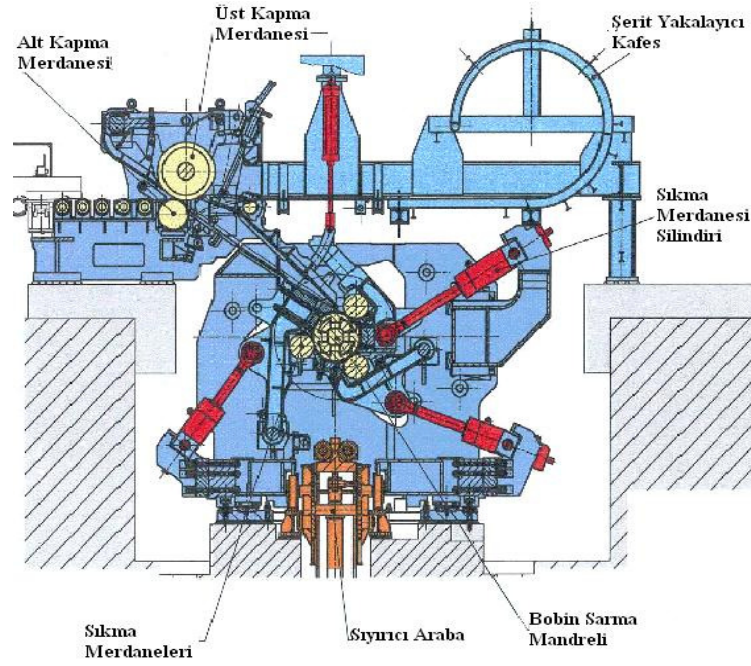
Şekil 3. 16 Duşlu masa bölgeleri

Malzemenin duşlu masalardan çıkış sıcaklığı üretilen kaliteye göre değişmekle birlikte yaklaşık 600-650°C'dir. Eğer malzeme hiç su verilmeden bu kısımdan geçerse sıcaklığı ~750-800°C'dir. Bu sıcaklık aynı zamanda bobin sarma sıcaklığıdır ve sarma sıcaklığı da malzemenin fiziksel özelliklerini etkilediğinden dolayı soğutma işlemi düzgün bir şekilde yapılmalıdır [1].

Çelik üretim sürecinde soğutma işleminin çok önemli bir yere sahip olduğu bilinmektedir. Kontrollü soğutma, mikroyapı ve metal malzemenin özelliklerinin optimizasyonu amacı ile birçok ticari proste uygulanmaktadır. Öyle ki, soğutma sırasında çeşitli kombinasyonlardaki mikroyapıları ayırıp kaliteli çelik üretmek mümkündür. Bu da soğutma işleminin çelik üretiminde kritik bir bileşen olduğunu açıkça göstermektedir Sıcak haddeleme sonrası soğutma prosesinde, çelik üreticileri üretim maliyetlerini düşürmek, sürekli ürün iyileştirmesi sağlamak, hatta yeni mikroyapılar oluşturmak amacı ile yeni teknolojiler geliştirmektedir [20, 21].

Sıcak sac haddeleme işleminin son adımı olan bobin sarmada (down coiler), haddelenmiş olan malzeme, stoklama ve taşıma kolaylığı açısından bobin haline getirilir. Şerit haddeden çıkan şerit başının duşlu masalarda uygun bir şekilde soğutulmasının ardından malzeme bobin sarmaya yan yollukların malzemeyi eksenlemesiyle birlikte ulaşır. Baskı merdanesi sayesinde katlı veya dalgalı olarak bobin sarmaya ulaşan şerit başları düzeltilip malzeme kapma merdanesine düzgün bir şekilde sevk edilir. Alt ve üst merdaneler pozisyon ve kuvvet kontrollü olup hidrolik silindirler ile tahrik edilirler. Kılavuz plakası sayesinde kapma merdanesinden çıkan şerit başı, dönmekte olan mandrele sarılmaya başlar. İlk sargılar, kalite açısından önemli

olmasından dolayı üç adet kılavuz baskı (sıkma) merdanesi ile kontrol edilir. Bu merdaneler de kuvvet kontrollü olup hidrolik silindirler ile tahrik edilir. Malzeme başının mandrale girmesinin ardından şerit haddenin son tezgahı ile mandrel arasında bir gergi meydana gelir bu suretle şerit, bobin halinde sarılmaya başlar. Malzemenin bobin halinde sarılmasının bitmesine üç veya beş sargı kala, dış sargıların da kalite açısından önemli olması nedeni ile sıkma merdaneleri tekrar kılavuzluk görevi yaparlar. Şekil 3.17’de bobin sarma ünitesine ait şema ve ekipmanları verilmiştir [22].



Şekil 3. 17 Bobin sarma ünitesi

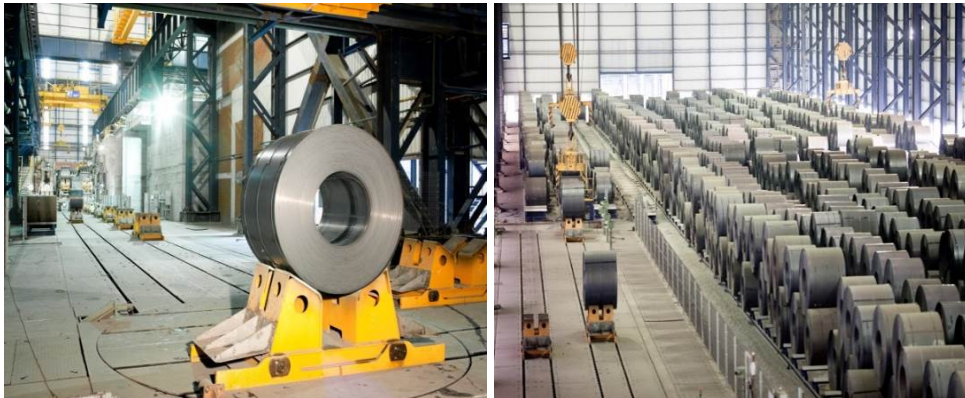
Şeridin bobin halinde sarılmasının ardından sıcak rulo ‘stripper car’ adı verilen, üzerinde iki adet merdane olan sıyrıcı arabaya aktarılır. Sıyrılan bobin çember atma makinesinde sacın kaymaması için dışından minimum 3 adet çember (tel şerit) ile gerdirilerek sarılır ve palet transport sistemi ile bobin stok sahasına sevkiyat için bırakılır. Şekil 3.18’de bobin sarma makinesinde çıkıp çemberleme makinesine giren bobine ait görüntü verilmiştir [2].



Şekil 3. 18 Çemberleme makinesindeki bobin

Sarılan ve çemberlenen her 5 veya 6 bobinde bir, bir adet bobin stok sahasına gönderilmeden önce kalite kontrol sahasına alınır. Belirli sürelerde açılan sacın baş kısmından fizik laboratuvarına gönderilmek ve testlere tabi tutulmak için numune alınır. Ancak bu işlem her sac açılışında yapılmamaktadır. Burada sürekli yapılan işlem malzemenin kalınlığı ve genişliğinin ölçülmesi, aynı zamanda da yüzey kontrolünün yapılmasıdır [1].

Kalite kontrol işleminden sonra ise bobinler stok sahasına doğru ilerler. Stok sahasına yerleştirilmeden önce numaralandırılır. Böylece hangi müşteri için hangi bobinin üretildiği takip edilir ve karışıklık önlenmiş olur. Bu numaralandırma sayesinde bobinin tüm özellikleri belirlenmiş olur. Otomatik numaralandırma işleminden sonra ise en son adım olan gözden çember atma kısmına gelir. Burada müşterinin isteğine göre 3-4 kez merkezden geçecek şekilde gözden çember atma işlemi yapılır. En son ise palet yolunun sonuna da vinçler ile bobinler alınır ve stok sahasına yerleştirilir. Şekil 3.19'da konveyör sistemi ile taşınan bobinler ve bobin stok sahası görüntüleri verilmiştir [1].



Şekil 3. 19 Konveyör taşıma sistemi ve bobin stok sahası

3.6 Mekanik Testler ve Mikroyapısal İnceleme

Üretim hattı sonunda belirli bobinlerden alınan numuneler hem mekanik testlere hem de mikroyapı incelemelerine tabi tutulur. Malzemelerin tüm fiziksel, kimyasal, elektronik ve mekanik özellikleri, bileşimlerinin yanı sıra iç yapıları ile doğrudan ilgilidir. Metalografik yöntemlerle bir metalin iç yapısında bulunan tanelerin türleri, biçimi ve büyüklüğü ile tek veya çok fazlı oluşu hakkında bilgi elde edilebilmektedir. Metalografik incelemede seçilen numunenin gerek fiziksel gerekse kimyasal bileşim yönünden esas malzemeyi tam olarak temsil etmesi gereklidir. Yüzeyde en az plastik şekil değiştiren ve en az ısı meydana getiren kesme yöntemi seçilerek alınan numuneler mekanik testler için ayrı, mikroyapı incelemeleri için ayrı olarak işlem görür [23].

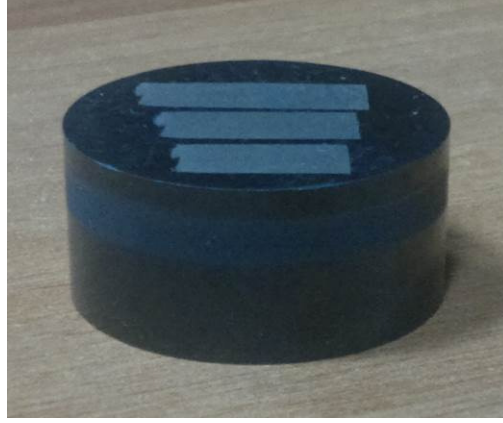
Akma, çekme ve uzama testlerine tabi tutulacak numuneler CNC tezgahında standarda uygun boylarda işlenerek hazırlanır. Çekme cihazı ve cihaza bağlı olan numuneye ait görüntü Şekil 3.20’de verilmiştir.



Şekil 3. 20 Çekme cihazında teste tabi tutulan numune

Mikroyapısal inceleme yapılacak olan numuneler ise ufak boyutlarda kesilip kalıplama işlemine tabi tutularak zımparalama ve parlatma işlemlerine hazır hale getirilir.

Kalıplama işlemi; numunelerin bakalite alınarak daha kolay zımparalama ve parlatma işlemlerinden geçirilmesini sağlar. Parlatma işlemi sonrası tane sınırlarının mikroskop altında görünür hale gelmesi için nital, pikral gibi dağlama reaktifleri kullanılır. Bu reaktifler, mikroyapı ayrıntılarını, numunenin yüzeyinden içeriye doğru selektif olarak çözündürmesi sonucu ortaya çıkarır. Bakalite alınıp zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerinden geçmiş numuneye ait görüntü Şekil 3.21’de verilmiştir [23].



Şekil 3. 21 Bakalite alınmış numuneler

Bakalite alınan numuneler optik mikroskop veya elektron mikroskobunda metalografik incelemeye hazır hale gelir. Optik mikroskop ile yapılan metalografik inceleme sonucu değişik mikroyapısal oluşumlar, örneğin tane sınırları, faz sınırları ve mikrogözenek ile bu oluşumlardaki değişimler algılanabilir. Optik mikroskopta ışık fotonları görüntüleme partikülleri iken elektron mikroskobunda bu partiküller elektronlardır. Optik mikroskopta ışık fotonları konvansiyonel cam merceklerle odaklanır. Elektron mikroskobunda ise elektriksel alanda ivmelendirilmiş elektronlar manyetik alanda saptırılır, bu doğrultuda elektromanyetik merceklerden geçen elektronlar odaklanarak görüntü elde edilir [23].

BÖLÜM 4

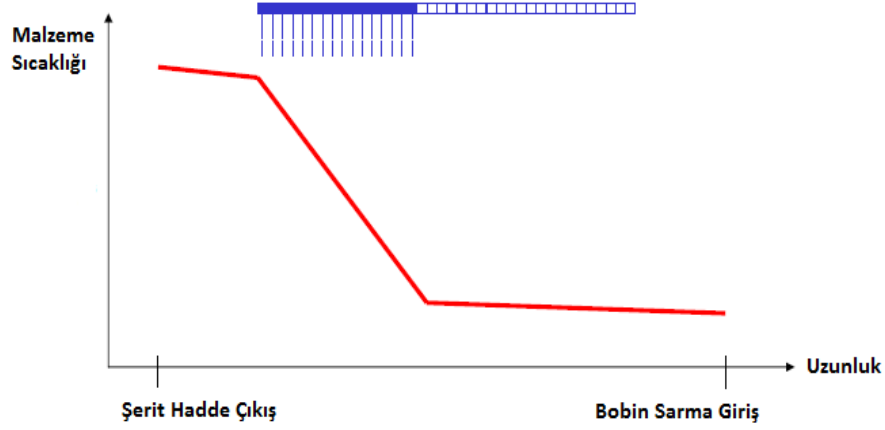
SOĞUTMA PRATİKLERİ

Çelik sac malzemedan beklenen mekanik özelliklerin sağlanmasında, malzemenin duşlu masadaki sıcaklık kontrolü en kritik işlemlerden biridir. Sıcak haddeleme işlemlerinde malzemenin gereken sıcaklıkta sarılabilmesi ve beklenen tane yapısına sahip olması amacı ile hızlandırılmış soğutma işlemi uygulanmaktadır. Bu işlem malzemenin son mikroyapısı ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir işlem adımıdır. Şerit malzemenin soğutma karakteristiğine uygun soğutma koşullarının oluşturulması ile daha hassas sıcaklık ve soğutma kontrolü sağlanır [24, 25].

Döküm kalitesine göre uygun ikmal sıcaklığında şerit haddeden çıkan malzeme duşlu masaya gelir ve burada malzemeye su verilerek istenen sarılma sıcaklığına ulaşılır. Duşlu masada malzemeyi baş, orta ve kuyruk olmak üzere farklı bölgelerinden soğutmak mümkün olduğu gibi farklı soğutma stratejileri de kullanılabilir. Şerit haddeden çıkan her bir malzemenin belirlenmiş olan sarılma sıcaklığı ve soğutma stratejisine göre, duşlu masadaki sular açılmaktadır. Bu stratejiler çoğaltılabilmekle beraber; erken soğutma (early cooling), geç soğutma (late cooling), çift fazlı soğutma (dual phase cooling) olarak temel soğutma pratikleri bulunmaktadır [26].

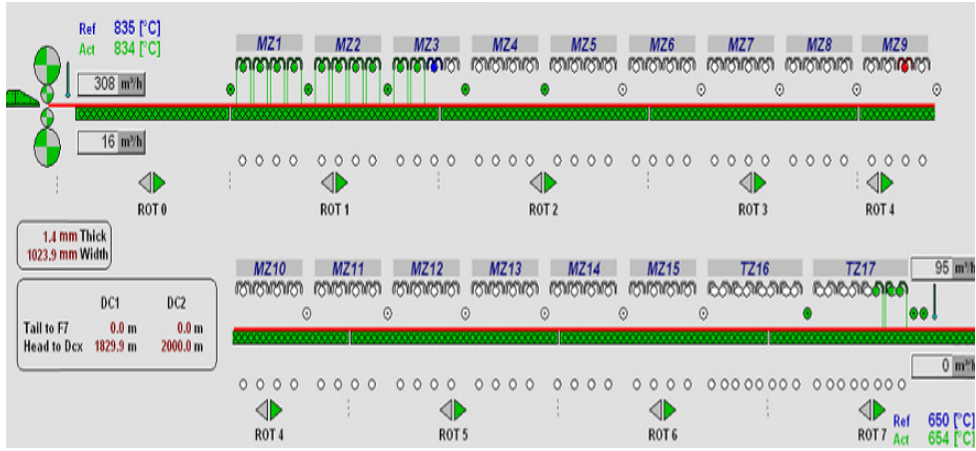
4.2 Erken Soğutma

Erken soğutma pratiğinde, hedeflenen sarılma sıcaklığına en kısa sürede ulaşabilmek amacı ile malzeme şerit haddeden çıkar çıkmaz duşlu masa başlıkları açılır. Erken soğutma pratiği ile ilgili şematik gösterim Şekil 4.1’de verilmiştir [26].



Şekil 4. 1 Erken soğutma pratiği

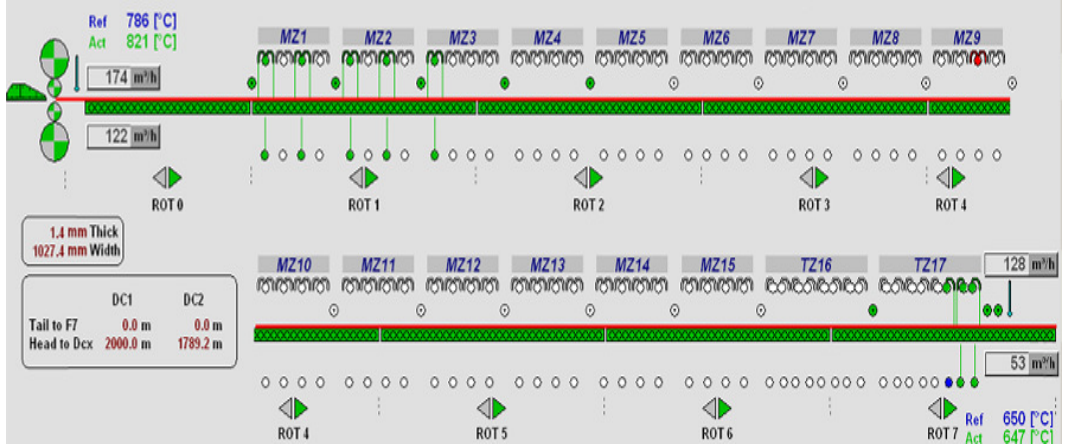
Erken soğutma pratiğinin Early Quick (Erken Hızlı) ve Early Slow (Erken Yavaş) olarak ifade edilen 2 farklı uygulaması mevcuttur. Early Quick (Erken Hızlı) pratiğinde malzeme şerit haddeden çıkar çıkmaz duşlu masa başlıkları açılır ve malzeme aralıksız olarak tüm başlıklar açık şekilde soğutma bölgesinden çıkar. EQ (early quick) pratiğine ait gösterim Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4. 2 Early Quick (Erken Hızlı) soğutma pratiği

Örneğin; genel yapı çeliği S235JR, galvanizlemeye uygun yapı çeliği S275JR, soğuk şekillendirmeye uygun mikro alaşımlı çelik S315MC kalitelerinde Early Quick (Erken Hızlı) soğutma pratiği uygulanmaktadır.

Early Slow (Erken Yavaş) pratiğinde ise yine malzeme şerit haddeden çıkar çıkmaz duşlu masa başlıkları açılır ancak bu uygulamada başlıklar aralıklı olarak açılır, yani arada açılmayan başlıklar bulunur. ES (early slow) pratiğine ait gösterim Şekil 4.3’te verilmiştir.



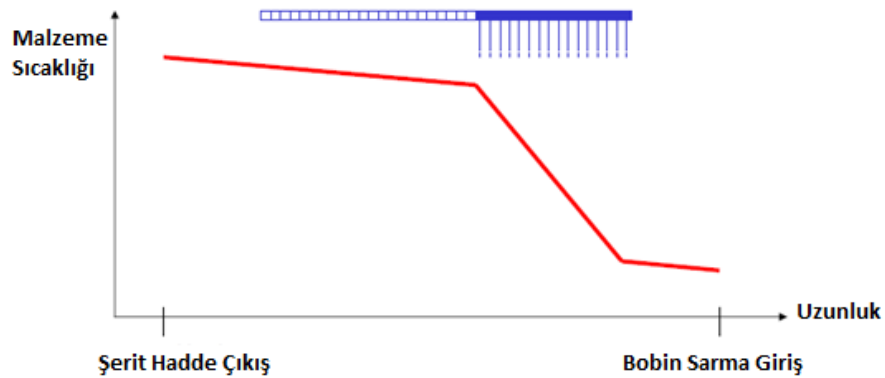
Şekil 4. 3 Early Slow (Erken Yavaş) soğutma pratiği

Her iki uygulamada da hedef, malzemeyi belirlenmiş olan sarılma sıcaklığına getirmektir. Ancak her bir döküm kalitesi ve bu kaliteye ait mikroyapıyı yakalamak adına bu şekilde 2 farklı uygulama mevcuttur.

Örneğin; yüksek mukavemetli mikroalaşımli jant çeliği S355MC, LPG Tüp Çeliği P245NB, API Petrol Borusu çeliği X70 kalitelerinde early slow (erken yavaş) soğutma pratiği uygulanmaktadır.

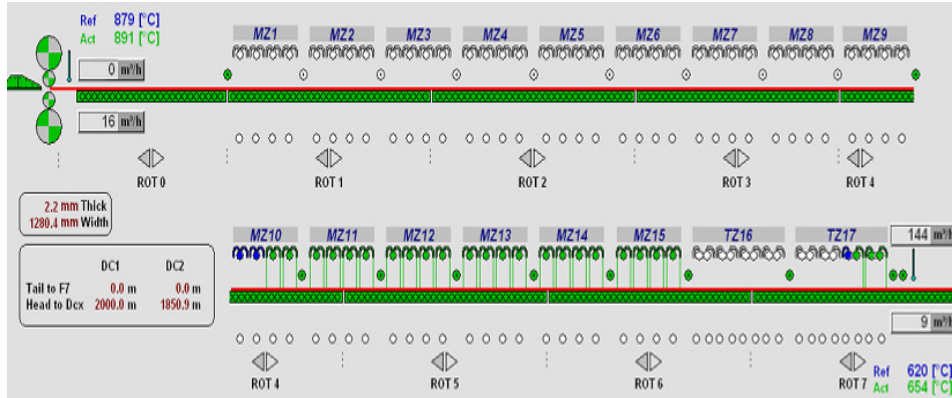
4.3 Geç Soğutma

Geç soğutma pratiğinde, hedeflenen sarılma sıcaklığına mümkün olan en geç zamanda ulaşmak amacı ile sistem duşlu masanın ilk ve orta kısmında bulunan başlıkları kapatır ve bobin sarmaya girmeden önceki başlıkları açar. Geç soğutma pratiği ile ilgili şematik gösterim Şekil 4.4'te verilmiştir [26].



Şekil 4. 4 Geç soğutma pratiği

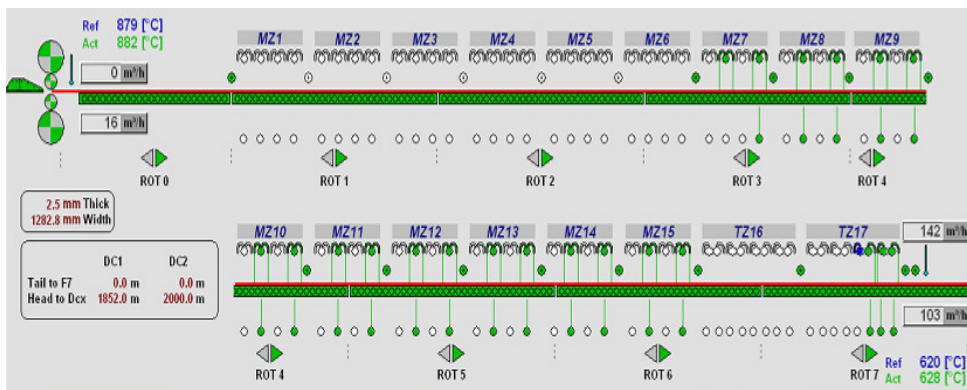
Geç soğutma pratiğinin Late Quick (Geç Hızlı) ve Late Slow (Geç Yavaş) olarak ifade edilen 2 farklı uygulaması mevcuttur. Late Quick (Geç Hızlı) pratiğinde malzeme bobin sarmaya girmeden önceki başlıklar açılır ve malzeme aralıksız olarak tüm başlıklar açık şekilde soğutulurken bobin sarmada sarılır. Yani malzeme şerit hadde sonrası ilk olarak belli bir hat boyunca hava ile soğutulur, daha sonra su verme işlemi uygulanır. LQ (late quick) pratiğine ait gösterim Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4. 5 Late Quick (Geç Hızlı) soğutma pratiği

Örneğin; karbon çeliği SAE 1006, kazan çeliği P235GH, API petrol sondaj borusu çeliği 5CT J55 kalitelerinde Late Quick (Geç Hızlı) soğutma pratiği uygulanmaktadır.

Late Slow (Geç Yavaş) pratiğinde ise yine malzeme bobin sarmaya girmeden önce duşlu masa başlıkları açılır ancak bu uygulamada başlıklar aralıklı olarak açılır. LS (late slow) pratiğine ait gösterim Şekil 4.6'da verilmiştir.



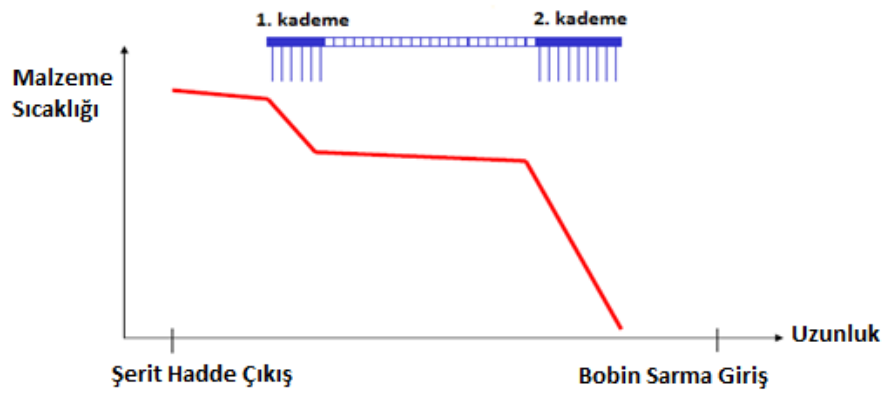
Şekil 4. 6 Late Slow (Geç Yavaş) soğutma pratiği

Örneğin; soğuk haddeleme ve galvanizlemeye uygun St 22, boru ve profil çeliği ASTM A53 Grade A, karbon çeliği SAE 1040 kalitelerinde Late Slow (Geç Yavaş) soğutma pratiği uygulanmaktadır.

Erken soğutma pratiğinde olduğu gibi burada da hedef, malzemeyi belirlenmiş olan sarılma sıcaklığına getirmektir. Ancak her bir döküm kalitesi ve bu kaliteye ait mikroyapıyı yakalamak adına bu şekilde 2 farklı uygulama mevcuttur.

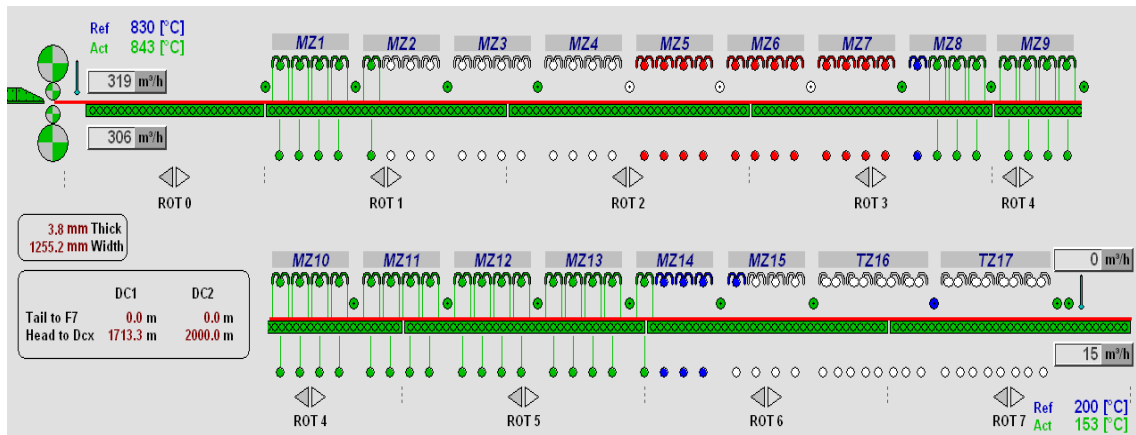
4.4 Çift Fazlı Soğutma

Çift fazlı soğutma pratiğinde, soğutma işlemi iki kademeli yapılıır. İlk soğutma kademesi yeterli oranda ferrit oluşturmak için, ikinci kademe ise çift faz mikroyapısını elde etmek için kullanılmaktadır. İki soğutma kademesi arasında ise malzemeye su verilmemektedir. Çift fazlı soğutma pratiği ile ilgili şematik gösterim Şekil 4.7’de verilmiştir [26].



Şekil 4. 7 Çift fazlı soğutma eğrisi

Örneğin; soğuk şekillendirmeye ve sıvamaya uygun yüksek mukavemetli çift fazlı jant çeliği HCT580X (DP 600) kalitesinde çift fazlı soğutma pratiği uygulanmaktadır.



Şekil 4. 8 Çift fazlı soğutma pratiği

BÖLÜM 5

ÇELİK KALİTELERİ

5.1 S 235 JR – Genel Yapı Çeliği

İnşaat makineleri ve iş makineleri imalatı, genel konstrüksiyon levhaları, muhtelif makine parçası imalatı, kara ve demiryolu araçları imalatı için kullanılan atmosferik korozyona dirençli sıcak haddelenmiş yapı çeliği olarak bilinen ve DIN normuna göre ST 37-2 olarak ifade edilen S235JR kalitesi Çizelge 5.1’den görüleceği üzere düşük C ve Mn içermektedir [27].

Çizelge 5. 1 S235JR kalitesine ait kimyasal analiz

Kalite	C max	Mn max	Si max	Cr max	Ni max	Sn max	Cu max	Al min	Mo max	Ti max	N (ppm) max
S235JR	.17	1.40	-	-	-	-	.55	-	-	-	120

S235JR kalitesine ait haddeleme ve soğutma pratiğine ait bilgiler Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5. 2 S235JR kalitesi haddeleme ve soğutma pratiği

Kalite	Haddeleme Kalınlığı (mm)	İkmal Sıcaklığı (°C)	Sarılma Sıcaklığı (°C)	Soğutma Paterni
S235JR	$T \leq 2\text{mm}$	880	650	LS
	$2\text{mm} < T \leq 6\text{ mm}$	880	620	LS
	$6\text{mm} < T \leq 16\text{ mm}$	880	630	EQ
	$16\text{mm} < T \leq 26\text{ mm}$	880	650	EQ

Kalite, Çizelge 5.3'ten görüleceği üzere maksimum 235 N/mm² akma dayanımı ve 360 N/mm² çekme dayanımına sahiptir.

Çizelge 5. 3 S235JR kalitesi mekanik özellikleri

Kalite	Re (N/mm ²)		Rm (N/mm ²)	Darbe	
S235JR	d≤16	d>16		Sıc. (°C)	KVc (J)
	235	225	360-510	+20	27
	A (%) min				
	1<d≤1,5	1,5<d≤2	2<d≤2,5	2,5<d≤3	3<d
	16	17	18	19	24

5.2 S 275 JR – Genel Yapı Çeliği

Yapı Elemanları (inşaat sektörü), çatı konstrüksiyonları, otomotiv ve otomotiv yan sanayi, bisiklet, mobilya ve çelik eşya üretiminde kullanılan ve yapı çeliği olarak bilinen S275JR kalitesine ait kimyasal yapı Çizelge 5.4'te verilmiştir. Bu kalite S235JR kalitesine göre daha fazla C ve Mn içermektedir [28].

Çizelge 5. 4 S275JR kalitesine ait kimyasal analiz

Kalite	C max	Mn max	Si max	Cr max	Ni max	Sn max	Cu max	Al min	Mo max	Ti max	N (ppm) max
S275JR	.21	1.50	-	-	-	-	.55	-	-	-	120

S275JR kalitesine ait haddeleme ve soğutma pratiğine ait bilgiler Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5. 5 S275JR kalitesi haddeleme ve soğutma pratiği

Kalite	Haddeleme Kalınlığı (mm)	İkmal Sıcaklığı (°C)	Sarılma Sıcaklığı (°C)	Soğutma Paterni
S275JR	T ≤ 6mm	880	660	LS
	6mm < T ≤ 16mm	880	650	EQ
	16mm < T ≤ 26mm	880	660	EQ

Bu kalite, Çizelge 5.6'dan görüleceği üzere maksimum 275 N/mm² akma dayanımı, 430 N/mm² çekme dayanımı ve %21 maksimum uzamaya sahiptir.

Çizelge 5. 6 S275JR kalitesi mekanik özellikleri

Kalite	Re (N/mm ²)		Rm (N/mm ²)		Darbe	
S275JR	d≤16	d>16	d<3	3≤d	Sıc. (°C)	KVc (J)
	275	265	430-580	410-560	+20	27
	A (%) min					
	1<d≤1,5	1,5<d≤2	2<d≤2,5		2,5<d≤3	3<d
	14	15	16		17	21

5.3 S 355 JR – Genel Yapı Çeliği

Her türlü makine ve makine parçası imalatı, genel konstrüksiyon, kara ve demir yolu araçları imalatında kullanılan yüksek mukavemetli yapı çelikleridir. S355JR kalitesine ait kimyasal yapı Çizelge 5.7’de verilmiştir. S235JR ve S275JR kalitelerinden daha yüksek oranda C ve Mn içeren bu kalite aynı zamanda kalsiyum da içermektedir.

Çizelge 5. 7 S355JR kalitesine ait kimyasal analiz

Kalite	C max	Mn max	Si max	Cr max	Ni max	Sn max	Cu max	Al min	Mo max	Ca ppm	N(ppm) max
S355JR	.24	1.60	.55	-	-	-	.55	-	-	15-50	120

S355JR kalitesine ait haddeleme ve soğutma pratiği bilgileri Çizelge 5.8’de verilmiştir.

Çizelge 5. 8 S355JR kalitesi haddeleme ve soğutma pratiği

Kalite	Haddeleme Kalınlığı (mm)	İkmal Sıcaklığı (°C)	Sarılma Sıcaklığı (°C)	Soğutma Paterni
S355JR	T ≤ 3mm	880	640	LS
	3mm < T ≤ 6mm	880	650	EQ
	6mm < T ≤ 12mm	860	630	EQ
	12mm < T ≤ 18mm	860	640	EQ
	18mm < T ≤ 26mm	860	630	EQ

Bu kalite, Çizelge 5.9’dan görüleceği üzere maksimum 355 N/mm² akma dayanımı, 510 N/mm² çekme dayanımı ve 27 KVc darbe dayanımına sahiptir [29].

Çizelge 5. 9 S355JR kalitesi mekanik özellikleri

Kalite	Re (N/mm ²)		Rm (N/mm ²)		Darbe	
S355JR	d≤16	d>16	d<3	3≤d	Sıc. (°C)	KVc (J)
	355	345	510-680	470-630	+20	27
	A (%) min					
	1<d≤1,5	1,5<d≤2	2<d≤2,5		2,5<d≤3	3<d
	13	14	15		16	20

5.4 SAE 1010 – Karbon Çeliği

SAE 1010 kalitesine ait kimyasal yapı Çizelge 5.10’da verilmiştir. S235JR, S275JR ve S355JR kalitelerine göre daha düşük oranda C ve Mn içermektedir.

Çizelge 5. 10 SAE 1010 kalitesine ait kimyasal analiz

Kalite	C max	Mn max	Si max	Cr max	Ni max	Sn max	Cu max	Al min	Mo max	P max	S max
SAE 1010	.08 .13	.30 .60	.10	-	-	-	-	-	-	.030	.050

SAE1010 kalitesine ait haddeleme ve soğutma pratiği bilgileri Çizelge 5.11’de verilmiştir.

Çizelge 5. 11 SAE 1010 kalitesi haddeleme ve soğutma pratiği

Kalite	Haddeleme Kalınlığı (mm)	İkmal Sıcaklığı (°C)	Sarılma Sıcaklığı (°C)	Soğutma Paterni
SAE 1010	$T \leq 6\text{mm}$	880	650	ES
	$6\text{mm} < T \leq 26\text{mm}$			LQ

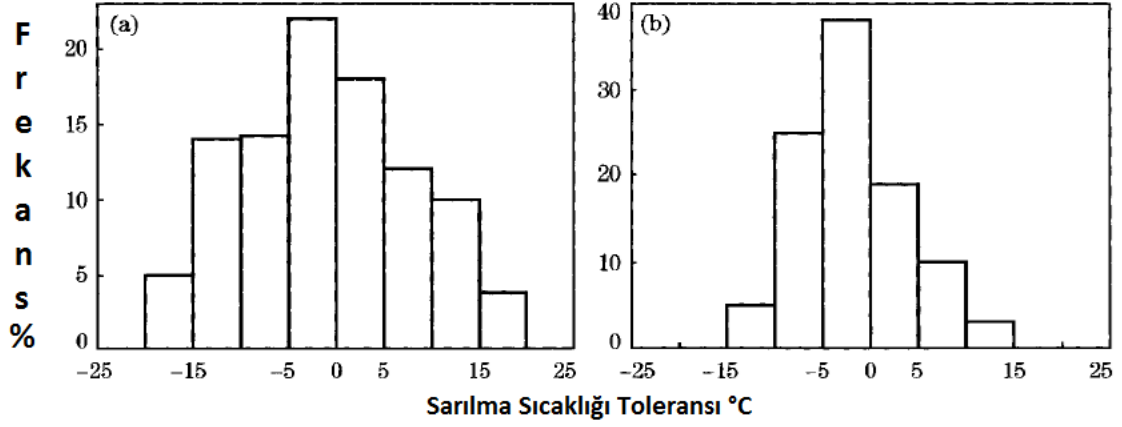
SAE kalite malzemeler standartta kimyasal analiz garantilidir. Bu kaliteler için mekanik değer garantisi verilmemektedir; bu nedenle standartta akma, çekme dayanımı gibi mekanik değerleri bulunmamaktadır.

SOĞUTMA PRATİKLERİ ile İLGİLİ ARAŞTIRMALAR

Haddeleme prosesinde, şerit haddeden çıkan malzemeye duşlu masada su verilmesi ile ilgili birçok bilimsel çalışma bulunmaktadır. Xie Hai-bo, Liu Xiang-hua, Wang Guo-dong, Zhang Zhong-ping'in yaptığı çalışmada da belirtildiği üzere malzemenin mikroyapısı ve mekanik özellikleri, şerit hadde ile bobin sarma arasında malzemedeki sıcaklık düşüşüne bağlıdır. Duşlu masa ile malzemeyi soğutmanın, hem malzemenin sarılma sıcaklığının kontrolü hem de ideal mikroyapı ve mekanik özelliklerin elde edilmesi için en etkili yöntem olduğu bulunmuştur.

Bu çalışmada, geleneksel soğutma modellerinin malzemenin uygun sarılma sıcaklığına ulaşmasında beklenen hassasiyeti göstermemesi sebebi ile yeni bir duşlu masa sistemi geliştirmek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda 2 adet sarıcının bulunduğu sistemde, 12 bölgeden oluşan soğutma alanı “ana soğutma bölgesi” ve “düzeltme soğutma bölgesi” olarak ikiye ayrılmıştır. Ana soğutma bölgesi 9, düzeltme soğutma bölgesi ise 3 bölümden oluşmakta; her bir bölüm 90 üstte, 90 altta olmak üzere 180 adet valf kontrollü su jeti içermektedir.

Soğutma kontrol sistemi “erken soğutma”, “geç soğutma” ve “aralıklı soğutma” olmak üzere 3 farklı soğutma stratejisi içermektedir. 400 farklı malzeme üzerinden yapılan regresyon datalarının kullanıldığı çalışma sonucu elde edilen eski ve yeni sistemin hedef sarılma sıcaklığı ve ölçülen sarılma sıcaklığının karşılaştırılmasına ait veriler Şekil 6.1’de verilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere yeni geliştirilen sistem ile sarılma sıcaklığını $\pm 15^{\circ}\text{C}$ aralığında kontrol etmek mümkün hale gelmiştir [30].



Şekil 6. 1 Eski ve yeni sistem sarılma sıcaklıkları (a) eski sistem, (b) yeni sistem

M. Pietrzyk, Ł. Madej, Ł. Rauch, R. Gołab'ın sıcak haddelenmiş çift fazlı çeliklerin soğutma sırasındaki mikroyapısal gelişimi üzerine yaptığı araştırmada, malzemenin hızlandırılmış olarak soğutulması çalışılmıştır. Çalışmada geleneksel yöntemin yanı sıra daha çok Cellular Automata (CA) yöntemi ile lamelsi mikroyapı elde edilmesi üzerinde durulmuştur.

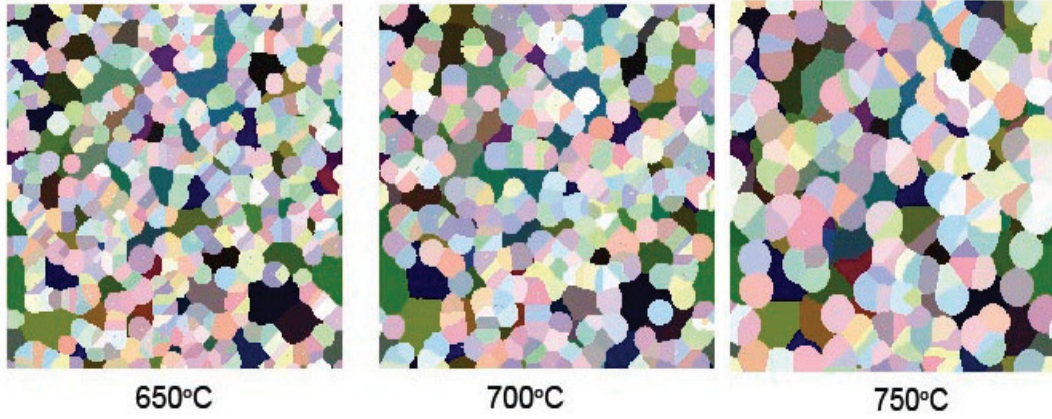
Çalışmada dilatometrik testler sonucu elde edilen değerler ile çift fazlı çelikler için modeller oluşturulmuş ve bu modeller bilgisayar sistemine entegre edilerek sıcak haddeleme sonrası soğutma prosesinin simülasyon ile kontrolü sağlanmıştır. Çalışmanın sonucunda da soğutma parametrelerinin çift fazlı çeliklerin mikroyapıları üzerindeki etkisi ortaya konmuştur.

Çift fazlı çelikler daha çok otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır. Bu fazlardan biri yapıdaki dominant faz olan ferrit, diğeri ise maksimum %30 oranında bulunan ve malzemeye asıl özellik kazandıran faz olan martenzittir. Çeliğin kalitesi açısından kritik olan ferrit ve martenzit arasındaki oran malzemenin sıcak haddelenmesi sonrası işlem gördüğü özel soğutma prosesi ile elde edilmektedir. Ancak bu proseste soğutma parametrelerinin düzgün kontrolü oldukça zor olduğu için soğutma esnasındaki faz dönüşümü simülasyonu, optimum soğutma koşullarının tasarlanmasında önemli rol oynamaktadır.

Bu çalışma geleneksel modelin mikroyapısal parametrelerdeki tahminlerinin limitli olduğunu ortaya koymuş, geleneksel model yerine faz dönüşümleri sırasındaki mikroyapı gelişimi hakkında daha fazla ileri seviyede bilgi verebilecek model olan CA

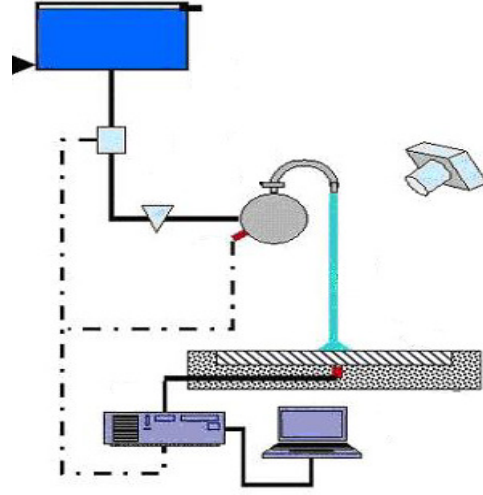
yönteminin kullanılmasını uygun bulmuştur. Geleneksel yöntem, CA yönteminin sonuçlarını doğrulamak amacı ile kullanılmıştır.

Çalışmada 3 aşamalı soğutma uygulanmıştır. İlk aşamada şerit malzeme hızlı bir şekilde ferrit dönüşüm sıcaklığına soğutulmuş ve istenen ferrit oranı elde edilene kadar ikinci aşama olan bu sıcaklıkta beklenmiştir. Üçüncü aşamada ise yine hızlı soğutma uygulanarak artık östenitin martenzite dönüşümü sağlanmıştır. Bu soğutma işlemi 3 değişik sıcaklık için, malzemeye sırası ile 650°C, 700°C ve 750°C soğutma sıcaklığına ulaşana kadar uygulanmıştır. Bu işlem sonrası elde edilen mikroyapı Şekil 6.2’de temsili olarak gösterilmiştir. Daha parlak görünen faz, dönüşüm sonrası elde edilen ferrit tanelerini göstermektedir [31].



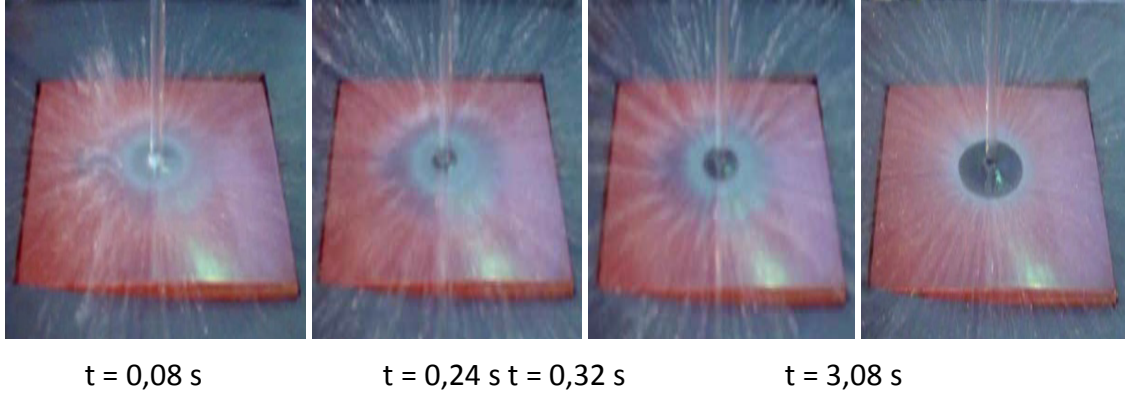
Şekil 6. 2 DP çeliğinin iki kademeli soğutma sonrası mikroyapı görüntüsü

Hormando Leocádio Júnior, Ant3nio F3bio Carvalho da Silva ve J3lio C3sar Passos’un soğutma prosesinin sıcak elik levha üzerindeki etkisi üzerine yaptığı deneysel çalışmada iki farklı soğutma suyu sıcaklığı (12 ve 26°C) ve iki farklı akış hızı (3 ve 6 lt/dak) kullanılmıştır. Deneysel çalışmaya ait soğutma düzeneği Şekil 6.3’te verilmiştir. %18 krom, %8 nikel içeren AISI 304 kalite paslanmaz elik numuneler üzerinde yapılan çalışmada, malzeme sıcaklığı 4 adet termokupl ile ölçülerek bilgisayar sistemine aktarılmıştır.



Şekil 6. 3 Deneyel düzenek

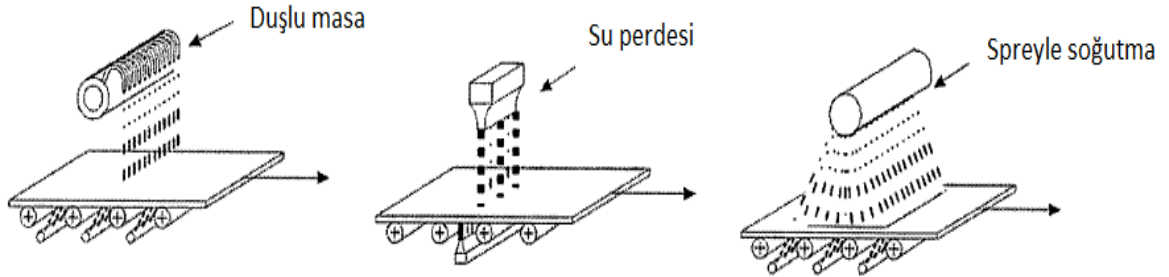
150x150 mm² olmak üzere kare kesitli ve 14 mm kalınlığa sahip malzeme üzerinde yapılan deneylerde numuneler elektrik fırınında 900°C'ye kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta fırında 30 dakika daha tutulmuştur. Soğutma işlemine tabi olmadan önce ise sıcaklığı havada soğutmanın etkisi ile 740°C'ye kadar düşmüştür.



Şekil 6. 4 Plakanın 26°C ve 6 lt/dak su altında soğuma adımları

Deneyel çalışma sonucu elde edilen veriler, 12°C soğutma suyu ile 3 ve 6 lt/dak akış hızının malzemedeki ısı kaybı üzerinde aynı etkiyi gösterdiği ortaya koymuştur. Malzemenin su ile temas ettiği ilk andan itibaren durgunluk noktası olarak bilinen bu sürede soğutma oranının ve ısı transferinin en yüksek seviyede olduğu açıkça görülmüştür. 26°C soğutma suyu kullanılan deneyde suyun akış hızının artması ile birlikte malzemedeki sıcaklık düşüşünün daha hızlı olduğu tespit edilmiştir. En yüksek ısı akısının 3,92 MW/m² ile 6 lt/dak akış hızında olduğu ve 3 lt/dak akış hızına göre %14 daha yüksek olduğu çalışma sonucu elde edilmiştir [32].

Kailas Valu Jondhale'nin sıcak haddelenmiş sac malzemenin soğutulma pratikleri ile ilgili yaptığı çalışmada 3 farklı soğutma prosesini karşılaştırmıştır. Bunlar duşlu masa, su perdesi ve spreyle soğutma ile soğutma prosesleridir. Her bir işleme ait şematik görünüm Şekil 6.5'te verilmiştir.



Şekil 6. 5 Soğutma için kullanılan farklı sistemler

Çalışmada belirtildiği üzere duşlu masa ve su perdesi şeklindeki soğutma sistemi, spreyle soğutmaya göre daha efektif sonuç vermektedir. Özellikle duşlu masa sisteminin %10-30 oranında spreyle soğutma sistemine göre daha fazla soğutma sağladığı görülmüştür. Duşlu masa ile su perdesi sisteminin karşılaştırılmasında ise su perdesinin malzemenin genişliği boyunca daha homojen soğutma sağladığı, su perdesi sisteminde kullanılan nozul çeşidinin duşlu masa nozullarına göre %48 oranında daha efektif olduğu belirtilmiştir. Duşlu masa ile soğutma sisteminin dezavantajı malzemenin genişliği boyunca homojen olmayan soğutma hızına sahip olmasıdır.

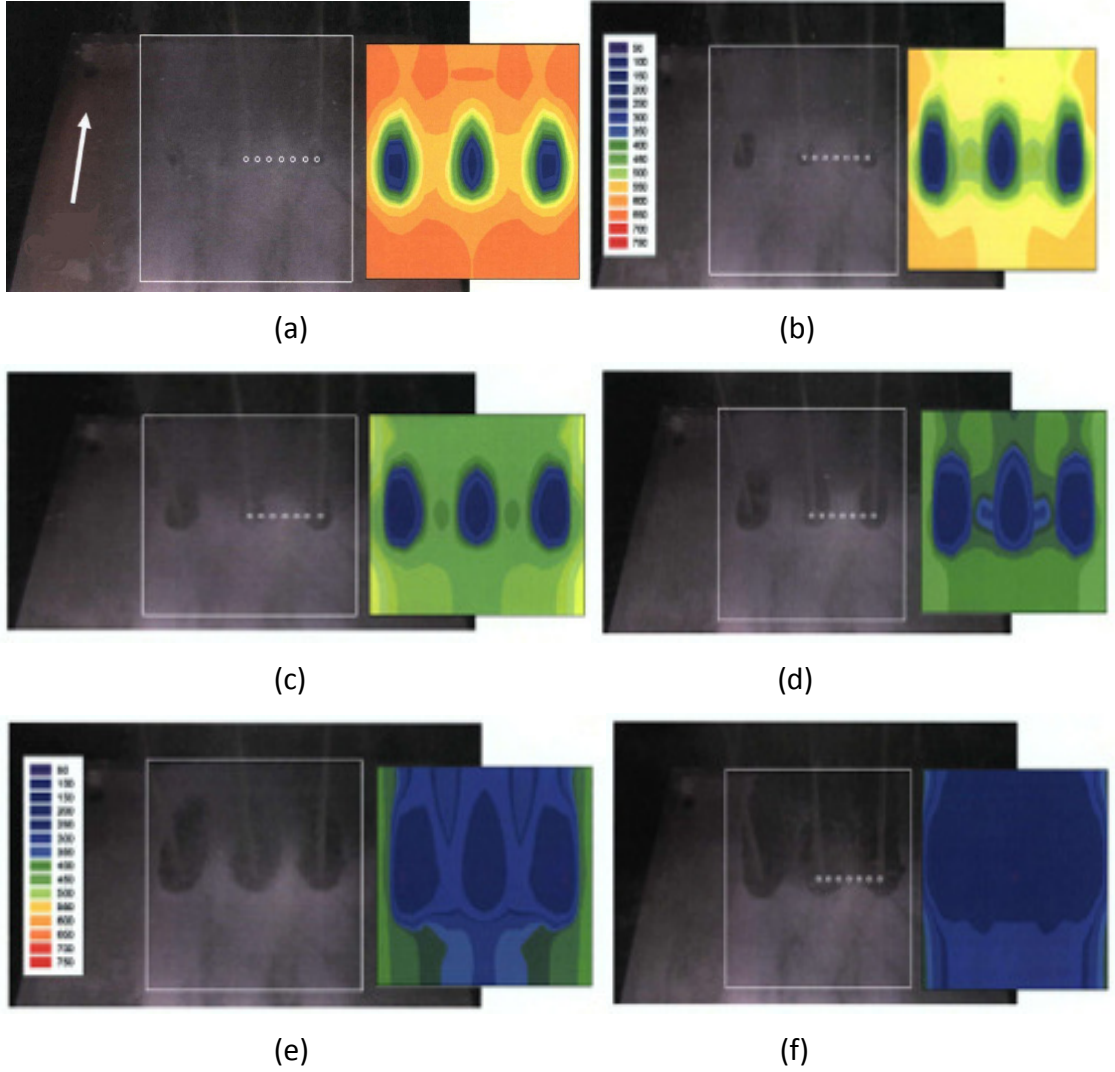
Yapılan deneysel çalışmada kullanılan malzeme, fırında 850-900°C sıcaklığa ısıtıldıktan sonra soğutma işlemine tabi tutulmuştur. HSLA (high strength low alloy) ve 6,65 mm kalınlığında 1200x430 mm ebatlarında hazırlanan numuneye ait kimyasal analiz Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6. 1 HSLA çeliğinin kimyasal kompozisyonu (% ağırlık)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Al	N	Ti	V	Nb
0,051	1,29	0,012	0,004	0,102	0,04	0,013	0,011	0,039	0,0045	0,0032	0,0061	0,069

Malzeme duşlu masaya gelene kadar sıcaklığı 800°C civarına düşer. Malzeme su ile temas ettiği ilk anda suyun düştüğü kısımların noktasal olarak karardığı

gözlemlenmiştir. Malzemenin duşlu masa altında ilerlemesi ile tüm malzeme gri renk almaktadır. Soğuma aşamalarına ait görüntü Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6. 6 Malzemenin sırayla soğutma suyunun altından geçiş evreleri

Şerit malzemenin soğutulmasında rol alan parametrelerin etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada; malzemenin hızı, soğutma suyunun akış hızı ve nozul biçimi ele alınmıştır. Çalışma neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir [25].

- ❖ Duşlu masa altından geçen malzemede, nozulun altında kalan ve su ile direk temas eden kısımlar yüksek hızda soğuma, iki nozul arasında kalan kısımlarda ise yavaş soğuma gözlemlenmiştir.
- ❖ Malzemeye ilk çarpan su jeti ile malzeme üzerinde soğumanın etkisi ile kararmalar oluşmaya başlamıştır. Malzemenin soğutma yönünde ilerlemesi ile birlikte çok

sayıda oluşan bu karartılar birleşmiş ve bu da malzemede homojen soğutma sağlandığını göstermiştir.

- ❖ Malzeme hızı ile ilgili yapılan çalışmada, düşük hıza sahip malzemede ısı akısının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- ❖ Soğutma suyunun akış hızı ile ilgili olarak ise; malzemeye daha yoğun su vermek yerine su akış hızının arttırılması ile malzemede daha yüksek ısı akısı olduğu gözlenmiştir.
- ❖ Deneysel çalışmada nozullar arası 3 farklı mesafe test edilmiştir. Bunlar 114,3mm, 76,2mm ve 38,1mm'dir. Bu 3 farklı çalışmada en etkili sonucun nozullar arası mesafenin 38,1 mm olduğu düzenekte elde edildiği belirlenmiştir. Yani nozullar arası mesafenin kısılması daha verimli ve malzemenin genişliği boyunca daha homojen soğutma sağladığını ortaya koymuştur.

BÖLÜM 7

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1 Kullanılan Malzeme ve Cihazlar

Mekanik testlerde kullanılacak numuneler, sıcak sac olarak üretilen bobinlerden kesilmiş, kesilen plakalar CNC tezgahında işlenerek çekme numunesi haline getirilmiştir. DOOSAN DNM400 marka CNC tezgahına ait görüntü Şekil 7.1’de verilmiştir.



Şekil 7. 1 CNC Tezgahı

Numuneler Zwick Roell Z600 marka cihazda çekme, akma ve uzama testine tabi tutulmuştur. Cihaza ait görüntü Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7. 2 Çekme Testi Cihazı

Mikroyapı incelemesi için ufak parçalar halinde giyotin makas ile kesilen numuneler Struers marka sıcak bakalite alma cihazı kullanılarak bakalite alınmış ve yine Struers marka zımparalama ve parlatma cihazları kullanılarak numune hazırlama işlemleri tamamlanmıştır. Bu cihazlara ait görüntü Şekil 7.3'te verilmiştir.



Şekil 7. 3 Sıcak Bakalite Alma ve Zımparalama-Parlatma Cihazları

Aynı döküm kalitesine ait numuneler tek bir bakalite alınmıştır. Bu numunelerin incelendiği Nikon Eclipse MA200 marka optik mikroskoba ait görüntü Şekil 7.4'te verilmiştir.



Şekil 7. 4 Optik Mikroskop

Taramalı Elektron Mikroskobu incelemeleri Sabancı Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi'nde bulunan Gemini marka ve Zeiss Supra 35 VP FEG model taramalı elektron mikroskobu kullanılarak yapılmıştır. Cihaza ait görüntü Şekil 7.5'te verilmiştir.



Şekil 7. 5 Taramalı Elektron Mikroskobu

7.2 Parametrelerin Belirlenmesi ve Deneylerin Yapılışı

Çolakoğlu Metalurji A.Ş. firmasında yapılan deneysel çalışmalarda yapı çeliği olarak bilinen, genellikle konstrüksiyon ve boru malzemesi olarak kullanılan S235JR, S275JR, S355JR ve SAE1010 kalitelerine ait slabların sıcak haddelenmesi ele alınmış ve duşlu masa ile soğutma denemeleri bu malzemelerle yapılmıştır.

Bölüm 4'te belirtildiği üzere Çolakoğlu Metalurji A.Ş. Sıcak Sac Haddehanesinde 3 ana soğutma pratiği uygulaması mevcuttur; erken soğutma (early cooling), geç soğutma

(late cooling) ve çift fazlı soğutma (dual phase cooling). Malzemelerin soğutulmasında bu 3 sistemden erken ve geç soğutma pratikleri ile ilgili denemeler yapılmıştır.

Hem soğutma pratiği hem de nozullar arası mesafe parametreleri değiştirilerek malzemelerin mekanik özellikleri ve mikroyapılarında meydana gelen değişiklikler gözlemlenmiştir. Farklı bobin kalınlıkları deneysel çalışmalara dahil edilerek malzeme kalınlığının mekanik özellik ve mikroyapı üzerinde etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır.

Çalışmalar öncesinde malzemenin haddelenme hızı da parametre olarak belirlenmiş ancak denemeler sırasında uygulanması zor olduğu ve elde edilecek sonuçların sağlıklı olmayacağının görülmesi nedeni ile vazgeçilmiştir.

Konuyla ilgili yapılmış deneysel çalışmalara ait araştırmalarda değişken olarak kullanılan ancak tez kapsamındaki denemelerde değiştirilemeyen parametreler Çizelge 7.1’de belirtilmiştir. Çalışmalarda elde edilen tüm genel sonuçlar ise EK-A’da verilmiştir.

Çizelge 7. 1 Deneysel çalışmalarda değiştirilemeyen parametreler

Soğutma suyu sıcaklığı	29 °C
Soğutma suyu debisi	84,25 m ³ /h
Malzemenin haddelenme hızı	1,32 mm = 12,3 m/sn
	3,60 mm = 6,5 m/sn
	5,84 mm = 4,9 m/sn
	6,05 mm = 4,3 m/sn

İlk deneme S355 kalite çelik için yapılmıştır. Bobin kalınlığı 3,60 mm olan malzemede yapılan çalışmalarda soğutma stratejisi ve nozullar arası mesafe değiştirilmiştir. Sistemdeki tanımlı soğutma stratejisi Early Quick (Erken Hızlı) olan S355 malzeme, ilk olarak tanımlı strateji ile haddelenmiş (CM1 nolu numune) , daha sonraki malzeme için soğutma pratiği Late Quick (Geç Hızlı) olarak değiştirilerek haddelenmiştir (CM2 nolu numune). Uygulanan farklı soğutma pratikleri sonunda elde edilen mekanik değerler Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7. 2 CM1 ve CM2 nolu numunelerde soğutma stratejisi değişikliği

Bobin #	CM1	CM2
Soğutma Stratejisi	Early Quick	Late Quick
Döküm Kalitesi	S355	S355
Bobin Kalınlığı (mm)	3,60	3,60
Akma Dayanımı (MPa)	451	434
Çekme Dayanımı (MPa)	567	543
Uzama (%)	26,5	27,9

Soğutma stratejisi Early Quick (Erken Hızlı) olan malzemeye Late Quick (Geç Hızlı) pratiği uygulandığında akma dayanımı 451 MPa'dan 434 MPa, çekme dayanımı ise 567 MPa'dan 543 MPa değerine düşmüştür. Ancak hem akma hem de çekme dayanımındaki bu düşüş sadece soğutma stratejisi kaynaklı değil aynı zamanda bobinler arası C ve Mn farkından da kaynaklanmaktadır. Numunelere ait kimyasal analiz Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7. 3 CM1 ve CM2 nolu numunelere ait kimyasal analiz

Bobin #	CM1	CM2
C	% 0,167	% 0,155
Mn	% 1,299	% 1,493
Si	% 0,026	% 0,015
Cr	% 0,060	% 0,055
Ni	% 0,059	% 0,081

Akma ve çekme dayanımında etkin rol oynayan element karbondur. C oranının CM2 nolu numunede düşük olması, hem akma hem de çekme değerlerinde düşüşe neden olmuştur. Manganez da karbon ile aynı şekilde, dayanım değerlerini artırıcı rol oynamaktadır. Eğer CM1 ve CM2 numuneleri aynı Mn değerine sahip olsalardı, C oranındaki düşüş akma ve çekme dayanım değerlerinde daha fazla düşüşe neden olacaktı. Ancak Mn değerinin CM2 numunede daha yüksek çıkması dayanım değerlerini bir miktar yukarıya çekmiştir.

Soğutma stratejisindeki değişiklik malzemenin soğuma hızını etkilemektedir. Early Cooling (Erken Soğutma) pratiklerinde Bölüm 4'te de açıklandığı üzere soğutma suları malzemenin şerit haddeden çıkmasının ardından malzeme yüzeyi ile temas etmektedir. Late Cooling (Geç Soğutma) pratiklerinde ise soğutma suları duşlu masa sisteminin

sonuna doğru açılır ve malzeme yüzeyi su ile karşılaşınca kadar ilk olarak hava ile soğumaya başlar. Bu nedenle Erken ve Geç soğutma pratikleri kıyaslandığında malzemenin erken soğutma pratiği kullanılarak soğutulması ile elde edilen mekanik değerlerin, geç soğutma pratiğine göre daha yüksek çıkacağı söylenebilir.

S355 kalite ve aynı kimyasal analize sahip CM3 ve CM4 nolu numunelerde ise nozullar arası mesafe değişikliğine ait deneme yapılmıştır. Bu numunelere ait kimyasal analiz Çizelge 7.4'te verilmiştir.

Çizelge 7. 4 CM3 ve CM4 nolu numunelere ait kimyasal analiz

Bobin #	CM3	CM4
C	% 0,163	% 0,164
Mn	% 1,248	% 1,238
Si	% 0,022	% 0,019
Cr	% 0,057	% 0,058
Ni	% 0,059	% 0,059

Çizelge 7.4'te görüleceği üzere CM3 ve CM4 nolu numuneler aynı kimyasal analize sahiplerdir. Bu da C ve Mn değerleri aynı olan malzemelerde de akma ve çekme dayanımında değişiklik meydana geldiğini göstermektedir. Nozullar arası mesafenin artması ile birlikte akma dayanımında 7, çekme dayanımında ise 9 MPa yükseliş meydana gelmiştir. Nozullar arası mesafe değişikliğine ait denemede elde edilen sonuçlar Çizelge 7.5'te verilmiştir.

Çizelge 7. 5 CM3 ve CM4 nolu numunelerde nozullar arası mesafe değişikliği

Bobin #	CM3	CM4
Soğutma Stratejisi	Early Quick	Early Slow
Nozullar Arası Mesafe (mm)	1140 mm	2280 mm
Döküm Kalitesi	S355	S355
Bobin Kalınlığı (mm)	3,60	3,60
Akma Dayanımı (MPa)	403	410
Çekme Dayanımı (MPa)	535	544
Uzama (%)	29,5	27,3

Nozullar arası mesafedeki değişiklik malzemenin birim alana düşen su ile soğuma hızına etki etmektedir. Örneğin Early Quick (Erken Hızlı) ile Early Slow (Erken Yavaş) soğutma stratejileri arasındaki fark Bölüm 4'te de belirtildiği üzere EQ pratiğinde suların arka

arkaya sık aralıklarla, ES pratiğinde ise aralıklı olarak malzemenin şerit haddeden çıkar çıkmaz açılmasıdır. Malzemenin birim alanının daha hızlı soğuması görece daha yüksek akma ve çekme dayanımı demektir. Late Quick (Geç Hızlı) ile Late Slow (Geç Yavaş) soğutma stratejilerinde ise LQ pratiğinde malzemenin duşlu masanın sonuna doğru suların sık aralıklarda ardarda açılması ile soğutulması, LS pratiğinde ise yine malzemenin duşlu masa sisteminin sonuna doğru suların aralıklı açılması ile soğutulması söz konusudur.

Nozullar arası mesafenin daralması malzemenin birim alana düşen su ile soğuma hızının daha yüksek olması, bu da malzemenin akma ve çekme dayanım değerlerinin nozullar arası mesafenin artması ile düşmesi anlamına gelmektedir.

İkinci deneme S235 kalite çelik için yapılmıştır. Soğutma stratejisi Early Slow (Erken Yavaş) olan S235 malzeme ilk olarak tanımlı strateji kullanılarak soğutulmuş, daha sonraki malzeme için soğutma pratiği Late Slow (Geç Yavaş) olarak değiştirilerek haddelenmiştir.

Bobin kalınlığı 1,32 mm olan CM5 ve CM6 nolu numuneler için soğutma stratejisi değişikliği sonrası elde edilen sonuçlar Çizelge 7.6'da verilmiştir.

Çizelge 7. 6 CM5 ve CM6 nolu numunelerde soğutma stratejisi değişikliği

Bobin #	CM5	CM6
Soğutma Stratejisi	Early Slow	Late Slow
Döküm Kalitesi	S235	S235
Bobin Kalınlığı (mm)	1,32	1,32
Akma Dayanımı (MPa)	360	344
Çekme Dayanımı (MPa)	445	418
Uzama (%)	31,2	32,1

Soğutma stratejisi Early Slow (Erken Yavaş) olan malzemeye Late Slow (Geç Yavaş) pratiği uygulandığında akma dayanımı 360 MPa'dan 344 MPa değerine düşmüştür. Çekme dayanımı ise 445 MPa'dan 418 MPa değerine düşmüştür. Ancak hem akma hem de çekme dayanımındaki bu düşüş sadece soğutma stratejisi kaynaklı değil aynı zamanda bir önceki denemelerde de görüldüğü üzere numuneler arası karbon farkından da kaynaklanmaktadır. CM5 ve CM6 nolu numunelere ait kimyasal analiz Çizelge 7.7'de verilmiştir.

Çizelge 7. 7 CM5 ve CM6 nolu numunelere ait kimyasal analiz

Bobin #	CM5	CM6
C	% 0,087	% 0,065
Mn	% 0,538	% 0,568
Si	% 0,006	% 0,007
Cr	% 0,034	% 0,024
Ni	% 0,012	% 0,015

Karbon oranının CM6 nolu bobinde düşmesi hem akma hem de çekme dayanımındaki düşüşte rol oynamaktadır. Ancak çekme dayanımındaki 27 MPa düşüş hem karbon farkı hem de soğutma stratejisi değişikliğinden kaynaklanmaktadır. Nozullar arası mesafe değişikliği denemesinde kullanılan, birbirine yakın elementel analize sahip S235 kalite CM7 ve CM8 nolu numunelerin kimyasal analizleri Çizelge 7.8’de verilmiştir.

Çizelge 7. 8 CM7 ve CM8 nolu numunelere ait kimyasal analiz

Bobin #	CM7	CM8
C	% 0,087	% 0,080
Mn	% 0,538	% 0,547
Si	% 0,006	% 0,006
Cr	% 0,034	% 0,032
Ni	% 0,012	% 0,015

Aynı kimyasal analize sahip CM7 ve CM8 nolu malzemeler için nozullar arası mesafenin azalması ile birlikte akma dayanımında 6, çekme dayanımında ise 5 MPa düşüş meydana gelmiştir. Nozullar arası mesafenin mekanik değerleri üzerindeki etkisi CM3 ve CM4 nolu numuneler için yapılan yorum ile aynıdır. Denemede elde edilen sonuçlar Çizelge 7.9’da verilmiştir.

Çizelge 7. 9 CM7 ve CM8 nolu numunelerde nozullar arası mesafe değişikliği

Bobin #	CM7	CM8
Soğutma Stratejisi	Early Slow	Early Quick
Nozullar Arası Mesafe (mm)	2280 mm	1140 mm
Döküm Kalitesi	S235	S235
Bobin Kalınlığı (mm)	1,32	1,32
Akma Dayanımı (MPa)	360	354
Çekme Dayanımı (MPa)	445	440
Uzama (%)	31,2	32,3

Üçüncü deneme S275 kalite çelik için yapılmıştır. Bobin kalınlığı 6,05 mm olan numuneler kullanılarak yapılan çalışmada soğutma stratejisi Early Quick (Erken Hızlı)

olan malzeme hem sistemde tanımlı olan strateji ile soğutulmuş, hem de soğutma pratiği Late Slow (Geç Yavaş) olarak değiştirilerek haddelenmiştir. Bu iki denemeye ait CM9 ve CM10 nolu numuneler için elde edilen sonuçlar Çizelge 7.10'da verilmiştir.

Çizelge 7. 10 CM9 ve CM10 nolu numunelerde soğutma stratejisi değişikliği

Bobin #	CM9	CM10
Soğutma Stratejisi	Early Quick	Late Slow
Döküm Kalitesi	S275	S275
Bobin Kalınlığı (mm)	6,05	6,05
Akma Dayanımı (MPa)	361	361
Çekme Dayanımı (MPa)	501	501
Uzama (%)	29,1	30,6

Soğutma stratejisi Early Quick (Erken Hızlı) olan malzemeye Late Slow (Geç Yavaş) pratiği uygulandığında akma ve çekme dayanım değerleri malzeme kalınlığının fazla olmasına bağlı olarak değişiklik göstermemiştir. Daha ince malzemelerde dayanım değerlerindeki değişim daha belirgin olmaktadır. CM9 ve CM10 nolu numunelere ait kimyasal analiz Çizelge 7.11'de verilmiştir.

Çizelge 7. 11 CM9 ve CM10 nolu numunelere ait kimyasal analiz

Bobin #	CM9	CM10
C	% 0,164	% 0,166
Mn	% 0,632	% 0,631
Si	% 0,084	% 0,082
Cr	% 0,044	% 0,045
Ni	% 0,068	% 0,069

Aynı kimyasal analize sahip CM11 ve CM12 nolu numunelerde yapılan nozullar arası mesafe değişikliği denemesine ait sonuçlar Çizelge 7.12'de verilmiştir.

Çizelge 7. 12 CM11 ve CM12 nolu numunelerde nozullar arası mesafe değişikliği

Bobin #	CM11	CM12
Soğutma Stratejisi	Early Quick	Early Slow
Nozullar Arası Mesafe (mm)	1140 mm	2280 mm
Döküm Kalitesi	S275	S275
Bobin Kalınlığı (mm)	6,05	6,05
Akma Dayanımı (MPa)	361	357
Çekme Dayanımı (MPa)	501	492
Uzama (%)	29,1	28,2

Nozullar arası mesafenin artması ile birlikte akma dayanımında 4, çekme dayanımında ise 9 MPa düşüş meydana gelmiştir. Nozullar arasındaki mesafe ile mekanik değerler arasındaki ilişki CM3 ve CM4 nolu numuneler için yapılan yorum ile aynıdır. Çizelge 7.13'te CM11 ve CM12 nolu numunelere ait kimyasal analiz verilmiştir.

Çizelge 7. 13 CM11 ve CM12 nolu numunelere ait kimyasal analiz

Bobin #	CM11	CM12
C	% 0,164	% 0,159
Mn	% 0,632	% 0,629
Si	% 0,084	% 0,084
Cr	% 0,044	% 0,044
Ni	% 0,068	% 0,068

Dördüncü deneme bobin kalınlığı 5,84 mm olan SAE 1010 kalite malzemelerde yapılmıştır. Soğutma stratejisi Early Slow (Erken Yavaş) olan SAE 1010 malzeme ilk olarak tanımlı soğutma şekli ile haddelenmiş, daha sonraki malzeme için soğutma pratiği Late Slow (Geç Yavaş) olarak değiştirilerek haddelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 7.14'te verilmiştir.

Çizelge 7. 14 CM13 ve CM14 nolu numunelerde soğutma stratejisi değişikliği

Bobin #	CM13	CM14
Soğutma Stratejisi	Early Slow	Late Slow
Döküm Kalitesi	SAE 1010	SAE 1010
Bobin Kalınlığı (mm)	5,84	5,84
Akma Dayanımı (MPa)	263	262
Çekme Dayanımı (MPa)	390	391
Uzama (%)	34,8	31,4

Soğutma stratejisi Early Slow (Erken Yavaş) olan malzemeye Late Slow (Geç Yavaş) pratiği uygulandığında akma ve çekme dayanım değerleri değişiklik göstermemiştir. Akma ve çekme dayanımlarında farklılık olmaması malzemenin kalınlığının fazla olmasına bağlıdır. Daha ince malzemelerde akma ve çekme dayanımındaki değişim daha belirgin olacaktır. Aynı döküme ait olan numunelere ait kimyasal analiz Çizelge 7.15'te verilmiştir.

Çizelge 7. 15 CM13 ve CM14 nolu numunelere ait kimyasal analiz

Bobin #	CM13	CM14
C	% 0,083	% 0,077
Mn	% 0,433	% 0,416
Si	% 0,007	% 0,013
Cr	% 0,010	% 0,031
Ni	% 0,005	% 0,018

SAE 1010 kalite malzemeler için nozullar arası mesafe değişikliği denemesinde kullanılan, CM15 ve CM16 nolu numunelerin kimyasal analizleri Çizelge 7.16’da verilmiştir.

Çizelge 7. 16 CM15 ve CM16 nolu numunelere ait kimyasal analiz

Bobin #	CM15	CM16
C	% 0,083	% 0,083
Mn	% 0,433	% 0,431
Si	% 0,007	% 0,016
Cr	% 0,010	% 0,021
Ni	% 0,005	% 0,012

Nozullar arası mesafenin azalması ile birlikte akma dayanımında 17, çekme dayanımında ise 14 MPa artış meydana gelmiştir. Akma ve çekme dayanımları arasında görülen farkın erken hızlı soğutmadan ve empürite element farklılıklarından (Cr,Ni) kaynaklandığı düşünülmektedir.

CM15 ve CM16 nolu numuneler için elde edilen çekme ve akma dayanımları ile %uzama değerleri Çizelge 7.17’de verilmiştir.

Çizelge 7. 17 CM15 ve CM16 nolu numunelerde nozullar arası mesafe değişikliği

Bobin #	CM15	CM16
Soğutma Stratejisi	Early Slow	Early Quick
Nozullar Arası Mesafe (mm)	2280 mm	1140 mm
Döküm Kalitesi	SAE1010	SAE1010
Bobin Kalınlığı (mm)	5,84	5,84
Akma Dayanımı (MPa)	263	280
Çekme Dayanımı (MPa)	390	404
Uzama (%)	34,8	32,9

7.3 Optik Mikroskop İncelemeleri

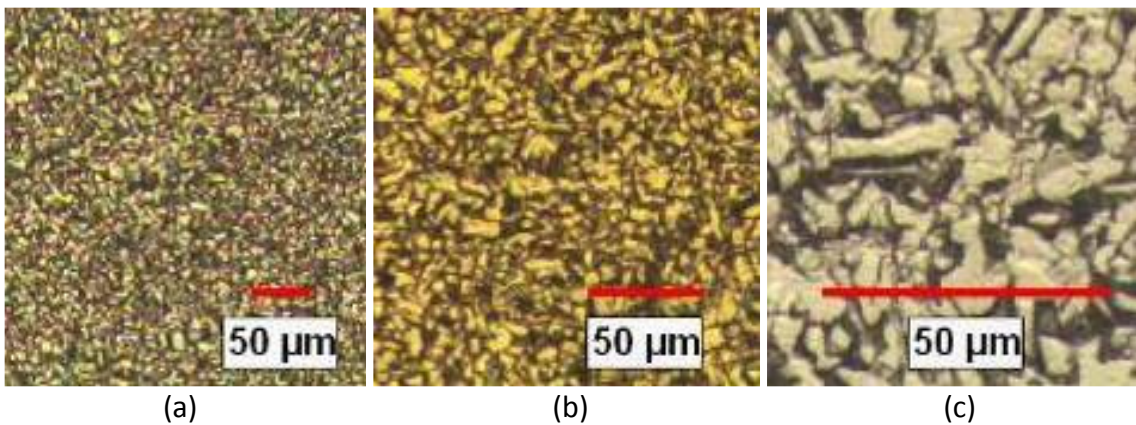
Optik mikroskop incelemeleri için numuneler her kalite grubu bir arada yer almak üzere bakalite alınmış; numune hazırlama işlemleri olan zımparalama, parlatma ve dağlama kademelerinden geçirilmiştir. Dağlama için %3'lük nital (97ml etil alkol+3ml HNO₃) kullanılmıştır. Bakalite alınmış numunelere ait görüntü Şekil 7.6'da verilmiştir.



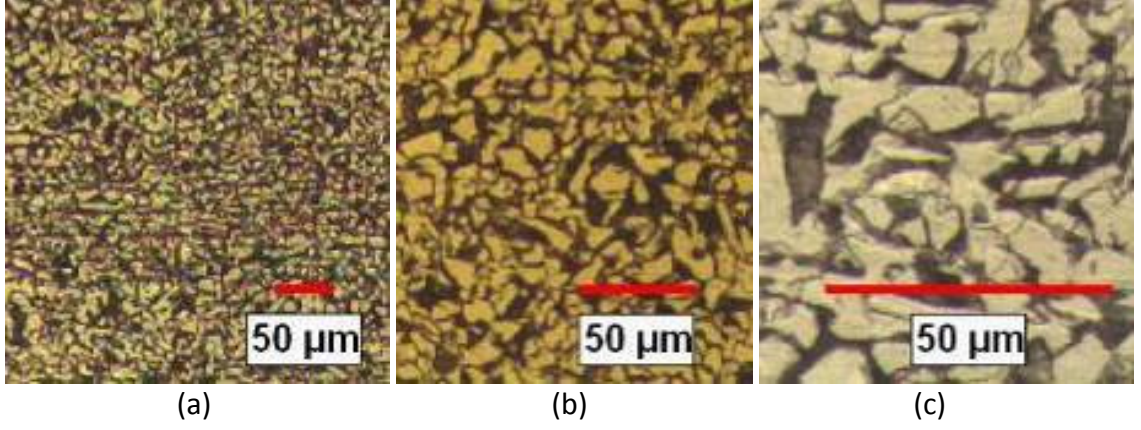
Şekil 7. 6 Bakalite alınmış numuneler

Numunelerin optik mikroskop ile incelenmesinde tane boyutu ölçümleri de yapılmıştır. Tane boyutu ölçümü, belirlenen bir alan üzerinde yatay ve dikey olarak çizilen çizgilerin kestiği taneler sayılıp bu çizgilerin uzunluğuna bölünerek μm cinsinden ortalama değer olarak hesaplanmıştır.

S355 kalite malzemeler için denenen soğutma stratejisi değişikliğine ait CM1 nolu numunenin 100, 200 ve 500 büyütmedeki görüntüleri Şekil 7.7'de, CM2 nolu numunenin görüntüleri Şekil 7.8'de görülmektedir. Optik mikroskop görüntülerinde beyaz alanlar ferrit, siyah alanlar ise perlit fazlarıdır.



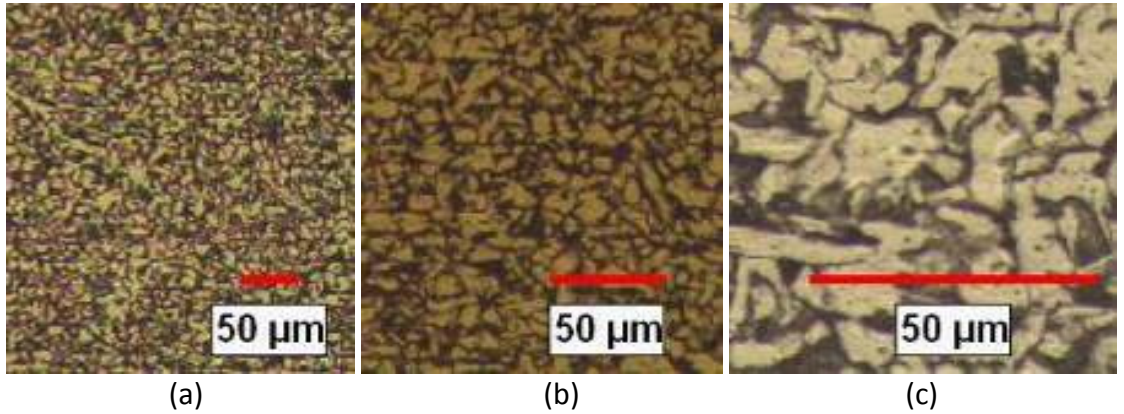
Şekil 7. 7 CM1 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü



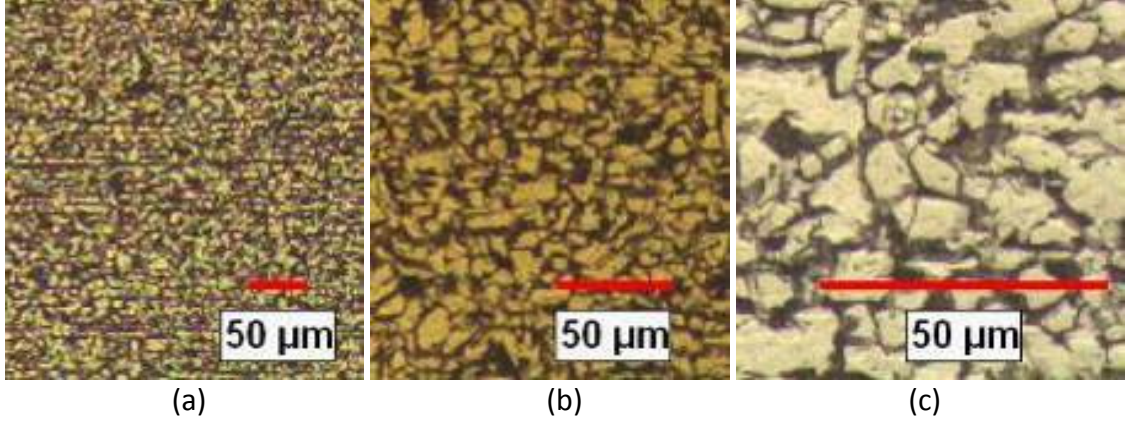
Şekil 7. 8 CM2 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü

Soğutma pratiği Early Quick (Erken Hızlı) olan malzeme, Late Quick (Geç Hızlı) ile soğutulduğunda malzemenin tane boyutu ASTM E112'ye göre 11 iken 11,5 olmuştur. Yani malzemenin ortalama tane çapı $6,0\mu\text{m}$ 'den $7,0\mu\text{m}$ 'ye yükselmiştir. Bu da tanelerin büyüdüğünü göstermektedir. Mekanik değerler ile karşılaştırıldığında tane boyutu daha büyük olan CM2 nolu numunenin akma ve çekme değerlerinin CM1 nolu numuneye göre daha düşük çıktığı görülmektedir.

S355 kalite malzemeler için denenen nozullar arası mesafe değişikliğine ait CM3 nolu numunenin 100, 200 ve 500 büyütmedeki görüntüleri Şekil 7.9'da, CM4 nolu numunenin görüntüleri Şekil 7.10'da görülmektedir.



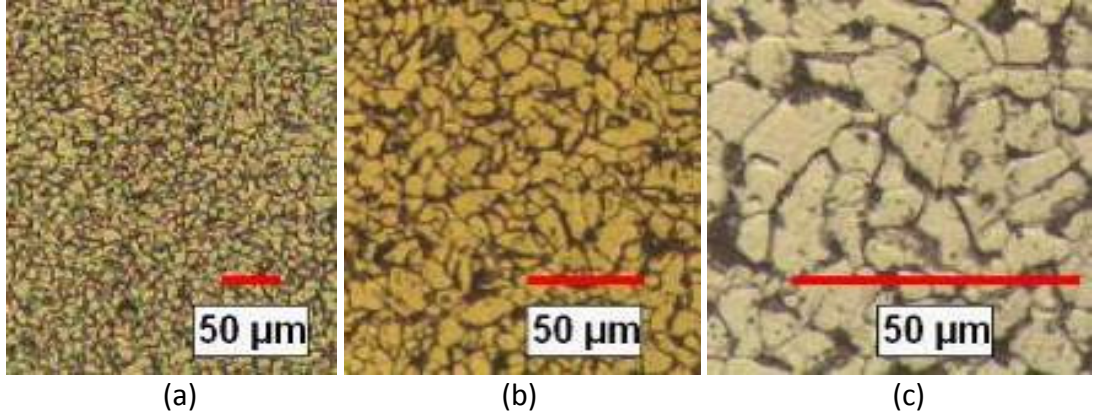
Şekil 7. 9 CM3 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü



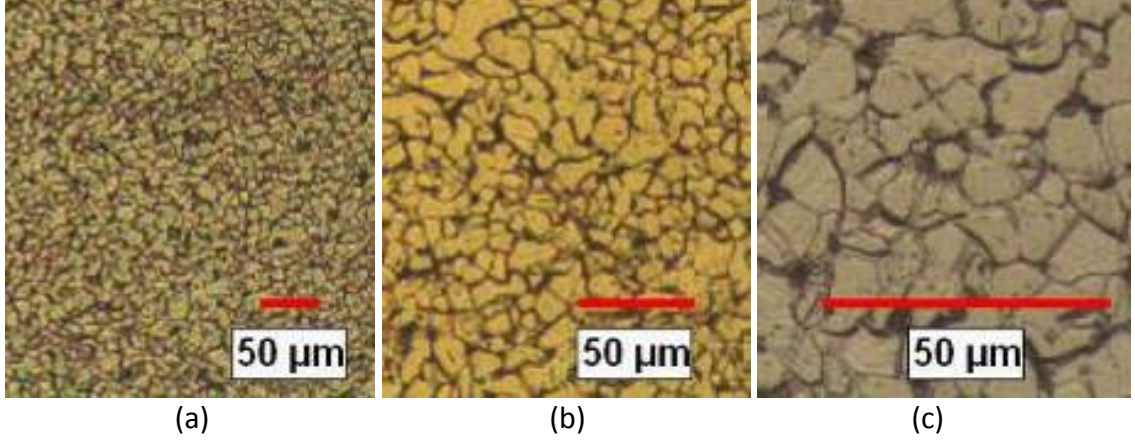
Şekil 7. 10 CM4 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü

Soğutmada nozullar arası mesafesi 1140 mm malzeme, 2280 mm olarak değiştirildiğinde her iki malzemenin de tane boyutu ASTM E112'ye göre 11,5 olmuştur. Buna karşılık gelen tane çapları CM3 nolu numune için $6,67\mu\text{m}$, CM4 nolu malzeme için $6,0\mu\text{m}$ 'dir. Nozullar arası mesafenin artması malzemenin tane boyutunda küçülme, mekanik özelliklerinde de artış meydana getirmiştir.

S235 kalite malzemeler için denenen soğutma stratejisi değişikliğine ait CM5 nolu numunenin 100, 200 ve 500 büyütmedeki görüntüleri Şekil 7.11'de, CM6 nolu numunenin görüntüleri Şekil 7.12'de görülmektedir.



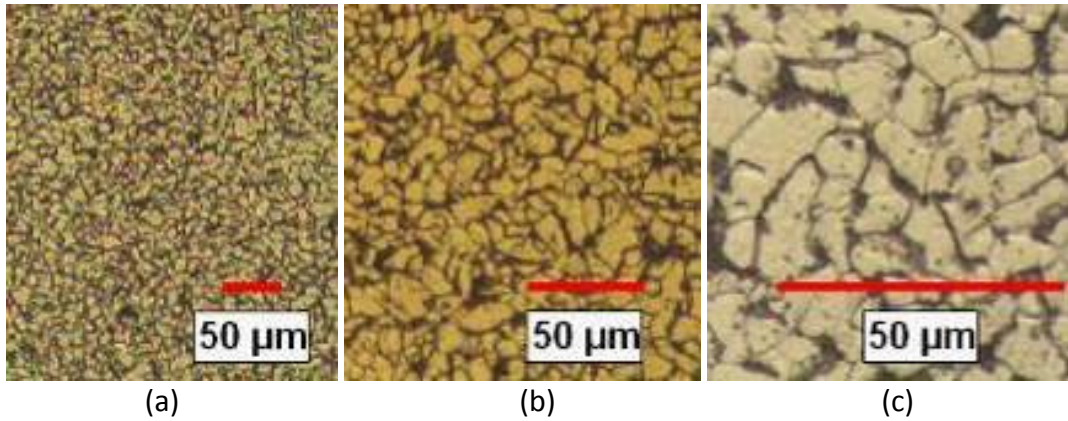
Şekil 7. 11 CM5 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü



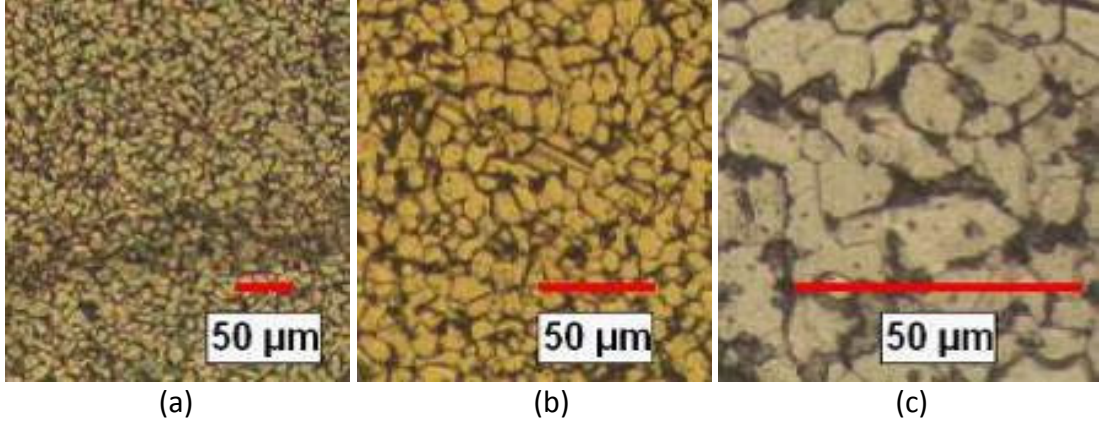
Şekil 7. 12 CM6 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü

Soğutma pratiği Early Slow (Erken Yavaş) olan malzeme, Late Slow (Geç Yavaş) ile soğutulduğunda malzemenin tane boyutu ASTM E112'ye göre 11 iken 10,5 olmuştur. Yani malzemenin ortalama tane çapı $7,94\mu\text{m}$ 'den $8,0\mu\text{m}$ 'ye yükselmiştir. Bu da tanelerde büyüme meydana geldiğini göstermektedir. Mekanik değerler ile karşılaştırıldığında tane boyutu daha büyük olan CM6 nolu numunenin akma ve çekme değerleri CM5'e göre daha düşük çıkmıştır.

S235 kalite malzemeler için denenen nozullar arası mesafe değişikliğine ait CM7 nolu numunenin 100, 200 ve 500 büyütmedeki görüntüleri Şekil 7.13'te, CM8 nolu numunenin görüntüleri Şekil 7.14'te görülmektedir.



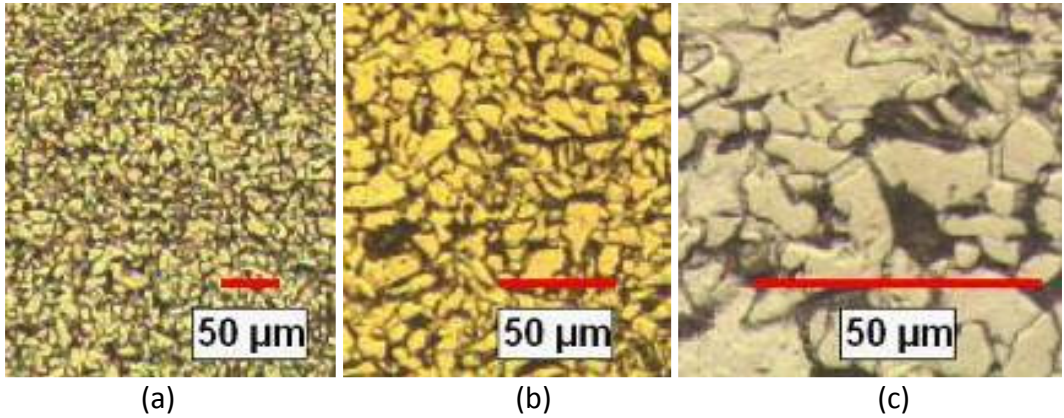
Şekil 7. 13 CM7 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü



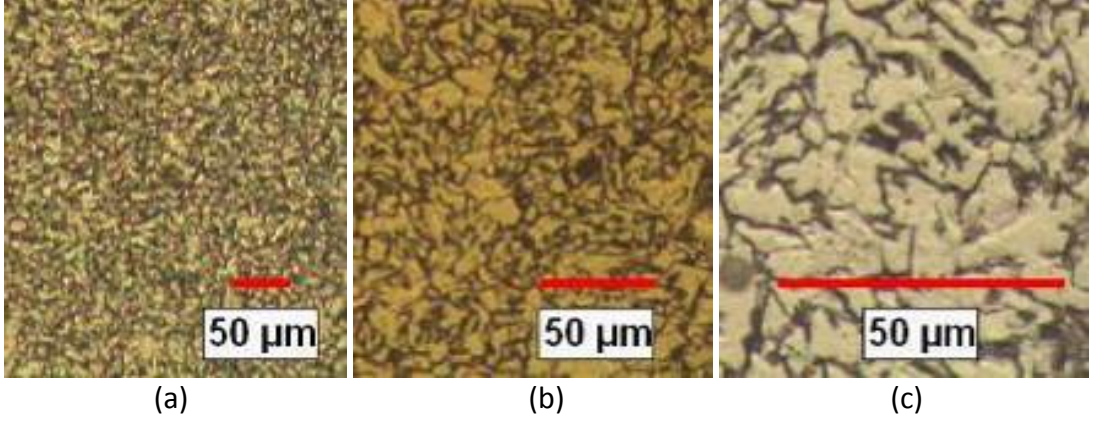
Şekil 7. 14 CM8 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü

Soğutmada nozullar arası mesafesi 2280 mm malzeme, 1140 mm olarak değiştirildiğinde CM7 nolu numunenin tane boyutu ASTM E112'ye göre 11, CM8 nolu numunenin tane boyutu 10,5 olmuştur. Buna karşılık gelen tane çapları CM7 nolu numunenin için $7,94\mu\text{m}$, CM8 nolu numune için $8,0\mu\text{m}$ 'dir. Nozullar arası mesafenin daralması malzemenin tane boyutunda büyüme, mekanik özelliklerinde de düşüş meydana getirmiştir.

S275 kalite malzemeler için denenen soğutma stratejisi değişikliğine ait CM9 nolu numunenin 100, 200 ve 500 büyütmedeki görüntüleri Şekil 7.15'te, CM10 nolu numunenin görüntüleri Şekil 7.16'da görülmektedir.



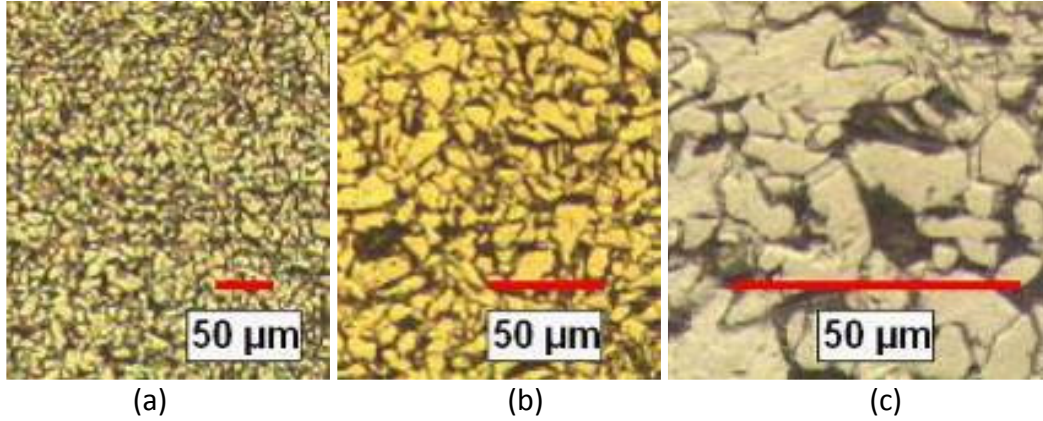
Şekil 7. 15 CM9 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü



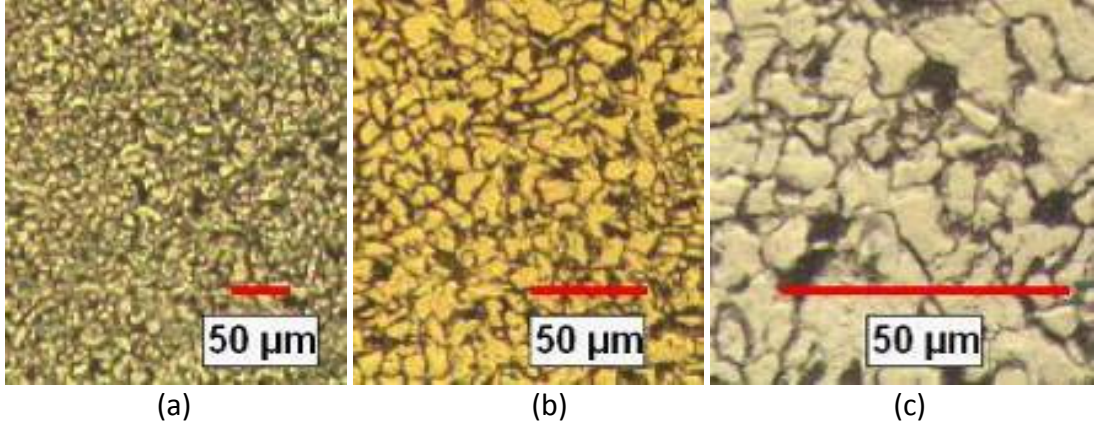
Şekil 7. 16 CM10 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü

Soğutma pratiği Early Quick (Erken Hızlı) olan malzeme, Late Slow (Geç Yavaş) ile soğutulduğunda malzemenin tane boyutu ASTM E112'ye göre 11 olarak aynı kalmıştır. Her iki malzemenin ortalama tane çapı da 7,0µm çıkmıştır. Bu malzemelerde soğutma pratiğinin malzemenin tane boyutunda ve mekanik özelliklerinde etkili olmamasının, malzeme kalınlığı (6,05 mm) kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

S275 kalite malzemeler için denenen nozullar arası mesafe değişikliğine ait CM11 nolu numunenin 100, 200 ve 500 büyütmedeki görüntüleri Şekil 7.17'de, CM12 nolu numunenin görüntüleri Şekil 7.18'de görülmektedir.



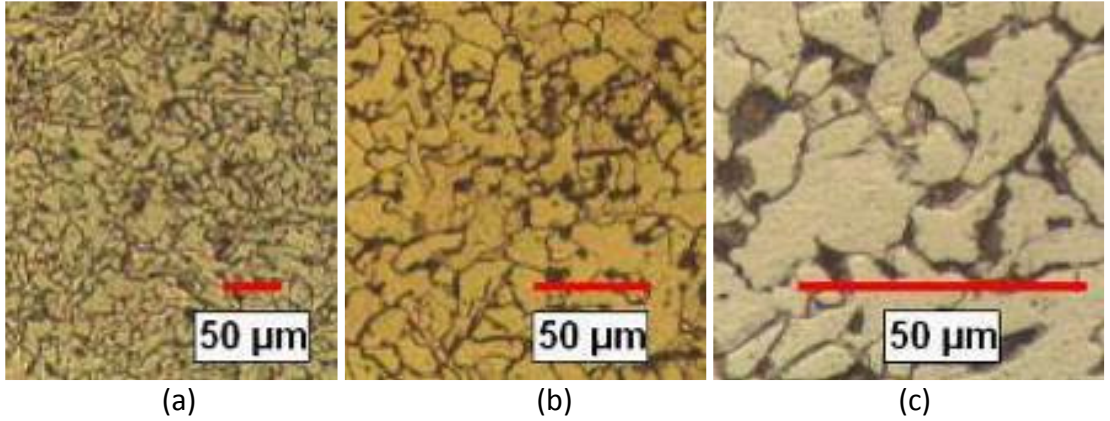
Şekil 7. 17 CM11 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü



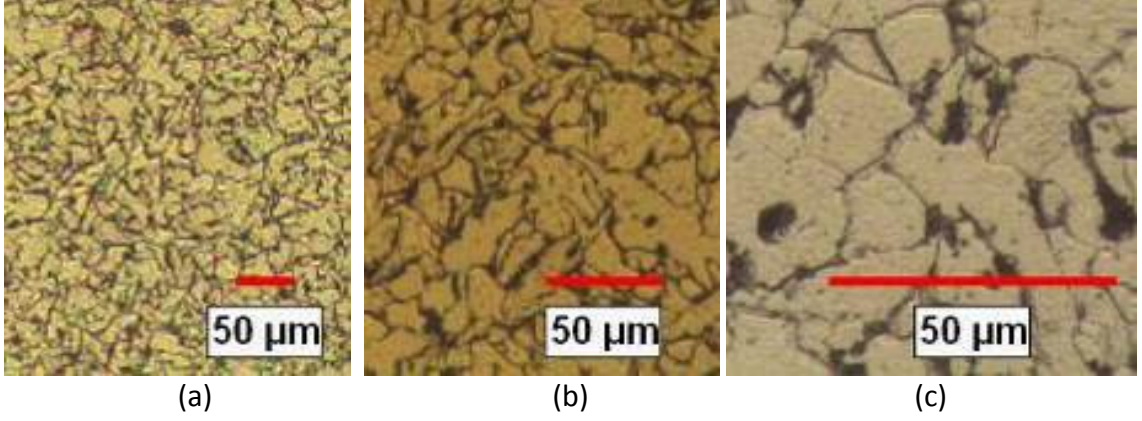
Şekil 7. 18 CM12 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü

Soğutmada nozullar arası mesafesi 1140 mm malzeme, 2280 mm olarak değiştirildiğinde hem CM11 hem de CM12 nolu numunenin tane boyutu ASTM E112'ye göre 11 olmuştur. Buna karşılık gelen tane çapları ise CM11 nolu numune için 7,0µm, CM12 nolu numune için 7,94µm'dir. Nozullar arası mesafenin artması malzemenin tane boyutunda büyüme, mekanik özelliklerinde de düşüş meydana getirmiştir.

SAE 1010 kalite malzemeler için denenen soğutma stratejisi değişikliğine ait CM13 nolu numunenin 100, 200 ve 500 ve 1000 büyütmedeki görüntüleri Şekil 7.19'da, CM14 nolu numunenin görüntüleri Şekil 7.20'de görülmektedir.



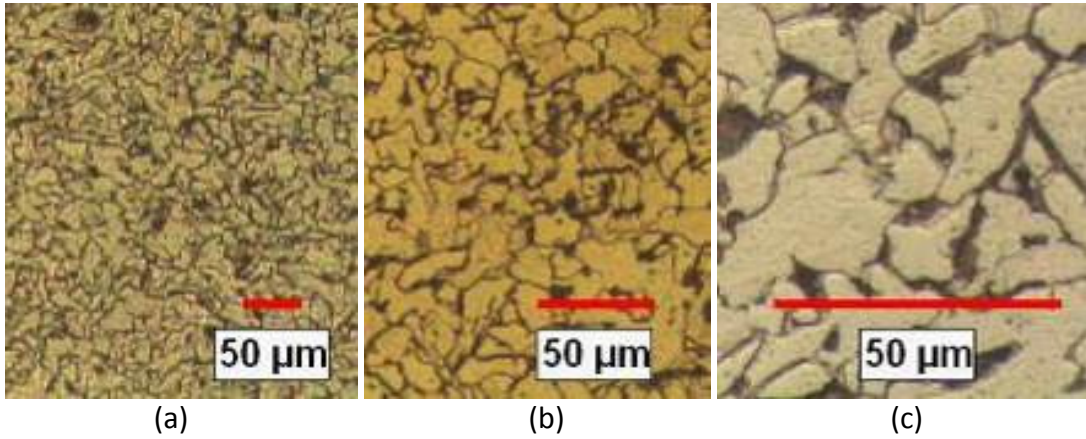
Şekil 7. 19 CM13 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü



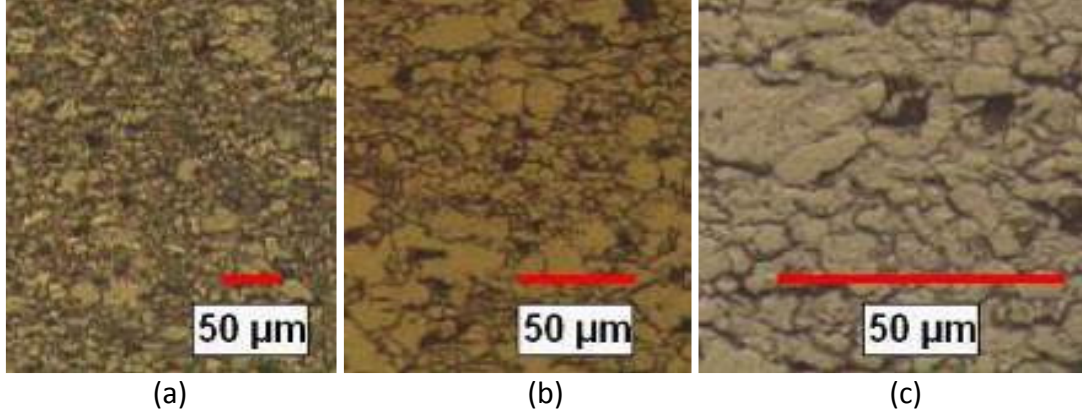
Şekil 7. 20 CM14 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü

Soğutma pratiği Early Slow (Erken Yavaş) olan malzeme, Late Slow (Geç Yavaş) ile soğutulduğunda malzemenin tane boyutu ASTM E112'ye göre 10,5 iken 10 olmuştur. Yani malzemenin ortalama tane çapı $9,44\mu\text{m}$ 'den $10\mu\text{m}$ 'ye çıkmıştır. Bu da tanelerde büyüme meydana geldiğini göstermektedir. Mekanik değerler ile karşılaştırıldığında ise malzeme kalınlığının fazla olması (5,84 mm) nedeni ile akma ve çekme değerleri her iki malzeme için de birbirine yakın çıkmıştır.

SAE 1010 kalite malzemeler için denenen nozullar arası mesafe değişikliğine ait CM15 nolu numunenin 100, 200 ve 500 büyütmedeki görüntüleri Şekil 7.21'de, CM16 nolu numunenin görüntüleri Şekil 7.22'de görülmektedir.



Şekil 7. 21 CM15 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü



Şekil 7. 22 CM16 nolu numunenin optik mikroskopta (a)100 büyütmede (b)200 büyütmede (c)500 büyütmede görüntüsü

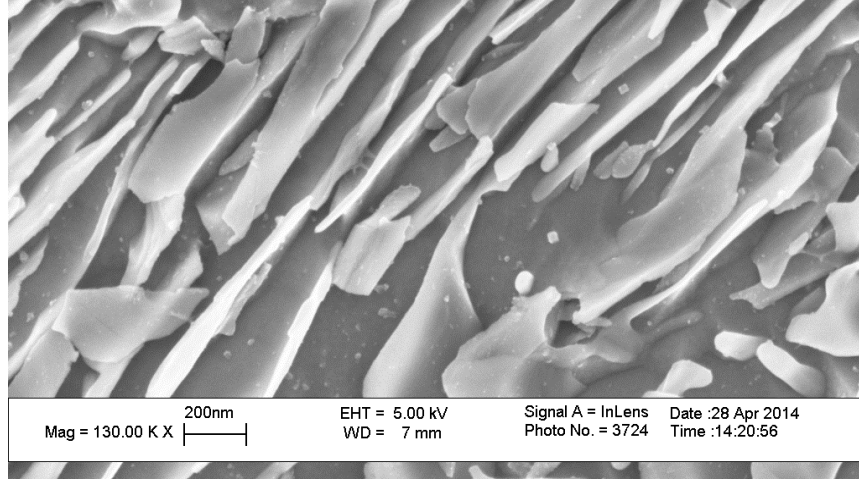
Soğutmada nozullar arası mesafesi 2280 mm malzeme, 1140 mm olarak değiştirildiğinde hem CM15 nolu numunenin tane boyutu ASTM 112'ye göre 10,5, CM16 nolu numunenin tane boyutu ise 11 olmuştur. Buna karşılık gelen ortalama tane çapları ise CM15 nolu numune için 9,44µm, CM16 nolu numune için 7µm'dir. Nozullar arası mesafenin azalması malzemenin tane boyutunda küçülme, mekanik özelliklerinde artış meydana getirmiştir.

CM16 nolu numunenin şeridin kenar bölgesine yakın alınması nedeni ile dönüşüm eğrisi kesildiği için alt ferrit taneleri ve iri ferrit taneleri bir arada görülmektedir.

7.4 Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemeleri

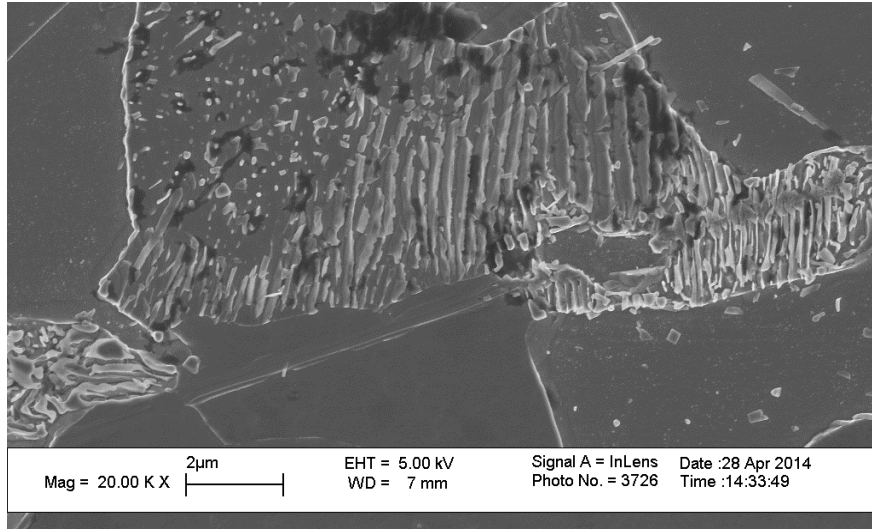
Yapılan denemeler sonrasında taramalı elektron mikroskobunda incelenen numunelere ait görüntüler bu başlık altında verilmiştir. Elektron mikroskobunda yapılan çalışmalarda yapıda oluşan perlit içerisindeki lameller arası mesafeler (ferrit - sementit) ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır.

S355 kalite malzemeler için denenen soğutma stratejisi değişikliğine ait CM1 nolu numunenin 13.000 büyütmedeki görüntüsü Şekil 7.23'te görülmektedir.



Şekil 7. 23 CM1 nolu numunenin SEM’de 13.000 büyütmedeki görüntüsü

Yapılan ölçümlerde perlit fazı içerisinde bulunan ve lamelsi yapıyı oluşturan ferrit ve sementit fazları arasındaki mesafe CM1 nolu bobinden alınmış olan numune için ortalama 112,2 nm olarak hesaplanmıştır. S355 kalite malzemeler için denenen soğutma stratejisi değişikliğine ait CM2 nolu numunenin 2.000 büyütmedeki görüntüsü Şekil 7.24’te görülmektedir.

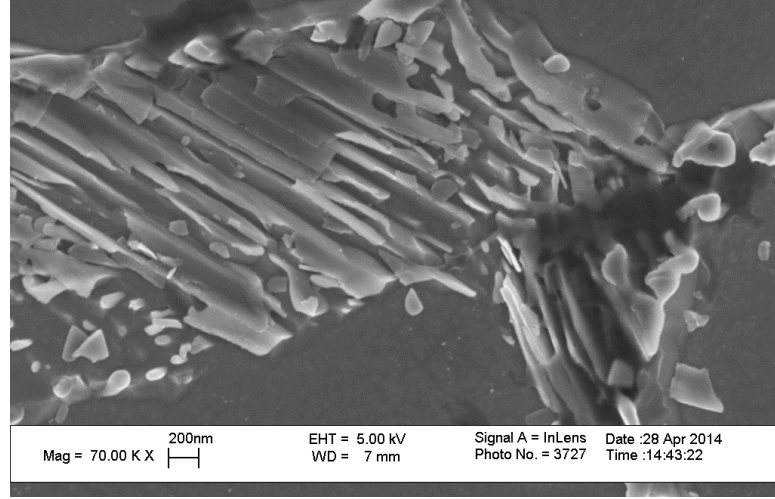


Şekil 7. 24 CM2 nolu numunenin SEM’de 2.000 büyütmedeki görüntüsü

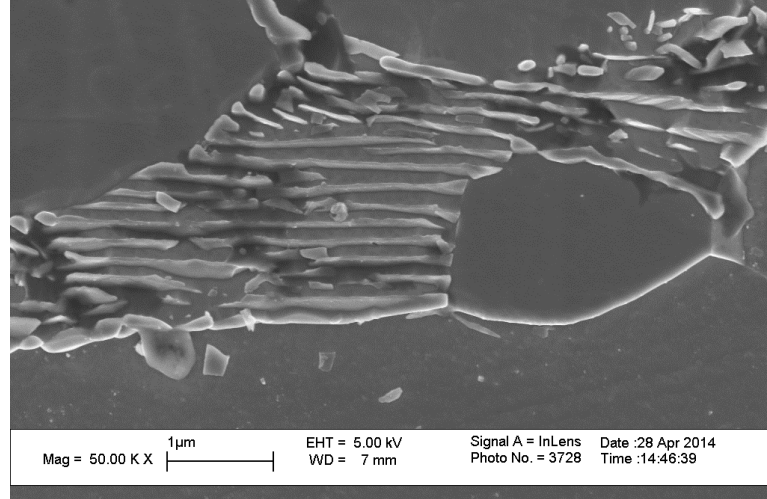
Yapılan ölçümlerde perlit fazı içerisinde bulunan ve lamelsi yapıyı oluşturan ferrit ve sementit fazları arasındaki mesafe CM2 nolu bobinden alınmış olan numune için ortalama 147,5 nm olarak hesaplanmıştır. Ölçümler sonucu CM1 numunesindeki ferrit ve sementit fazları arasındaki mesafe CM2 numunesine göre daha küçük çıkmıştır (112,2 nm). Akma ve çekme dayanımları ile kıyaslandığında CM1 numunesinin hem

çekme hem de akma dayanım değerleri CM2 numunesine göre yüksektir. Bu da perlit fazı içerisindeki lamel birbirine ne kadar yakın olursa mekanik değerler o kadar yüksek olur kuralını doğrulamaktadır.

S355 kalite malzemeler için denenen nozullar arası mesafe değişikliğine ait CM3 nolu numunenin 7.000 büyütmedeki görüntüsü Şekil 7.25'te, CM4 nolu numunenin 5.000 büyütmedeki görüntüsü Şekil 7.26'da görülmektedir.



Şekil 7. 25 CM3 nolu numunenin SEM'de 7.000 büyütmedeki görüntüsü

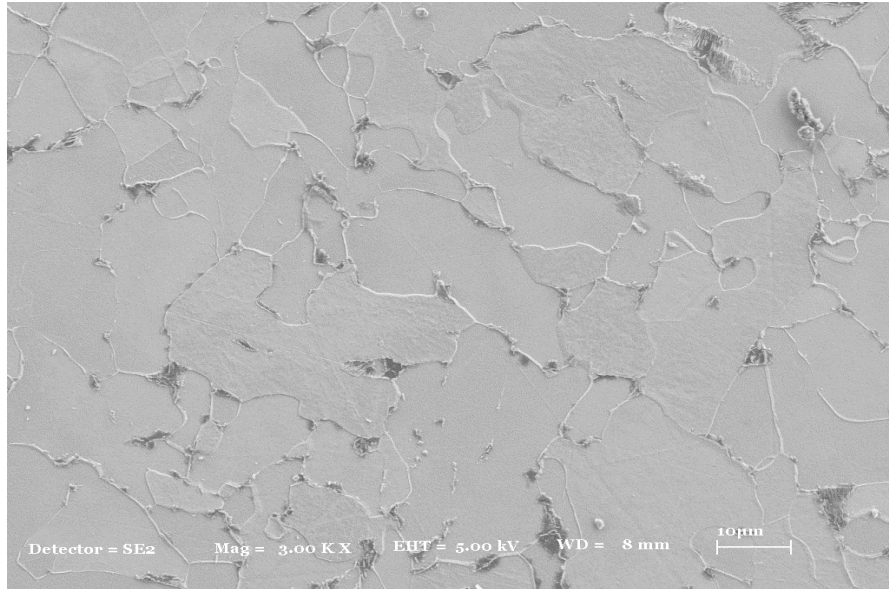


Şekil 7. 26 CM4 nolu numunenin SEM'de 5.000 büyütmedeki görüntüsü

Ölçümlerde perlit fazı içerisinde bulunan ve lamelsi yapıyı oluşturan ferrit ve sementit fazları arasındaki mesafe CM3 nolu bobinden alınmış olan numune için ortalama 129,4 nm, CM4 nolu bobinden alınmış olan numune için ortalama 146,9 nm olarak hesaplanmıştır. Bu malzemeler için akma ve çekme dayanımları karşılaştırıldığında

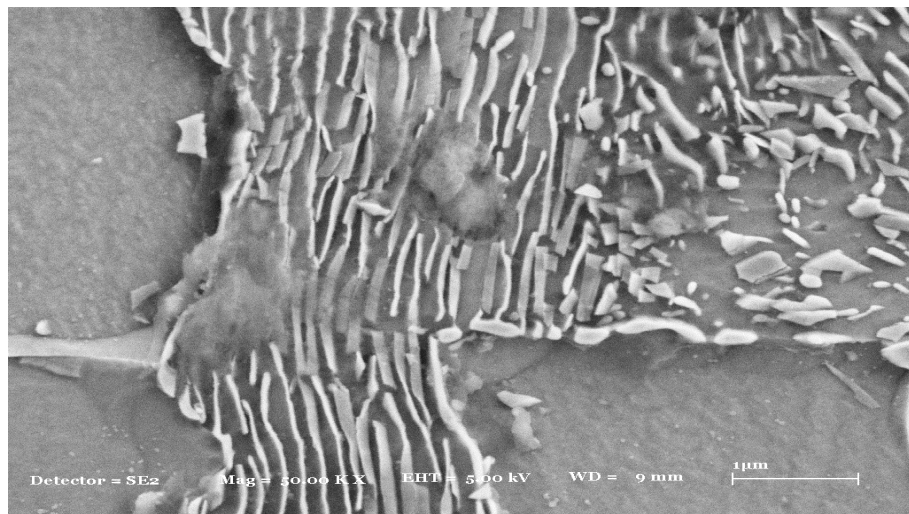
lameller arası mesafenin görece daha büyük olduğu CM4 nolu numunenin CM3 nolu numuneye göre değerleri daha düşük çıkmıştır.

S235 kalite malzemeler için yapılan incelemelerde, kalitenin karbon miktarının düşük olması nedeni ile ölçüm alınabilecek lamelsi bir perlit yapısı görülememiştir. Bu kaliteye ait CM5 nolu numunenin mikroskop görüntüsü Şekil 7.27’de verilmiştir.

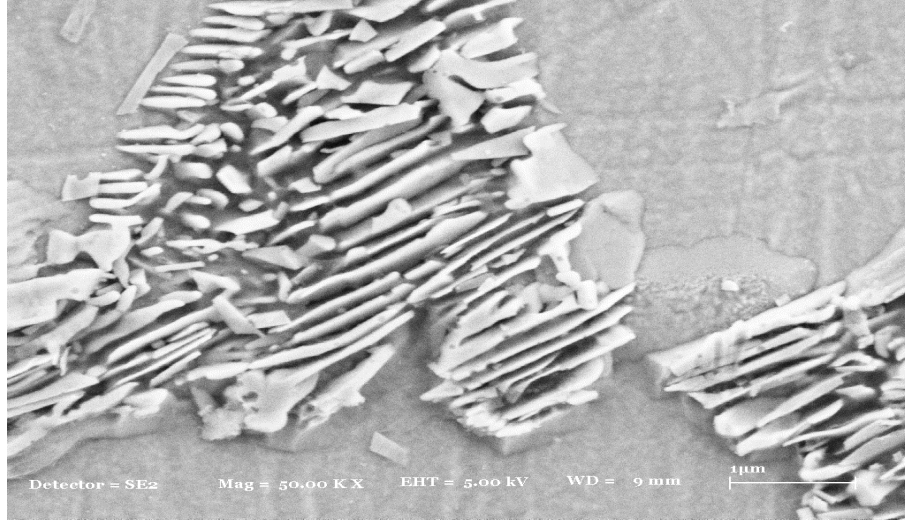


Şekil 7. 27 CM5 nolu numunenin SEM’de 300 büyütmedeki görüntüsü

S275 kalite malzemeler için denenen soğutma stratejisi değişikliğine ait 5.000 büyütme için CM9 nolu numunenin görüntüsü Şekil 7.28’de, CM10 nolu numunenin görüntüsü Şekil 7.29’da görülmektedir.



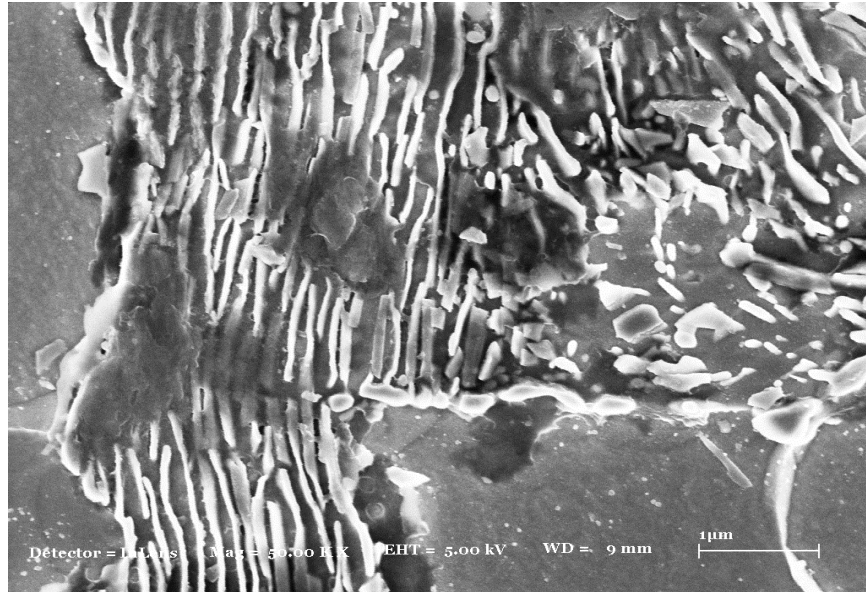
Şekil 7. 28 CM9 nolu numunenin SEM’de 5.000 büyütmedeki görüntüsü



Şekil 7. 29 CM10 nolu numunenin SEM’de 5.000 büyütmedeki görüntüsü

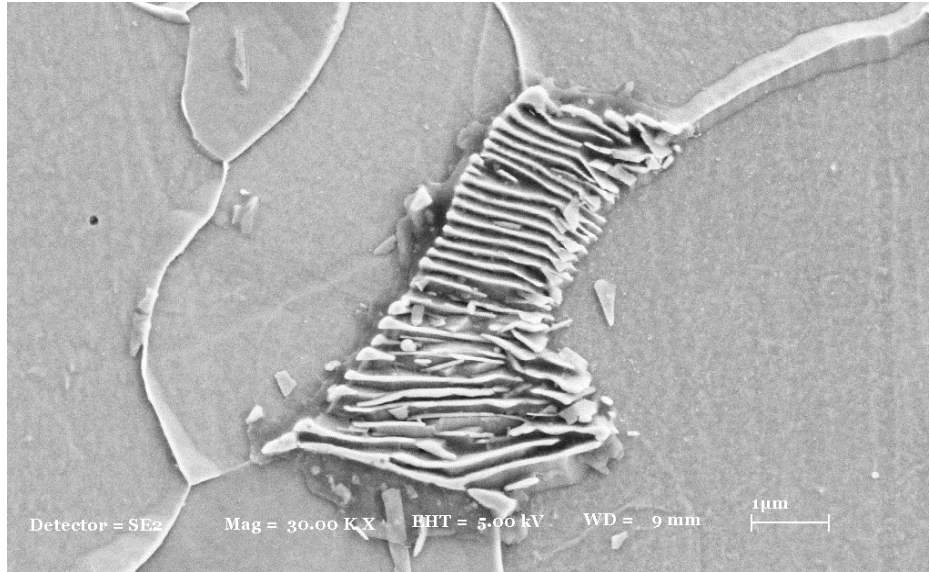
Perlit fazını oluşturan ferrit ve sementit lamelleri arasındaki mesafe CM9 nolu numune için ortalama 121,3 nm, CM10 nolu numune için 96,9 nm olarak hesaplanmıştır. Lameller arası mesafe her iki numune için farklı çıkmasına rağmen mekanik değerler açısından bu iki malzeme için farklılık bulunmamaktadır. Bu da malzeme kalınlığının 6,05 mm yani kalın olmasından kaynaklanmaktadır.

S275 kalite malzemeler için denenen nozullar arası mesafe değişikliğine ait CM11 nolu numunenin 5.000 büyütmedeki görüntüsü Şekil 7.30’da, CM12 nolu numunenin 3.000 büyütmedeki görüntüsü Şekil 7.31’de görülmektedir.



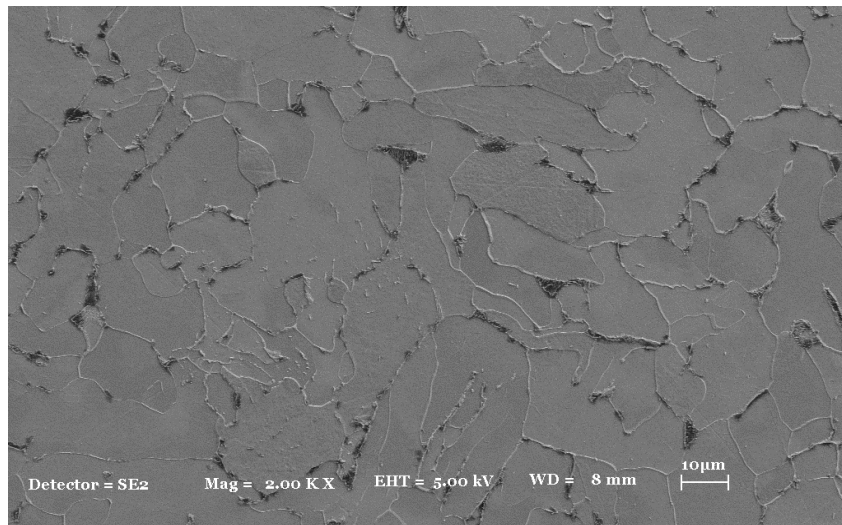
Şekil 7. 30 CM11 nolu numunenin SEM’de 5.000 büyütmedeki görüntüsü

Yapılan ölçümlerde ferrit ve sementit fazları arasındaki mesafe CM11 nolu numune için 121,5 nm, CM12 nolu numune için 108,7 nm olarak hesaplanmıştır. Malzeme kalınlığı 6,05 olan bu numunelerin aynı kimyasal yapıya sahip olmaları durumunda lameller arası mesafe değişikliğinin mekanik özelliklere ciddi oranda yansımaması beklenir. Ancak CM12 nolu numunenin karbon oranı CM11 nolu malzemeye göre düşük olduğu için akma ve çekme dayanım değerleri CM12 nolu numune için daha düşük çıkmıştır.



Şekil 7. 31 CM12 nolu numunenin SEM’de 3.000 büyütmedeki görüntüsü

SAE1010 kalite malzemeler için yapılan incelemelerde, kalitenin karbon miktarının düşük olması nedeni ile ölçüm alınabilecek lamellar yapı görülememiştir. Bu kaliteye ait CM13 nolu numunenin mikroskop görüntüsü Şekil 7.32’de verilmiştir.



Şekil 7. 32 CM13 nolu numunenin SEM’de 200 büyütmedeki görüntüsü

DEĞERLENDİRME

1.denemede Early Quick (Erken Hızlı) soğutma stratejisi ile üretilen S355 kalite CM1 nolu bobinin yapılan mekanik testlerinde akma ve çekme mukavemetleri, Late Quick (Geç Hızlı) soğutma stratejisi ile üretilen CM2 nolu bobine göre daha yüksek çıkmıştır. Kimyasal Analiz değerleri karşılaştırıldığında CM1 nolu bobinin “C” değerinin CM2 nolu bobinden 0,01 puan yüksek “Mn” değerinin 0,2 puan düşük olduğu görülmüştür. Erken Hızlı soğutma stratejisi ile üretilen bobinin mekanik değerlerinin yüksek çıkmasının “C” içeriği, empürite element farklılıkları ve soğutma stratejisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan Taramalı Elektron Mikroskobu incelemelerinde perlit fazı içerisindeki lameller arası mesafenin Early Quick soğutmada, Late Quick soğutmaya kıyasla daha düşük çıkması (CM1:112,2nm; CM2:147,5nm) ve tane boyutunun yine görece daha düşük olması da (CM1:6 μ ; CM2:7 μ) bunun bir göstergesidir.

1.denemede Early Quick soğutma stratejisi ile üretilen S355 kalite CM3 nolu bobinin mekanik değerleri ile Early Slow (Erken Yavaş) soğutma stratejisi ile üretilen CM4 nolu bobin mekanik değerlerinin birbirine çok yakın çıkması iki strateji arasındaki nozullar arası mesafe farkının bu kimyasal kompozisyon değerlerinde belirgin bir mukavemet farkı oluşturmadığını göstermiştir. Ancak Taramalı Elektron Mikroskobu incelemelerinde, nozullar arası mesafe farkının lameller arası mesafe üzerinde 15nm’lik bir fark oluşturduğu tespit edilmiştir (CM3:129,4nm; CM4:146,9nm). Nozullar arası mesafe farkı ile üretilen bobinlerde daha belirgin bir fark ortaya çıkabilmesi için bu değişikliğe daha belirgin bir tepki verebilecek kompozisyonlarla çalışılması (yüksek C veya Cr içeriğine sahip kaliteler) gerektiği düşünülmektedir.

S355 kalite numunelerin perlit lamelleri arası mesafe ölçüm değerleri Çizelge 8.1’de verilmiştir.

Çizelge 8. 1 S355 ve S275 kalite numunelerin lameler arası mesafe ölçüm değerleri

Kalite	Numune No	Perlit Lamelleri Arası Mesafe (nm)
S355	CM1	112,2
	CM2	147,5
	CM3	129,4
	CM4	146,9
S275	CM9	121,3
	CM10	116,5
	CM11	121,3
	CM12	113,1

2.denemede kullanılan S235 kalite bobinlerin mekanik değerleri karşılaştırıldığında Early Slow stratejisi ile üretilen CM5 nolu bobinin Late Slow (Geç Yavaş) stratejisi ile üretilen CM6 nolu bobinden daha yüksek mukavemete sahip olduğu görülmüştür. CM5 ve CM6 nolu bobinlerin mukavemet değerleri arasındaki farkta, soğutma stratejisinin yanı sıra kompozisyonları arasındaki 0,02 puanlık “C” farkının da etkili olduğu tahmin edilmektedir.

Nozullar arası mesafeler değiştirilerek üretilen S235 kalite CM7 ve CM8 nolu bobinlerin mekanik değerlerinin birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu numuneler üzerinde yapılan Taramalı Elektron Mikroskobu incelemelerinde kompozisyondaki düşük “C” içeriğinden dolayı belirgin bir lamelsi perlit yapısı tespit edilemediği için ölçüm alınamamıştır.

3.denemede S275 kalite bobinler üzerinde yapılan Early Quick, Late Slow ve nozullar arası mesafe farklılıklarında üretilen bobinlerin (CM9, CM10, CM11 ve CM12) mekanik değerleri birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Soğutma stratejilerindeki farklılığın mekanik değerleri ciddi anlamda etkilememesinde üretilen şerit kalınlığının (6,05 mm) etkiliği olduğu düşünülmektedir. Taramalı Elektron Mikroskobu incelemelerindeki lameller arası mesafe ölçümlerinde bulunan birbirine yakın değerler (CM9:121,3nm; CM10:116,5nm; CM11:121,3nm; CM12:113,1nm) bu kalınlık için yapılan değişikliklerin mikroyapıya ciddi anlamda etki etmediğini göstermektedir. S275 kalite numunelerin perlit lamelleri arası mesafe ölçüm değerleri Çizelge 8.1’de verilmiştir.

4. denemede kullanılan SAE 1010 kalite CM13 ve CM14 nolu bobinlerin mekanik değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır. 0,08 C içeriğine ve 5,84 mm et kalınlığına sahip bu bobinlerin gorece dşşşk “C” içeriği ve yüksek et kalınlığı nedeniyle soğutma stratejileri farkından pek etkilenmediği görülmüştür. CM15 ve CM16 nolu bobinlerdeki nozullar arası mesafe değişikliğinde malzemelerin dayanım değerleri arasında farklılık olmasının hem empürite elementleri olan Cr ve Ni değerlerindeki farklılık hem de Erken Hızlı soğutma pratiği kaynaklı olduğu sanılmaktadır. Bu kalite malzeme için yapılan Taramalı Elektron Mikroskobu incelemelerinde ölçüm yapılabilecek düzenli bir lamelsi perlitik yapı tespit edilememiştir.

BÖLÜM 9

GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Sıcak haddeleme yöntemi ile üretilen, genellikle konstrüksiyon ve boru malzemesi olarak kullanılan S235JR, S275JR, S355JR ve SAE1010 kalite bobinler üzerinde farklı soğutma stratejisi ve farklı nozullar arası mesafe denemeleri yapılarak malzemelerin mekanik özellikleri ve mikroyapılarındaki değişimler gözlenmiştir.

Erken soğutma, geç soğutma stratejileri ve farklı nozullar arası mesafe kullanılarak yapılan denemelerde, soğutma pratiklerinin yanında yapıdaki C ve Mn oranlarındaki değişikliğin de akma ve çekme dayanımlarında etkin rol oynadığı tespit edilmiştir.

Mekanik özelliklerdeki bu değişiklik hem malzemenin tane büyüklüğündeki hem de yapıda oluşan perlit fazı içerisindeki ferrit-sementit lamelleri arasındaki mesafe değişikliğinden kaynaklandığı yapılan deneysel çalışmalar sonucu elde edilmiştir.

Denemelerde farklı kaliteler için farklı bobin kalınlıkları seçilerek malzeme kalınlığının mekanik özellik ve mikroyapı üzerinde etkisinin olup olmadığı araştırılmış, incelemeler sonrası malzeme kalınlığının artması ve soğutma pratiğindeki değişikliğin akma ve çekme dayanım değerlerinde ciddi oranda değişikliğe yol açmadığı gözlenmiştir. Öyle ki malzeme kalınlığı 1,32 mm ve 3,60 mm olan malzemelerde dayanım değerlerinde %6,1'e varan artış sağlanırken, malzeme kalınlığı 5,84 mm ve 6,05 mm malzemelerdeki dayanım değerlerinde maksimum %0,3'lük değişim sağlanmıştır.

Soğutma stratejileri ve nozullar arası mesafe farklılıklarının mekanik değerler üzerindeki etkilerinin daha belirgin bir şekilde ortaya konabilmesi için daha yüksek "C"

içeriğine sahip ve genelde ısıt işlemler için çeliği olarak kullanılan 30MnB5 ve 28Mn6 gibi kalitelerle çalışılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

Ayrıca yapılacak denemeler sonrası üretilen bobinlerden, kalıntı gerilim ölçümü yapılması, soğutma stratejilerinde yapılan değişikliklerin nihai mamül üzerindeki etkilerini ortaya koymaya yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Boyoğlu, E., (2011). Çelikhane ve Haddehane Notları, Çolakoğlu Metalurji A.Ş., Kocaeli.
- [2] Körmükçü, B.E., (2011). Bir Sıcak Sac Haddeleme Tesisinin Devreye Alınması ve İşletme Parametrelerinin Tespiti, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [3] Hot&Cold Working and the Rolling Process,
<http://www.leonghuat.com/articles/hot&cold.htm>, 27 Ağustos 2013.
- [4] Güleç, Ş., Aran, A., (1987). Malzeme Bilgisi, Cilt:1, TÜBİTAK Marmara Bilimsel ve End. Araştırma Enstitüsü, MBEAE Matbaası, Kocaeli.
- [5] Güleç, Ş., Aran, A., (1987). Malzeme Bilgisi, Cilt:2, TÜBİTAK Marmara Bilimsel ve End. Araştırma Enstitüsü, MBEAE Matbaası, Kocaeli.
- [6] Çolakoğlu Metalurji A.Ş. Tarihçesi, www.colakoglu.com.tr
- [7] Vakili, S., (2011). Analysis Of Water Cooling Process Of Steel Strips On Runout Table, Doktora Tezi, The University of British Columbia, Kanada.
- [8] Purcell, A., (2000). Mathematical Modelling of Temperature Evolution in the Hot Rolling of Steel, Yüksek Lisans Tezi, McGill University, Kanada.
- [9] Gong, D., Xu, J., Peng, L., Wang, G., Liu, X., (2007). Self-Learning and Its Application to Laminar Cooling Model of Hot Rolled Strip, Çin.
- [10] Liu, Z., (2001). Experiments and Mathematical Modelling of Controlled Runout Table Cooling in a Hot Rolling Mill, Doktora Tezi, The University of British Columbia, Kanada
- [11] Hernandez, V. H., (1988). Heat Transfer Model of the Hot Rolling Runout Table-Cooling and Coil Cooling of Steel, Yüksek Lisans Tezi, The National University of Mexico, Meksika.
- [12] Zhou, Z., (2003). Flatness Control of Hot Rolled Steel During Cooling on the Run-out Table, Yüksek Lisans Tezi, Monach University, Avustralya.

- [13] Guerrero, M. P., Flores, C. R., Pérez, A., Colas, R., (1999). Modelling Heat Transfer in Hot Rolling Work Rolls, Meksika.
- [14] Ginzburg, V. B., (2005). Metallurgical Design of Flat Rolled Steels, Marcel Dekker, New York.
- [15] Henry, S., (2010). Fives Stein-Industrial Reheating Furnace, Fransa.
- [16] Ginzburg, V. B., (2009). Flat Rolled Steel Processes, Sound Parkway, Newyork.
- [17] Lenard, J. G., (2007). Primer on Flat Rolling, Butterworth Heinemann Jordan Hill, İngiltere.
- [18] Rudge, D., (2006). Hatch-Coilbox Technology, Oakville, Ontario, Kanada.
- [19] Kumar, R. K., Sinha, S. K., Lahiri A.K., (1996). Modelling of the Cooling Process on the Runout Table of a Hot Strip Mill, Hindistan
- [20] Zhao, Y., (2005). The Cooling of a Hot Steel Plate by an Impinging Water Jet, Doktora Tezi, University of Wollongong, Avustralya.
- [21] Cho, M. J., Thomas, B. G., Lee, P. J., (2009). 3-D Numerical Study of Impinging Water Jets in Run Out Table Cooling Processes, Amerika
- [22] Blazevic, D. T., (1982). Hot Strip Mill Coiling, Association of Iron and Steel Engineers (AISE), Yearbook 1981 Three Gateway Center Pittsburg, Amerika.
- [23] Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, (2006). Mikroyapısal Görüntüleme ve Tanı, II. Basım, Kocaeli
- [24] Guo, R. M., (1993). Heat Transfer of Laminar Flow Cooling During Strip Acceleration on Hot Strip Mill Runout Tables, Amerika.
- [25] Jondhale, K. V., (2002). Heat Transfer During Multiple Jet Impingement on the Top Surface of Hot Rolled Steel Strip, Kanada.
- [26] SMS Demag, (2006). Technical Specifications Automation Process of HSM.
- [27] DIN EN 10025-2:2007, (2004). Hot Rolled Products of Structural Steel – Part 2: Technical Delivery Conditions for Non-Alloy Structural Steel, Euro Norm.
- [28] Ürünlerin Kullanım Alanları, http://www.yucelboru.com.tr/tr/kdk_profil.asp
- [29] Çolakoğlu Metalurji A.Ş., (2014). Product Catalog, Kocaeli.
- [30] Hai-bo, X., Xiang-hua, L., Guo-dong, W., Zhong-ping, Z., (2006). Optimization and Model of Laminar Cooling Control System for Hot Strip Mills, Çin.
- [31] Pietrzyk, M., Madej, L., Rauch, L., Gołęb, R., (2010). Multiscale Modelling of Microstructure Evolution During Laminar Cooling of Hot Rolled DP Steels, Polonya.
- [32] Júnior, H. L., Silva, A. F., Passos, J. C., (2007). Analysis of the Cooling Effect of a Water Jet on a Hot Steel Plate, Brezilya.

		Soğutma Stratejisi Değişikliği		Nozul Arası Mesafe Değişikliği	
S355	Soğutma Stratejisi	Early Quick	Late Quick	Early Quick	Early Slow
	Numune No	CM1	CM2	CM3	CM4
	Kalınlık (mm)	3.60	3.60	3.60	3.60
	Akma Dayanımı (MPa)	451	434	403	410
	Çekme Dayanımı (MPa)	567	543	535	544
	% Uzama	26.5	27.9	29.5	27.3
	C	0.167	0.155	0.163	0.164
	Mn	1.299	1.493	1.248	1.238

		Soğutma Stratejisi Değişikliği		Nozul Arası Mesafe Değişikliği	
S235	Soğutma Stratejisi	Early Slow	Late Slow	Early Slow	Early Quick
	Numune No	CM5	CM6	CM7	CM8
	Kalınlık (mm)	1.32	1.32	1.32	1.32
	Akma Dayanımı (MPa)	360	344	360	354
	Çekme Dayanımı (MPa)	445	418	445	440
	% Uzama	31.2	32.1	31.2	32.3
	C	0.087	0.065	0.087	0.080
	Mn	0.538	0.568	0.538	0.547

		Soğutma Stratejisi Değişikliği		Nozul Arası Mesafe Değişikliği	
S355	Soğutma Stratejisi	Early Quick	Late Slow	Early Quick	Early Slow
	Numune No	CM9	CM10	CM11	CM12
	Kalınlık (mm)	6.05	6.05	6.05	6.05
	Akma Dayanımı (MPa)	361	361	361	357
	Çekme Dayanımı (MPa)	501	501	501	492
	% Uzama	29.1	30.6	29.1	28.2
	C	0.164	0.166	0.164	0.159
	Mn	0.632	0.631	0.632	0.629

		Soğutma Stratejisi Değişikliği		Nozul Arası Mesafe Değişikliği	
SAE 1010	Soğutma Stratejisi	Early Slow	Late Slow	Early Slow	Early Quick
	Numune No	CM13	CM14	CM15	CM16
	Kalınlık (mm)	5.84	5.84	5.84	5.84
	Akma Dayanımı (MPa)	263	262	263	280
	Çekme Dayanımı (MPa)	390	391	390	404
	% Uzama	34.8	31.4	34.8	32.9
	C	0.083	0.077	0.083	0.083
	Mn	0.433	0.416	0.433	0.431

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ezgi BOYOĞLU
Doğum Tarihi ve Yeri : 07.06.1988 İstanbul – Üsküdar
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ezgiboyoglu@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Met. ve Malzeme Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010
Lise	Fen Bilimleri	Özel Darüşşafaka Lisesi	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010	ANKO End. Ürün. Tas. San. ve Tic. A.Ş.	Eğitim Destek Sorumlusu
2011-	Çolakoğlu Metalurji A.Ş.	Sıcak Sac Haddehanesi İşletme Mühendisi