



**FARKLI KALİTEDEKİ RAYLARIN MİKROYAPI,
KALINTI GERİLME VE KIRILMA TOKLUĞU
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Sabri ERTAN

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Muhammet Emre TURAN**

**FARKLI KALİTEDEKİ RAYLARIN MİKROYAPI, KALINTI GERİLME
VE KIRILMA TOKLUĞU ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Sabri ERTAN

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Muhammet Emre TURAN**

**KARABÜK
Ocak 2021**

Sabri ERTAN tarafından hazırlanan “FARKLI KALİTEDEKİ RAYLARIN MİKROYAPI, KALINTI GERİLME VE KIRILMA TOKLUĞU ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Muhammet Emre TURAN
Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Metalurji ve Malzeme Müh. Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 07/01/2021

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Prof. Dr. Mustafa ACARER (SÜ)
Üye : Doç. Dr. Muhammet Emre TURAN (KBÜ)
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Engin ÇEVİK (KBÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Sabri ERTAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI KALİTEDEKİ RAYLARIN MİKROYAPI, KALINTI GERİLME VE KIRILMA TOKLUĞU ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Sabri ERTAN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Muhammet Emre TURAN

Ocak 2021, 60 sayfa

Bu çalışmada, demir yollarında kullanılan R260, R260Mn ve R350HT kalite rayların kalıntı gerilme, yorulma çatlak ilerleme ve kırılma tokluğu performansları incelenmiştir. Kimyasal kompozisyonun (Mn miktarı) ve ısıl işlemin (mantar sertleştirme işlemi) rayların mikro yapı, sertlik, gerilme ve yorulma davranışlarına etkisi araştırılmıştır. Mikroyapı incelemeleri, standart metalografik prosesler uygulandıktan sonra, Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Spektral analizle deneysel çalışmada kullanılan rayların kimyasal bileşimleri not edilmiş ve brinell sertlik yöntemiyle de sertlikleri ölçülmüştür. Rayların üretimi neticesinde oluşan kalıntı gerilmeleri hem X ışını ile hem de gerinim ölçerlerle ölçülmüş ve bu teknikler kendi aralarında kıyaslanmıştır. ASTM standartlarına göre üç farklı kalite rayların yorulma çatlak ilerleme hızları ve kırılma tokluğu davranışları incelenmiştir.

Deneysel sonuçlar neticesinde mantarı sertleştirilmiş rayın yorulma çatlak ilerleme hızı daha düşük, kırılma tokluğu ise daha yüksek bulunmuştur. X ışını yöntemiyle yapılan kalıntı gerilme ölçümleri, kesme yöntemine göre tutarlı çıkmıştır. R260 ve R260Mn kalite raylarda mikro yapı ve sertlik değerleri arasında belirgin bir fark görülmemiştir. R260Mn kalite ray daha düşük yorulma çatlak ilerleme hızına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu raylar genel olarak kaba perlitik yapıya sahip olmakla beraber R350HT kalite ray da ince perlitik yapı görülmüştür. Lameller arası mesafe de mantarı sertleştirilmiş rayda diğerlerine göre daha azdır.

Anahtar Sözcükler : Raylar, kırılma tokluğu, kalıntı gerilme, yorulma çatlak ilerleme.

Bilim Kodu : 91519

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE, RESIDUAL STRESS AND FRACTURE TOUGHNESS CHARACTERISTICS OF DIFFERENT QUALITY RAILS

Sabri ERTAN

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Metallurgy and Materials Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Muhammet Emre TURAN

January 2021, 60 pages

In this study, the residual stress, fatigue crack propagation and fracture toughness performances of R260, R260Mn and R350HT quality rails used in railways were investigated. The effects of chemical composition (Mn content) and heat treatment (cork hardening process) on the microstructure, hardness, stress, and fatigue behavior of rails were examined. Microstructural investigations were carried out using Scanning Electron Microscope (SEM) after applying standard metallographic processes. The chemical compositions of the rails used in the experimental study were noted by spectral analysis and their hardness was measured with the brinell hardness method. The residual stresses resulting from the production of the rails were measured with both of X-ray and strain gauges, and these techniques were compared among themselves. Fatigue crack propagation rates and fracture toughness behavior of three different quality rails according to ASTM standards were examined.

As a result of the experimental results, the fatigue crack propagation rate of the head hardened rail was found to be lower and the fracture toughness was higher. The residual stress measurements made by the X-ray method were consistent with cutting method. There was no significant difference between the microstructure performance and hardness values in R260 and R260Mn quality rails. It was determined that R260Mn quality rail has lower fatigue crack propagation rate. Although these rails generally have a coarse pearlitic structure, a fine pearlitic structure was observed in the R350HT quality rail. The distance between the lamellae is also less in the head hardened rail compared to the others.

Key Word : Rails, fracture toughness, residual stress, fatigue crack growth rate.

Science Code : 91519

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasını, araőtırılmasında, planlanmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Muhammet Emre TURAN' a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	2
RAY ÜRETİM AŞAMALARI	2
2.1. YÜKSEK FIRIN	2
2.1.1. Yüksek Fırınların Gelişimi	2
2.1.2. Yüksek Fırın Prosesi.....	3
2.1.3. Yüksek Fırın Hareketi.....	5
2.1.4. Yüksek Fırın Yapısı.....	6
2.3. KÜKÜRT GİDERME	7
2.4. KONVERTER.....	7
2.4.1. Çelik Üretim Yöntemleri ve Tarihi.....	8
2.4.2. LD Konverter Metodu	9
2.4.3. Konverterin Yapısı.....	10
2.4. KONVERTER PROSESİ.....	12
2.5. POTA FIRINI.....	13
2.5.1. Trafo	14
2.5.2. Elektrot Kolları ve Elektrot Tutucuları.....	15
2.5.3. Pota Fırını Gövdesi.....	15
2.5.4. Transfer Arabaları.....	15

	<u>Sayfa</u>
2.5.5. Alyaj Besleme Sistemi.....	16
2.5.6. Tel Besleme Sistemi	16
2.5.7. Toz Toplama Sistemi.....	16
2.6. VAKUM GAZ GİDERME	16
2.7. SÜREKLİ DÖKÜM	17
2.7.2.1. Pota Vinçleri.....	18
2.7.2.2. Pota	18
2.7.2.3. Pota Tareti.....	18
2.7.2.4. Tandış ve Tandış Kontrol	19
2.7.2.5. Çelik Akışı.....	20
2.7.2.6. Kalıp ve Kalıp Seviye Kontrolü	21
2.7.2.7. Osilasyon / Kalıp Yağı / Döküm Tozu	22
2.7.2.8. Birincil Soğutma.....	22
2.7.2.9. İkincil Soğutma.....	23
2.7.2.10. Kesme ve Transfer	23
2.8. HADDELEME	23
2.8.1. Hadde Fırın Şarjı ve Isıtma.....	24
2.8.2. Ön Hadde	24
2.8.3. Ara Hadde.....	24
2.8.4. Son Hadde.....	25
2.8.5. Soğutma ve Doğrultma	25
2.8.6. Muayene, Kesme ve Paketleme	25
BÖLÜM 3	27
KALINTI GERİLME, KIRILMA TOKLUĞU VE ÇATLAK İLERLEMESİ	27
3.1. KALINTI GERİLME VE OLUŞUMU	27
3.2. KIRILMA TOKLUĞU VE ÇATLAK OLUŞUMU	28
BÖLÜM 4	30
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	30
4.1. METALOGRAFİK İŞLEMLER.....	30
4.3. KESME YÖNTEMİYLE KALINTI GERİLME ÖLÇÜMÜ	32
4.4. X İŞİNİ YÖNTEMİYLE KALINTI GERİLME ÖLÇÜMÜ	35

	<u>Sayfa</u>
4.5. MİKRO YAPI İNCELEMELERİ	36
BÖLÜM 5	38
DENEYSEL SONUÇLAR	38
5.1. SERTLİK SONUÇLARI.....	38
5.2. MİKROYAPI ANALİZ SONUÇLARI.....	40
5.3. KESME YÖNTEMİYLE KALINTI GERİLME ÖLÇÜM SONUÇLARI....	44
5.4. X IŞINI YÖNTEMİYLE KALINTI GERİLME ÖLÇÜM SONUÇLARI ...	46
5.5. YORULMA ÇATLAK İLERLEME HIZI DENEY SONUÇLARI	49
5.6. KIRILMA TOKLUĞU ANALİZİ DENEY SONUÇLARI.....	51
BÖLÜM 6	54
GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	54
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Yüksek fırın bölgeleri.....	5
Şekil 2.2. Konverter şematik gösterimi	11
Şekil 2.3. Konverter prosesi	12
Şekil 2.4. Potadan tandişe döküm.....	19
Şekil 3.1. Kırılma modları.	29
Şekil 4.1. Metalografi numune hazırlama cihazları.....	31
Şekil 4.2. Spektral analiz cihazı.....	31
Şekil 4.3. Brinell sertlik ölçüm cihazı..	32
Şekil 4.4. Gerinim ölçerin yapıştırılması, deneyde kullanılan malzemeler ve kesme aşaması.	34
Şekil 4.5. Veri toplama cihazı.	35
Şekil 4.6. Rigaku Ultima XRD cihazı.	36
Şekil 4.7. SEM cihazı.	36
Şekil 4.8. Çatlak ilerleme ve kırılma tokluğu ölçümlerinin yapılması.....	37
Şekil 5.1. Brinell sertlik ölçüm sonuçları.	40
Şekil 5.2. Raylara ait SEM Mikroyapı görüntüleri (a) R260, (b) R260Mn ve (c)R350HT.....	41
Şekil 5.3. Raylara ait EDX görüntüleri (a) R260, (b) R260Mn ve (c) R350HT.	42
Şekil 5.4. Raylarda lameller arası mesafe ölçümü (a) R260, (b) R260Mn ve (c) R350HT.....	43
Şekil 5.5. Raylara ait kalıntı gerilme grafikleri (a) R260, (b) R260Mn ve (c) R350HT.	45
Şekil 5.6. XRD kalıntı gerilme grafikleri (a) R260, (b) R260Mn ve (c) R350HT..	48
Şekil 5.7. Yorulma çatlak ilerleme ön çatlak deneyi.	50
Şekil 5.8. Yorulma çatlak ilerleme hızı deneyi.	51
Şekil 5.9. Kırılma tokluğu analizi için raydan numune alınan kısım	51
Şekil 5.10. ASTM E399 standardına göre kırılma tokluğu analizi için numune boyutları.....	52
Şekil 5.11. Raylara ait kırılma tokluğu testleri (a) R260, (b) R260Mn ve (c) R350HT.....	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan rayların kimyasal kompozisyonları..	38
Çizelge 5.2. Ön çatlak oluşumu için kullanılan parametreler.	49

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

%	: Yüzde
/	: Bölme
Mm	: Milimetre
mg/l	: Miligram/litre
mm/s	: Milimetre/saniye
Bar	: Basınç birimi
M	: Metre
C	: Karbon
Mn	: Manganez
Si	: Silisyum
S	: Kükürt
P	: Fosfor
Al	: Alüminyum
Rm	: Çekme mukavemeti
Ra	: Akma mukavemeti
kN	: Kilonewton
MPa	: MegaPascal
GPa	: GigaPascal
CO	: Karbon monoksit
K	: Şiddet faktörü
MPa \sqrt{m}	: Gerilme şiddet faktörü birimi

KISALTMALAR

SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	: Elektron Difraksiyon Taraması
XRD	: X-ışını Difraktometresi
LOM	: Optik Mikroskop
OBM	: Alttan Oksijen ve Kireç Üfleme Prosesi
LD	: Linz-Donowiz
EN	: European Norm (Avrupa Standardı)
ISO	: International Organization Of Standardization
ASTM	: Amerika Malzeme Testleri Birliği
HB	: Brinell Sertlik
R	: Ray
RS	: Ray Yüzeyi
PPM	: Milyonda Bir
BOF	: Bazık Oksijen Fırını
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Demiryolu rayı, üzerindeki farklı ve değişken yükleri, üzerinde bulunduğu malzemeye ileten bir yapı elemanıdır. Tekerlerden gelen yükleri travers ve mesnetler üzerine dağıtan, yüksek performans beklentisi olan demiryolu sektörünün kritik bir elemanıdır. Raylarda yüksek performansın sağlanabilmesi için gerekli özellikler aşınma direnci, yorulma direnci, plastik deformasyon direnci, kalıntı gerilmeler ve kaynaklanabilirliktir.

Demiryolu sektörünün ana bileşenlerinden biri olan raylar, değişken ve tekrarlı yükler altında çalışması nedeniyle zamanla aşınma, yıpranma ve deformasyona uğrayarak çalışma ömrünü tamamlarlar ve değişim ihtiyacı duyarlar. Bu değişim sıklığının azaltılması için gerekli olan özelliklerden en önemlisi aşınma direncidir. Yüksek aşınma direnci, malzeme yüzeydeki sertlik ve metalürjik yapılarıdaki iyileştirmeler neticesinde elde edilir.

Bu çalışmada farklı kalitelere sahip olan (R260, R260Mn ve R350 HT) rayların, ısıl işlem ve kimyasal kompozisyona bağlı olarak kalıntı gerilme ve kırılma tokluğu performansları ilişkilendirilmiştir. Kalıntı gerilme ölçümleri hem EN 13674-1 standardına göre gerinim ölçer yöntemiyle hem de X ışını kırınımı yöntemiyle gerçekleştirilerek iki yöntemin sonuçlarının rayın mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir.

BÖLÜM 2

RAY ÜRETİM AŞAMALARI

Entegre bir demir çelik tesisinde ray üretim aşamaları şu şekilde sıralanabilir:

- Yüksek fırın
- Kükürt giderme
- Konverter
- Pota fırını
- Vakum gaz giderme
- Sürekli döküm
- Haddehane

2.1. YÜKSEK FIRIN

Yüksek fırınlar, demir cevherinin geçirdiği prosesler sonrası sıvı ham demire dönüştürüldüğü tesislerdir. Entegre demir çelik fabrikalarının ana üreticisi pozisyonunda olan bu tesiste demir cevheri, pelet, sinter gibi demirli malzemelerle, kireçtaşı, dolomit gibi cüruf yapıcı malzemelerin metalürjik kok ile ergitilmesiyle çelikhanenin ihtiyacı olan sıvı ham demir elde edilir [1].

2.1.1. Yüksek Fırınların Gelişimi

Yüksek fırınların boyutsal anlamdaki büyümesi 20. yy 'da gerçekleşmiştir. 20. yüzyılın başında hazne çapı 4-5 m ile sınırlı ve yıllık üretim 100.000 tondan öteye geçememekteydi. Bu yüzyılın sonunda ise en büyük yüksek fırın 14-15 m hazne çapına sahip ve yıllık üretimi de 3-4 milyon tonlara ulaşmaktaydı [2].

Şarj edilen malzemelerdeki gelişme ile sinter ve pelet üretimi sağlanmasıyla beraber yüksek kalitede üretim yapılmaya başlandı. Parça cevher, yeni teknik ve yöntemlerin gelişmesiyle %10-15 ve daha düşük oranlarda kullanıldı. Ayrıca kok ile beraber kullanılmaya başlanan indirgeyici malzemeler gelişmelere katkıda bulundu. 1960'larda gaz enjeksiyon, 1980'lerde de kömür enjeksiyon yaygın bir şekilde kullanıldı. Günümüzde, yaklaşık olarak geçmişte ihtiyaç duyulan kok miktarının %30-40'nın yerini kömür enjeksiyon yöntemi almıştır.

Yüksek fırınların büyüklükleri genel olarak hazne çaplarıyla karşılaştırılır. Fırın hacmi, iç hacim ve çalışma hacmi şeklinde ikiye ayrılır. Çalışma hacmi, fırının tüyer bölgesinden yükün tepe noktası arasında olacak şekilde tanımlanır.

Günümüzde çok büyük fırınlar günlük 12.000-13.000 ton değerlerinde üretim kapasitelerine sahiptir. Örneğin Oita yüksek fırını 15,6 m hazne çapıyla günlük 13.500 ton kapasiteye sahiptir. Avrupa'da bulunan Thyssen-Krupp Schwlgern fırını ise 14,9 m hazne çapıyla günlük 12.000 ton üretim yapabilmektedir.

2.1.2. Yüksek Fırın Prosesi

Çelik üretiminde iki farklı metot vardır, bunlardan birincisi yüksek fırın ve diğeri ise elektrik ark yöntemidir. Bu iki yöntemi birbirinden ayıran temel özellik kullanılan hammaddelerdir. Elektrik ark prosesinde hurda ergitme işlemi elektrik enerjisi ile gerçekleştirilirken yüksek fırın prosesinde kok kömürü redükleyici kaynak olarak kullanılarak, pelet ve parça cevherden çelik üretimi gerçekleştirilir. Yüksek fırınlar günümüzde öncelikli olan üretim şeklidir ve dünya çelik üretiminde %70 seviyesinde bir paya sahiptir [3].

Yüksek fırında üretilen ergimiş metal içinde bulunan kükürt, silisyum, manganez ve fosfor gibi elementler nihai çelikte istenmezler ve bunların giderilme işlemi çelikhane tesislerinde gerçekleştirilir. Ergimiş metaldeki bileşenlerin metalin kalitesine etkisi büyüktür. Genel olarak istenilen aralıklar:

- %0,3 – 0,7 silisyum
- %0,2 – 0,4 manganez
- %0,06 – 0,08 ya da %0,1 – 0,13 aralığında fosfor şeklindedir [1].

Bunun dışında çelikhanede gerçekleşecek olan işlemlerin daha kolay olması adına sıcaklığın mümkün olduğunca yüksek olması istenir.

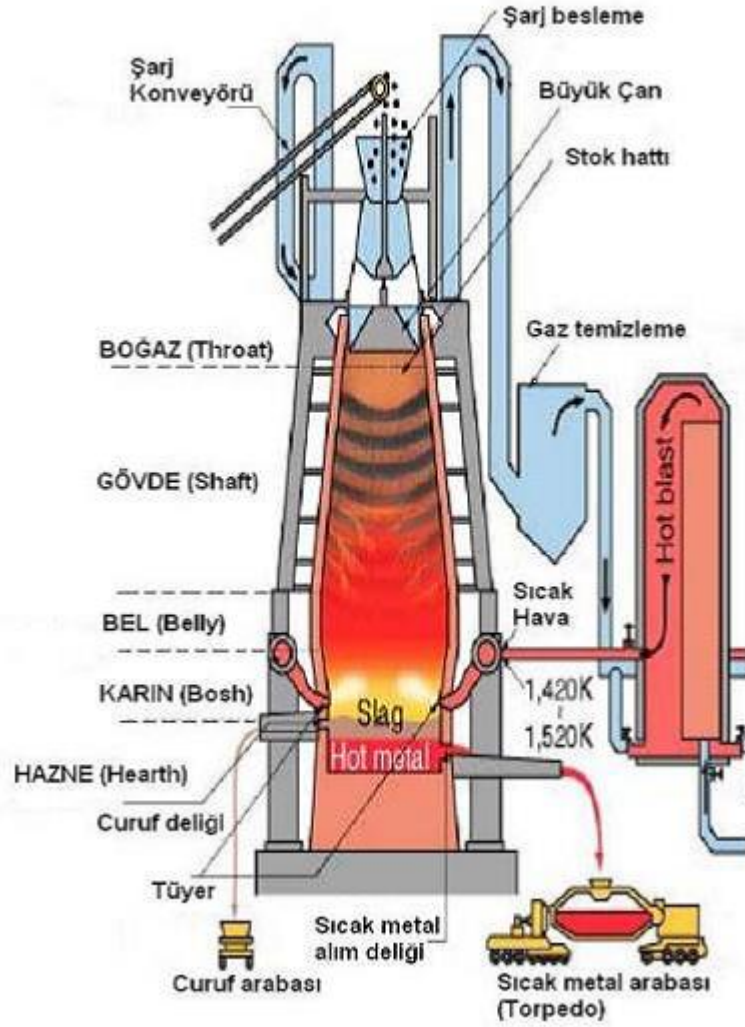
Yüksek fırın işlemlerinde demir cevheri ve redükleyiciler ergimiş metalin oluşumunu sağlar. Cüruf, demir cevherinin gang minerallerinden, kok ve kömür tozlarından meydana gelir. Ergimiş cüruf ve sıvı metal birbirleriyle karışmaz ve yoğunluk farkından dolayı cüruf üst tarafta kalacak şekilde metalin üzerinde yüzer. Döküm esasında ergimiş demir cüruftan ayrıştırılır.

Şekil 2.1.' de görüldüğü üzere yüksek fırınların yukarıdan aşağıya yapısı gösterilmektedir:

- Kok ve cevher katmanları,
- Yumuşama ve ergime bölgeleri,
- Sadece kok, sıvı demir ve cürufun bulunduğu aktif kok bölgesi
- Ölü adam (hazne bölgesindeki sabit kok desteği)

Yüksek fırın konik bir şekle sahiptir. Yüksek fırının kademeleri şu şekildedir;

- Boğaz (şarj yükünün üst seviyesi)
- Gövde (cevher ısıtıldığı ve redüksiyonun başladığı bölge)
- Bosh (redüksiyonun tamamlandığı ve ergimenin gerçekleştiği bölge)
- Hazne (ergimiş demirin biriktiği ve dökümün alındığı bölge)



Şekil 2.1. Yüksek fırın bölgeleri [1].

2.1.3. Yüksek Fırın Hareketi

- Yüksek fırın cevher ve kok yüklerinin oluşturduğu katmanlar şeklindedir.
- Sıcak hava tüyerlerden fırın içerisine üflenir. Düşük hacimli fırınlarda yaklaşık 12, yüksek hacimli fırınlarda yaklaşık 42 adet bakır malzemeden konik yapıda tüyer bulunmaktadır. Üflenen hava fırına verilmeden önce 1200 °C'ye kadar ısıtılmaktadır.
- Üflenen hava redükleyici gaz formunda parçalarına ayrılır. Bu proste yüksek fırın içerisine tüyerlerden üflenen hava içerisindeki oksijen karbon monoksit dönüşür. Açığa çıkan gaz 2100-2300°C alev sıcaklığına sahiptir. Tüyer önüne

düşen kok bu şekilde kullanılarak tüyer önünde boşluk oluşturarak fırın içerisinde hareket oluşmasını sağlar.

- Sıcak gaz fırın içerisinde yukarı doğru hareket ederek fırına önemli fonksiyonlar kazandırır.
- Kok ısıtması bosh ve karın bölgelerinde gerçekleşir.
- Demir cevherinin ergitilmesi fırın içerisinde boşluk oluşmasını sağlar.
- Kimyasal reaksiyonlar sayesinde cevherdeki oksijen formu giderilir.
- Eriyik yapının üstünde demir cevheri, sıcak metal ve cüruf üretir. Cüruf ve ergimiş metal, kok bölgesinden hazne bölgesine doğru hareket eder. Düşme bölgesinde ergimiş metal ve cüruf kok tüketerek fırın içerisinde boşluk oluşturur. Bu bölgedeki kok demir oksitin parçalanmasını sağlarken ergimiş metal içerisinde karbon çözünmesini de sağlar [4,5].

2.1.4. Yüksek Fırın Yapısı

Sobalar, yüksek fırına üflenen havanın 1000 ile 1250 °C'ye kadar ısıtıldığı bölümdür. Buradan çıkan sıcak hava, sıcak hava simidi ve devamında da tüyerlerden fırına üflenir. Sıcak hava kok ve enjekte edilen malzemeyle reaksiyona girer. Yüksek sıcaklıkta ve yüksek basınçla gönderilen hava tüyer önünde yanma bölgesi oluşturur. Şarj, yüksek fırına gönderilecek cevher ve kokun bulunduğu bölümdür. Gönderilecek olan şarj malzemesi önce elenir ve daha sonra tartılarak yüksek fırına ulaştırılır. Yüksek fırın şarjı otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Yüksek fırına şarj, tepeden ve skipler veya bant yardımı ile kok ve cevher ayrı katman olacak şekilde gönderilir. Gaz temizleme, yüksek fırından çıkan tepe gazının toplandığı bölümdür. Çıkan gaz birçok parça içerebilmektedir ve yeterince temiz bir gaz değildir. Bu sebeple bu gaz öncelikle toz toplama ardından da yıkama sistemine tabii tutulur [6,7].

Döküm holü, ergimiş metalin ve cürufun döküm deliğinden alındığı yüksek fırın bölümüdür [8].

Cüruf granüle, döküm sonrası ayrılan cürufun su ile hızlı soğutma uygulanarak granüle hale getirildiği bölümdür.

2.3. KÜKÜRT GİDERME

Yüksek fırın prosesleri tamamlandıktan sonra, istenmeyen kükürt elementinin sıvı çelikten uzaklaştırılması gerekmektedir. Kükürt, tane sınırlarında birikme eğilimi sergileyerek mukavemet düşüklüğüne sebep olur, sünekliği ve kaynaklanabilirliği düşürür, düşük manganlı çeliklerde sıcak yırtılmaya sebebiyet verebilir, mekanik özellikler üzerine olumsuz etkiye sahiptir ve haddelenebilirliği olumsuz yönde etkiler. Bu sebeple sürekli döküm tesisine ulaşmadan önce sıvı madenden uzaklaştırılması gereklidir. Bu işlem kükürt giderme tesisinde gerçekleştirilir [9].

İşletmelere göre değişiklik göstermekle beraber, yüksek fırın ile çelikhane arasında sıvı maden transferi sıvı maden potaları veya torpido adı verilen ve içerisinde çeşitli kapasitelerde sıvı maden taşıyan transfer araçlarıyla taşınır. Torpido veya şarj potaları kükürt giderme tesisine ulaştığında, sıvı madene azot gazıyla beraber mikronize kireç ve magnezyum verilir. Kireç ve magnezyum, sıvı madendeki kükürt ile reaksiyon oluşturarak cüruf oluşturur. Sonrasında içerisinde kükürt bulunan cüruf sıvı olarak sıvı madenden uzaklaştırılır [10-13].

Kükürt giderme tesisi, çelikhane ve yüksek fırınlar arasında yer aldığı için trafik olarak kritik bir pozisyonadadır ve sıvı maden hareketliliğini en verimli şekilde kontrol edebilmek adına en kısa sürede işlemlerini tamamlamak durumundadır. Bu nedenle granüle magnezyum ana kükürt giderme elemanı olarak kullanılır. Verilecek granüle magnezyum oranı giderilmesi beklenen kükürt miktarına göre farklılık göstermektedir. İşlemi tamamlanan sıvı maden sıradaki istasyon olan çelikhane tesislerine gönderilir.

2.4. KONVERTER

Çelik, yüksek fırında üretilerek çelikhaneye gönderilen sıvı madenin içerisinde yüksek oranda bulunan karbon, silisyum, mangan, fosfor ve kükürt elementlerinin çelikhanedeki prosesi ile istenilen değerlere düşürülmesi ve standartlarda belirtilen değerlerde çelik elde etmek için alaşım malzemeleri ilave edilerek üretilmektedir.

2.4.1. Çelik Üretim Yöntemleri ve Tarihi

Çelik sektöründe seri üretim 1856'da İngiliz Herry Bessemer'in ocağı ile başlamaktadır. 1864'te Siemens Martin, 1876'da ise Thomas Konverterleri ile çelik üreilmeye devam edilmiştir [14].

1856 yılında İngiliz Henry Bessemer tarafından konverter usulü ile çelik üretimi keşfedildikten sonra üretim artmaya başlamıştır. 1876'da İngiliz Sidney G. Thomas ve Percy C. Gilchrist tarafından bazik Bessemer (Thomas) usulü bulunmuş ve bu sahada en önemli adım atılmıştır. Bu keşifler sayesinde 1870 yılında dünya çelik üretim miktarı 500,000 ton civarında iken, 1880'de 4.000.000 tona, 1900 yılında 28.000.000 tona yükselmiştir. Ancak, 1860'larda de ilk kez uygulanan Siemens-Martin metodu, 20.yüzyılın başlarından itibaren 1970 yılına kadar dünyada en çok çelik üretilen metot olarak yerini korumuştur.

Avrupa demir cevherlerinin çoğunda, yüksek oranlarda (P) bulunduğundan, Avrupa'da Bazik Bessemer metodu (Thomas), Amerika'da ise bunun aksine asidik Bessemer metodu daha fazla kullanılmıştır. Bazik Bessemer metoduna, bu metodu keşfeden şahsın ismine izafeten "Thomas Metodu" denilmektedir. Hava üfleyerek çalışan Bessemer metodu zamanla tamamen terk edilmiştir. Bunun yerini 1952 yılında Avusturya'da "Linz" ve "Donawitz" işletmelerinde çalışmaya başlayan "LD-Oksijen Konverter" veya "Bazik Oksijen Konverter metodu" almış bulunmaktadır. Bu metoda Linz ve Donawitz İşletmelerinin ilk harflerine izafeten "L-D" metodu denilmektedir. L-D metodu ile elde edilen çelik niteliği daha üstündür. İlk yatırım masrafları, Siemens-Martin metoduna nazaran daha yüksektir, çelik üretim masrafları ise daha düşüktür. Bu itibarla, LD metodu, bugün çelik üretiminde en çok tercih edilen ve devamlı gelişen bir metot olmuştur ve günümüzde çelik üretiminde %70 oranında bir paya sahiptir [15,16].

20. yüzyılın başlarında tecrübeleri yapılan elektrik ile çelik üretme metotları zamanla gelişmiş ve özellikle yatırım masraflarının SM-Ocaklarına nazaran %40-50 daha düşük olması nedeniyle elektrik enerjisinin ucuz olduğu ülkelerde büyük ölçüde kullanılmaya başlanmıştır [15].

1970 yılında 597 milyon ton olan dünya çelik üretiminin;

- 23 milyon tonu Thomas,
- 237 milyon tonu LD-Konverterleri,
- 228 milyon tonu SM-ocakları
- 85 milyon tonu elektrik ark ocakları usulü ile üretilmiştir.

1884'te elektrikten istifade yoluna gidilmiş ve 1910 yılından sonra da elektrik ark ocaklarının devreye girmesiyle, 1920'de dünya çelik üretimi 80 milyon tona ulaşmıştır.

Prensipieri aynı olmakla beraber farklı çelik üretim metotları vardır. Bunların en çok kullanılanları;

- Bessemer metodu
- Thomas metodu
- Siemens-Martin metodu
- Elektrik ile çelik üretme metotları
- Oksijen konverteri (LD) metodudur.

2.4.2. LD Konverter Metodu

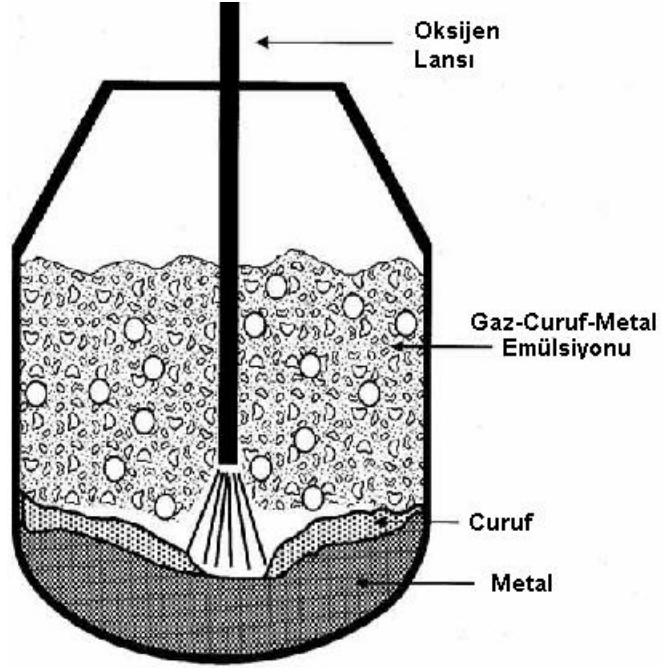
Temiz ve yüksek nitelikli bir ray çeliği üretebilmek için en uygun yöntemlerden biri LD Konverter Metodudur. Konverter olarak tabir edilen ocaklarda sıvı halindeki madenin üzerinde %99,5- %99,8 saflıkta oksijen üflemesi ile karbon oranı yaklaşık %4 seviyelerinden %0,1 değerinin altına düşürülür. Sıvı maden içindeki karbon, mangan, silisyum ve fosforun oksitlenmesi ile oluşan ısı, çeliğin sıcaklığını yükseltir, oksijen üflenmesi anında yüksek sıcaklık oluşumunu önlemek için hurda gibi soğutucu özelliği olan malzeme ve/veya hurdaya ilave olarak kireçtaşı, demir cevheri gibi malzemeler sıcaklık kontrolü maksadıyla konvertere şarj edilir. Şarj malzemelerinde %30 oranına kadar hurda kullanılmasına imkân veren bu metot, özellikle yüksek oranda sıvı maden ile çalışılan yerlerde büyük önem kazanmıştır [17].

Bu prosesin dünya genelinde çok hızlı yayılmasındaki en önemli etkenlerden bazıları;

- Birim zamanda üretilen çelik miktarı diğer proseslerle mukayese edilemeyecek kadar yüksektir.
- Büyük tonajlarda tesisler kurulması mümkündür.
- Refrakter sarfiyatı daha düşüktür.
- Çelik üretim maliyeti diğer proseslerle mukayese edilemeyecek kadar düşüktür.
- Çalışan personel sayısı daha düşüktür veya kişi başına göre üretim miktarı oldukça fazladır.
- Üretilen çelik kalitesi daha yüksektir.
- Ancak tesis yatırım maliyetleri diğer proseslere oranla daha yüksektir.

2.4.3. Konverterin Yapısı

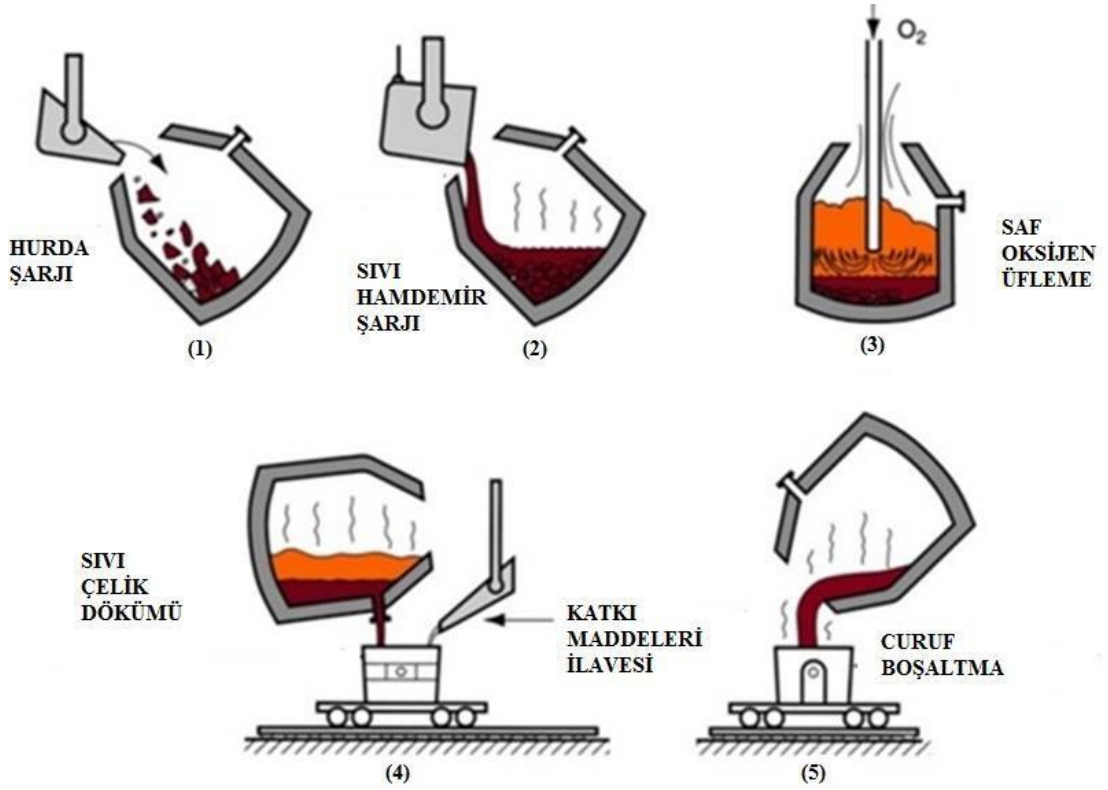
- BOF konverter çelik zırh içerisine örülmüş refrakterden oluşmaktadır. Konverter şematik gösterimi şekil 2.2.' de belirtildiği gibidir.
- BOF konverter trunnion ring üzerine monte edilmiştir ve trunnion ring motor şanzıman grubu ile döndürülmektedir.
- 360° döndürülmesi ile hurda şarjı, sıvı maden şarjı, sıcaklık ölçme, numune alma ve döküm dökülmesi sağlanmaktadır.
- BOF konverterleri su soğutmalı oksijen üfleme lansları ve su soğutmalı atık gazları toplama sistemleri teçhiz edilmiştir.
- BOF konverterleri ile çelik üretilmesi esnasında harici bir yakıt kullanılmamaktadır. Sıvı maden içerisinde bulunan karbon, silisyum ve mangan gibi elementler oksijenle reaksiyona girerek çeliğin sıcaklığının yükselmesini sağlar



Şekil 2.2. Konverter şematik gösterimi [14].

- Oksijen üfleme lans sistemi konverterlerin ana ekipmanlarından.
- Her konverter üretimin sürekliliği açısından birbirinden bağımsız 2 adet lans ile teçhiz edilmiştir ve lanslar su soğutmalıdır.
- Lansların her türlü hareket ve kontrolü ana kumanda masasında bulunan bilgisayar ile kontrol edilmektedir.
- Konvertere hurda ve sıvı maden şarjı yapıldıktan sonra konverter dik konuma getirilir.
- Üfleme işlemi için gerekli toplam oksijen miktarı, lans üfleme yükseklikleri, anlık üflenecek debi miktarı ve her stepte üflenecek oksijen oranları bilgisayarda ayarlandıktan sonra üfleme işlemi bilgisayardan başlatılır.
- İstenen miktarda oksijen üflendikten sonra üfleme işlemi sonlandırılır ve lans park konumuna çıkar.

2.4. KONVERTER PROSESİ



Şekil 2.3. Konverter prosesi [18].

Şekil 2.3' te belirtildiği gibi, konverterde sıvı madenin çeliğe dönüşmesi aşamalarında yapılan işlemler şu şekildedir:

- Kükürtü giderilmiş sıvı maden konvertere şarj için hazır hale gelmiş olur.
- Konvertere sıvı maden şarj edilmeden önce, hurdalar şarj vinçler vasıtasıyla konvertere şarj edilir.
- Hurda şarjı bittikten sonra sıvı maden konvertere alınır.
- Hurda ve sıvı maden şarj miktarı, yüksek fırın madeninin silisyum (Si) değeri ve sıcaklığına bağlı olarak %15-25 hurda ve %75-85 sıvı maden arasında değişir.
- Fırın 45° lik açıyla hurda ve sıvı madeni aldıktan sonra ileri ve geri yatırılarak hurda ve sıvı maden karışımı sağlanır.
- Daha sonra fırın dik konuma alınarak üfleme için hazır hale getirilir.

- Bu safhada konverterlerde (BOF) çelik üretim prosesinin ana girdisi olan saf oksijen gazı sıvı maden ve hurdadan oluşan banyoya üflenmeye başlanır
- Üfleme süresince oksijen yüzdesine bağlı olarak lans kademe kademe banyoya yaklaşır.
- Üfleme sonunda baca gazı içerisindeki karbon monoksit gazının azalmasıyla banyodaki karbon miktarının çok düşük seviyelere geldiği anlaşılabilir üfleme sonlandırılır.
- Üfleme başından sonuna kadar baca içerisindeki gazın kimyasal bileşimi takip edilir; üfleme sırasında açığa çıkan konverter gazı içerisindeki karbon monoksit (CO) miktarı zenginleşince karbon monoksit (CO) bakımından zengin olan konverter gazını gas holder (gaz tankı)'na yönlendirir ve üfleme sonunda konverter gazı içerisindeki karbon monoksit (CO) oranı %35'in altına düştüğü zaman sistem otomatik olarak gazı yakma bacasına yönlendirir.
- Üfleme anında flaks malzemeleri de şarj edilir, üfleme tamamlandıktan sonra konverter yatırılarak sıcaklık ölçümü yapılır ve numune alınır. Numune sonucu hızlı bir şekilde teyit edilir ve artık sıvı maden, sıvı çeliğe dönüşmüştür.
- Sıvı çelik potasına döküm boşaltılır ve nihai analizin ve sıcaklığın ayarlanması için pota fırını tesislerine gönderilir.
- Konverter içinde kalan cüruf boşaltılır, sıradaki döküme başlanmadan önce konverterin içi kontrol edilir. Eğer herhangi bir sorun ile karşılaşılmamış ise tekrardan hurda şarj alınarak sıradaki döküme başlanır [18-23]

2.5. POTA FIRINI

Konverterden sonraki istasyon pota fırınıdır. Buradaki temel amaç temiz çelik üretimidir. Konverterdeki işlemler sonrasında sıvı çeliğe deoksidasyon işlemleri uygulanmalı, sıcaklık ve kimyasal analiz hedef döküm kalitesine göre uygun hale getirilmelidir. Entegre tesisin bütünlüğünün ve sürekliliğinin korunması için bu işlemler belirli bir süre içinde gerçekleştirilir [23,24].

Konverterde işlemi biten sıvı çelik potaya aktarılır. Vinçler vasıtasıyla alınarak pota fırınlarının transfer arabasına yerleştirilir ve ilk olarak alttan karıştırma sistemi bağlanır. Potanın alt kısmında gaz üfleme konisi vardır. Buraya argon gazı bağlanır ve homojenizasyonu gerçekleştirme adına gaz ile karıştırma başlatılır. Argon asal gaz olduğu için herhangi bir tepkimeye girmez [25].

Transfer arabasına yerleştirilip alttan karıştırma için bağlantısı yapılan pota sonrasında gövdenin altına alınır. Yaklaşık 3 dakikalık bir karıştırmanın ardından, mevcut analizinin netleştirilmesi adına sıvı çelikten numune alınır ve laboratuvara gönderilir. Çok hızlı bir şekilde analiz belirlenir ve hedefteki kimyasal ayarlayabilmek adına gerekli alaşım elementleri ilave edilir.

Kimyasal kompozisyon kadar önemli olan bir diğer durum ise hedef döküm kalitesinin sıcaklığıdır. Sıvı çeliğin, içerisinde bulunan elementlerin miktarına göre farklı döküm sıcaklıkları vardır. Pota fırınında sıvı çeliğin sıcaklığı, tesis şartları göz önüne alınarak çelik kalitesine uygun sıcaklığa çıkartılır. Bunu gerçekleştirmek için elektrik enerjisi kullanan grafit elektrotlar kullanılır. Grafit elektrot sarf malzemedir ve pota fırınının trafosunun kendisine sağladığı enerji sayesinde çalışır. Elektrotlar sıvı çeliğe daldırılır ve verilen enerji ile birlikte ark yaparak ısı açığa çıkartır ve çeliğin sıcaklığı yükselir [26].

Yapılan işlemler sonrası potadan sıcaklık ölçümü yapılır ve sıvı çelikten numune alınır. Numune sonucundaki kimyasal analiz ve sıcaklık ölçümü hedef döküm kalitesine uygunsa pota ray üretiminin sıradaki istasyonu olan vakum gaz giderme tesisine gönderilir.

Pota Fırını Ana Bileşenleri:

2.5.1. Trafo

Pota fırınının en önemli ekipmanıdır ve pota fırınına sıvı çeliği ark yöntemiyle ısıtmak için gerekli olan enerjiyi sağlar.

2.5.2. Elektrot Kolları ve Elektrot Tutucuları

Grafit elektrotlar enerjiyi sıvı çeliğe ark yoluyla iletmektedir. Bu sebeple ekipmanlar arasında elektrot kolları ve elektrot tutucuları bulunur. Elektrot tutucuları su soğutmalı bakırdan imal edilirler. Bakır olmasının sebebi yüksek elektrik iletkenliğidir.

Grafit elektrot: Grafit elektrotlar potaya elektriği ileterek ark oluşumunu sağlayan yüksek karbonlu yapılardır. Sarf malzemedir, proses gereği zamanla azalmaktadır ve bir süre sonra ekleme yapma gereği duyulmaktadır.

2.5.3. Pota Fırını Gövdesi

Gövde su soğutmalı yapıdadır ve hidrolik sistemler vasıtasıyla aşağı yukarı hareketini gerçekleştirir. Gövde üzerinde;

- Gözetle kapağı,
- Tel besleme yuvası,
- Alyaj malzemeleri ilave oluğu,
- Elektrotların bulunduğu merkez boşluğu,
- Toz ve gaz emme borusu bulunur.

Çeliğin ısıtılması esnasında kayıpların gövde sayesinde minimuma indirilmesi hedeflenir. Ayrıca çevreye toz yayılmasını önlemek amacıyla ark esnasında gövde en alt pozisyonda olmalıdır.

2.5.4. Transfer Arabaları

Konverter tarafında işlemleri biten sıvı çelik potası, pota fırınının transfer arabasına yerleştirilir. Potanın gövdenin altına getirilmesi ve gövde altındaki işlemler bittikten sonra tekrar kenara alınması amacıyla kullanılır. Transfer arabalarında gaz üfleme konisine bağlanan asal gaz için bağlantı ekipmanları yer alır.

2.5.5. Alyaj Besleme Sistemi

Sıvı çeliğin hassas analizinin ayarlandığı istasyon pota fırınıdır. Nihai kimyasal analiz ayarlanabilmesi için ferro alyaj ve kireç gibi malzemelerin potaya kontrollü bir şekilde verilmesi gereklidir. Bunun için bir şarj sistemi vardır ve şarj sistemi;

- Alaşım silosu
- Vibro besleyici
- Tartım silosu
- Konveyör bant gibi ekipmanlardan oluşur.

2.5.6. Tel Besleme Sistemi

İhtiyaç duyulduğu takdirde hassas alaşımlama homojen besleme için bazı elementler tel besleme sistemi vasıtasıyla sıvı çeliğe ilave edilir. Normal koşullarda çelikte istenmeyen elementlerden biri olan kükürt, özellikle mekanik işlenebilirlik için bazı durumlarda çelikte özellikle istenir. Düşük ppm değerine sahip bir şekilde pota fırınına gelen sıvı çelikteki kükürt oranı, özel kükürt tel beslemesi sayesinde kontrollü olarak beslenebilir. Bunun dışında kalsiyum ve alüminyum teller de tel besleme sistemi vasıtasıyla eklenebilen elementler arasındadır.

2.5.7. Toz Toplama Sistemi

Pota fırınında elektrotlar ile ark işlemi sırasında oluşan toz ve gazların toplanması ve filtre edilmesi amacıyla bulunan tesislerdir.

2.6. VAKUM GAZ GİDERME

Pota fırınlarında işlemleri biten pota sıradaki istasyon olan vakum gaz giderme tesisine gelir. Burada amaç oksijen, hidrojen ve azotun ortamdan uzaklaştırılmasıdır. Kaliteli ray üretimi sıvı çelikteki hidrojen değeri 2 ppm'in altında olmalıdır. Bu sayede birikinti ve gaz boşluğu oluşmaz, malzemenin mukavemeti artar.

Vakum gaz giderme işleminde prosesler tamamlandıktan sonra sıvı çelik potası sürekli döküm tesisine gönderilir.

2.7. SÜREKLİ DÖKÜM

2.7.1 Sürekli Dökümün Tarihi

Metallerin döküm şekli ile katılaşması insanoğlu için yeni bir çağın başlangıcı, medeniyetin yeniden şekillendirilebilmesi için büyük bir fırsat olmuştur. İnsanlar sıvı çeliğin gerek silah gerek süs eşyasına dönüşümü sırasında büyük heyecan yaşamışlardır. 1900 yıllarında ingot döküm yüksek maliyetleri de beraberinde getirmekteydi, ancak zamanın şartları ve teknolojisi, daha fazlası için henüz hazır değildi. İlk sürekli döküm patenti 1800'lü yılların ortalarına kadar uzansa da endüstriyel hale gelmesi için hala zamana ihtiyaç duyuyordu. İlerleyen zamanlarda 1933-1937 yılları arasında ilk bakır ve alüminyum alaşımlı çeliklerin dökümü yapıldı, 1940-1946 yılları arasında Almanya ve Amerika'daki gelişmeleri düşey ve dikey kalıp teknolojilerinde gelişmeler oldu, 1954 yılında ilk dikey slab döküm makinesi döküme başladı, 1963 yılında ise ilk eğimli kalıp kullanılmaya başlandı. 1960'lı yılların sonunda doğru bazik oksijen fırınlarındaki gelişmeler sayesinde sürekli döküm, artık ingot dökümün yerini almaya başlamıştır. Bu durum Amerika'da, diğer ülkelere göre biraz daha gecikmeli gerçekleşmiştir. Bunun sebebi ise ülkede hali hazırda bulun ingot tesisleri idi. Ancak 1870 yıllarında sürekli dökümün çelik üretimindeki payı %4 civarında iken günümüzde %90 seviyelerindedir [27].

Sürekli döküm, ilk yatırım maliyeti yüksek olmasına karşın işletme maliyetleri açısından ingot döküme göre oldukça avantajlıdır. Daha fazla üretim, daha yüksek verim, daha kaliteli üretim diğer avantajlardan bir bazılarıdır. Zamanla farklı kesitlerde üretimler yapılmış olup, kütük, slab, bloom, beam blank bunlardan en bilinenleridir.

Yarı mamul olarak adlandırılan malzemeler, sürekli döküm yöntemiyle çok farklı kesit ve ölçülerde üretilebilirler, bu da nihai mamule erişebilmek için daha az sarfiyat anlamına gelmektedir.

2.7.2 Sürekli Döküm Prosesi ve Ana Bileşenleri

2.7.2.1. Pota Vinçleri

Çelikhanede işlemlerine başlamış olan sıvı maden, bazik oksijen fırını, pota fırını ve vakum gaz giderme tesislerinden sonra sürekli döküm makinelerine yüksek tonajlı vinçlerle taşınır. İçerisinde belirli miktarda sıvı çelik olan potalar, sürekli döküm makinesinin taretine yerleştirilir.

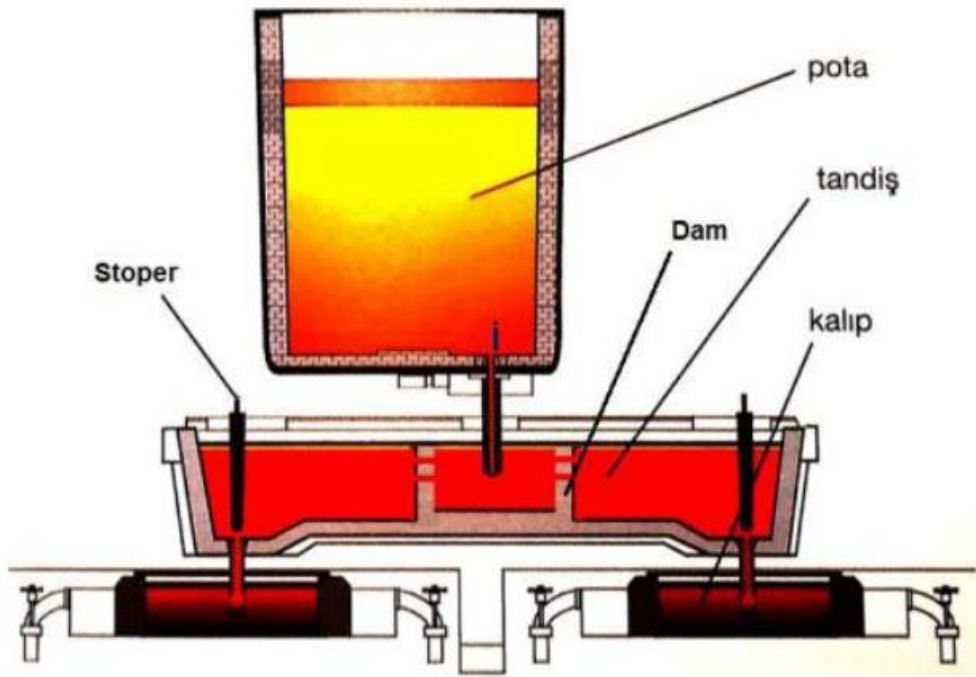
2.7.2.2. Pota

Çelikhane içerisinde pota, sıvı çeliği istenen kimyasal analiz ve sıcaklık ayarlamaları sonrasında sürekli döküm makinesine vinçler vasıtasıyla transfer edebilmek için kullanılır. Sürekli döküm makinesine ulaşan pota, tarete yerleştirilir. Pota içerisindeki sıvı çelik, potanın altındaki nozul adı verilen delikten sürgü kontrol mekanizmaları sayesinde tandişe akar

2.7.2.3. Pota Tareti

Sürekli döküm prosesinde taret, prosesin sürekliliğindeki en önemli yapılardan biridir. Taretler, elektrik veya hava motorlarıyla 360 derece dönerek potaları tandiş üzerine konumlandırılır. Döküme başlamadan önce içerisinde sıvı çelik olan pota vinçler vasıtasıyla taretin iki kolundan birine yerleştirilir. Taretin bir bileşeni olan ve potanın sürgüsünü kontrol edecek olan hidrolik sürgü pistonu potaya bağlanır. Bu şekilde potadan ne kadar sıvı çelik akacağına kontrolü bu hidrolik piston ile sağlanır. Sonrasında taret 180 derece döndürülerek tandişin üzerine gelir. Sıvı çeliğin etrafa sıçramadan direk tandişin içine sağlıklı bir şekilde akması için potanın altında pota refrakter tüpü bağlanır. Kapalı olarak buraya kadar gelen pota sürgüsü, kendisine bağlanan piston ile kontrollü bir şekilde açılır ve sıvı çelik tandişe dolmaya

başlar. Potadaki sıvı çelik bitmeden, sıradaki pota taretin diğer boş olan koluna yerleştirilir ve sürgü pistonu bağlanarak döküme geçmeye hazır hale getirilir. Dökülen potadaki sıvı çelik bittikten sonra sürgü kapatılır, taret 180 derece çevrilerek boş pota arkaya, dolu pota döküm konumuna gelerek, dökümün sürekliliği sağlanır. Sonrasında boş pota vinçler vasıtasıyla taretten alınarak, pota hazırlama tesisine gönderilir. Burada pota tabanındaki kalıntılar temizlenerek, tekrar içerisine sıvı çelik alabilmek için servise verilir [27].



Şekil 2.4. Potadan tandişe döküm [28].

2.7.2.4. Tandiş ve Tandiş Kontrol

Tandişler potadan, içerisine sıvı çelik dökülen, akışı homojenize ederek tabanındaki nozul adı verilen deliklerden sıvı çeliği kalıplara yönlendiren geniş kaplardır. Akışın homojen olması yarı mamul kalitesi açısından önem arz etmektedir. Yüksek sıcaklıklara dayanıklı refrakter ile kaplıdır. Bu sayede uzun süre sıvı çelik ile temasa dayanabilirler. Tandişin ana görevi, sürekli bir şekilde sıvı çeliğin kalıplara iletiminin sağlanmasıdır. Örneğin dökümdeki sıvı çelik potası boşaldıktan sonra, taret diğer dolu potayı döküm konumuna getirmek için hareketine başlar. Bu esnada tandiş

içerisindeki sıvı çelik kalıplara akmaya devam eder. Sıvı çelik bitmeden diğer dolu pota açılır ve dökümün sürekliliği bu şekilde devam ettirilir [28,29].

Tandişler içerisindeki refrakter yapılarına göre döküme girmeden önce belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmaları gereklidir. Bu sıcaklıklar 1000-1200 derece arasındadır. Yine kullanılan refrakter tipine göre eğer tandiş yeterli miktarda ısıtılmamış ise döküm başlangıcında sıvı çeliğin kendinden daha soğuk yüzeye temas etmesi sonucu yoğun ısı kaybı yaşanır. Sonrasında sıvı çeliğin akışkanlığını kaybedecek kadar ısı kaybetmesi sonucu döküm istenmeyen bir şekilde sonlanabilir.

Uygun sıcaklığa kadar ısıtılmış bir tandiş döküme başladıktan belirli bir süre sonra güvenlik ve kalite açısından değiştirilerek, tekrar hazırlanmak üzere ilgili birime gönderilir. Döküm sonrası içinde kalan cüruf vs. temizlenir, sonrasında tekrar döküme girmesi için gerekli hazırlıkları yapılır.

2.7.2.5. Çelik Akışı

Sıvı çeliği tandiştan kalıba yönlendirerek çeşitli akış kontrol mekanizmaları vardır. Rayların yarı mamulleri üst düzey çelik temizliği gerektirdiğinden kapalı döküm şekli ile dökülürler. Kapalı dökümde temel amaç sıvı çeliğin hava ile temasının kesilmesidir. Sıvı çelik potada iken üzeri özel pota örtü tozları ile örtülerek sürekli döküm makinesine geldikten sonra, tandişte de üzeri örtü tozları ile kapatılarak hava ile teması kesilir.

Kapalı döküm tandişlerinde akış kontrolünü sağlayan elemanlardan birisi stoperdir. Stoperler refrakter malzemelerden yapılmışlardır ve otomasyon kontrollü mekanik bir mekanizmaya bağlıdır. Nozul adı verilen ve sıvı çeliğin içinden geçtiği delikleri kapatan stoperler, istenilen miktarda sıvı çeliğin akışını sağlamak için yukarı aşağı hareket ederek akışı daima kontrol altında tutar.

2.7.2.6. Kalıp ve Kalıp Seviye Kontrolü

Sıvı çelik, tandiştten bakır kalıplara geldikten sonra ilk katılma burada gerçekleşir. Kalıplar her daim belirli bir basınca ve debiye sahip olan özel kapalı devre su sistemiyle soğutulmaktadır. Su, devir daim halindedir ve kesintisiz bir şekilde kalıbı soğutmaktadır. Kalıplar 80cm, 100cm gibi çeşitli uzunluklara sahiptir. Sıvı çelik, bakır kalıplara teması süresince ısı transferi gerçekleşir ve ilk kabuk oluşumu ve katılma başlar. Kalıp terk edildikten sonra yaklaşık 20 mm kabuk oluşumu gerçekleşir. Yeterince kalın kabuk oluşturulamadığı durumlarda, kabuk içerisindeki ferromatik basınca dayanamayıp delinebilir. Bu durum kanama olarak adlandırılır ve bu sebepten sağlıklı bir kabuk oluşumu çok önemlidir [30].

Kalıp içerisindeki sıvı çelik her zaman kontrol edilen bir seviyede olmalıdır. Seviyeyi kontrol eden 3 temel bileşen vardır. Bunlar:

- Kalıp seviye detektörü
- Stoper Mekanizması,
- Çekme doğrultma ünitesidir.

Kalıp seviye detektörü sürekli bir şekilde, anlık olarak kalıbın doluluk seviyesini ölçer ve makinenin ana otomasyon sistemleriyle entegre çalışır.

Çekme doğrultma ünitesi, hattın bir sonraki kısmında olan ve henüz katılmış olan yarı mamule alttan ve üstten motorlu röleler yardımıyla baskı uygulayıp hareketini sağlayan kısımdır. Makinenin otomasyon sistemine verilen komut ile hızı kontrol edilir.

İstenilen kalıp seviyesi ve döküm hızı belirlenir ve makinenin sistemine girilir. Bu noktadan sonra stoper mekanizması, tandişt seviyesindeki ferromatik basınca göre sabit hızda yapılan üretimde, kalıp seviyesini hep aynı yerde tutmak için yukarı veya aşağı hareket ederek sıvı çelik akışını kontrol eder. Kalıp seviyesinde dalgalanma olmaması çelik kalitesi açısından çok önemli olduğundan özellikle stoper mekanizmalarının ve kalıp seviye detektörlerinin hassasiyetleri çok yüksek olmalıdır.

2.7.2.7. Osilasyon / Kalıp Yağı / Döküm Tozu

Sıvı çelik kalıp içerisinde katılaşmaya başladığı andan itibaren çekilme başlar. Bu durum, sıvı çelik henüz kalıptan çıkmadan çelik ve kalıp arasında süreksizlik oluşmasına sebep olur. Süreksizlik ısı transferini olumsuz etkiler ve istenilen seviyede katı kabuk oluşumu sağlanamaz. Bunun önüne geçebilmek için çelik ve kalıp arasındaki boşluğu dolduracak olan özel kalıp yağı veya döküm tozu kullanılır. Ray üretim prosesinin yarı mamulünün üretimi kapalı döküm yöntemiyle olduğu için döküm tozu kullanılır. Kalıp üzerine belirli aralıklarla ve belirli miktarda beslenen kalıp tozu, çeliğin yüzeyinden kalıbın kenarlarına doğru yönelirler. Sonrasında kalıptan aşağı yönelerek çelik ve bakır kalıp arasında ısı transferi sürekliliğini sağlarlar. Bu şekilde sağlıklı bir kabuk oluşumu gerçekleşmiş olur.

Kalıpların üzerinde bulunduğu özel mekanik yapılar sayesinde, belirli oranlarda yukarı/aşağı hareketi sergilerler. Bu durum osilasyon hareketidir. Bu hareketin mesafesi ve frekansı ayarlanabilir. Osilasyon hareketi kullanılan döküm tozunun veya kalıp yağının bakır tüp ve çelik arasına daha girmesini kolaylaştırır. Görevlerinden bir diğeri ise sıvı çeliğin kalıba yapışmasının önüne geçmektir. Osilasyon üniteleri mekanik veya hidrolik kontrollü olabilirler [31,32].

2.7.2.8. Birincil Soğutma

Birincil soğutma sıvı çeliğin bakır kalıp ile gerçekleştirdiği ısı transferi sonucu olan soğutmadır. Proseste ilk ve en önemli soğutma işlemidir. Soğumanın yeterince gerçekleşmediği durumlarda, kalıbın terk edildiği anda eğer kabuk kalınlığı zayıf ise ferostatik basınç kabuğu zayıflatıp delebilir. Bu durum delinen nokta seviyesi üzerindeki sıvı çeliğin kontrolsüz bir biçimde makinenin parçaları üzerine akması anlamına gelmektedir ve kanama olarak adlandırılır [33,34].

Ancak kabuk kalınlığını kesin ve net bir şekilde sağlam yapmak amacıyla birincil soğutmada aşırı soğutma da yapılmamalıdır, aksi takdirde çeşitli kalite bozuklukları meydana gelebilir.

2.7.2.9. İkincil Soğutma

Sıvı çelik bakır kalıptan çıktıktan sonra, sağlıklı bir kalınlıkta kabuk oluşumunu tamamlamıştır ancak hala içerisinde sıvı olan kısımlar bulunmaktadır. Katılaşmanın devam etmesi için kalıp çıkışından itibaren belirli bir noktaya kadar, katılaşması devam eden çeliğe sprey suyu verilir. Uygulanan sprey suyunun basıncı, debisi ve temizliği önemlidir ve sürekli bu parametreler kontrol altında tutulmalıdır. Kontrolsüz ve istenen parametrelerin dışından uygulanan sprey suyu yarı mamulde çeşitli kalite bozukluklarına yol açar [35,36].

2.7.2.10. Kesme ve Transfer

Çekme doğrultma ünitesine giriş yapan ve artık katılaşmasını tamamlamış olan yarı mamulün bu noktadan sonra kesilerek belirli boylara bölünmesi gereklidir. Üretimi planlanan rayın boyuna göre, yarı mamule kesim işlemi uygulanır. Çekme doğrultma ünitesi sonrasında yer alan torçlar bu kesim işlemi gerçekleştirirler. İstenilen boy makinenin otomasyon sistemleri ile takip edilerek uygun yerden itibaren işlem başlatılır.

Kesme yöntemlerinden biri olan alevli kesme işleminde oksijen ve doğal gaz kullanılır. Malzemenin yüzeyi önce düşük basınçta uygulanan oksijen ve doğal gaz ile tavlama işlemi sonrasında basınçlar otomatik olarak artarak malzeme kesilir ve transfer röleleri yardımıyla malzeme deşarj hattına doğru yönelir.

Hat boyunca ilerleyen malzeme zamanla soğur ve artık haddelenmek üzere bir sonraki tesise gönderilir.

2.8. HADDELEME

Sürekli döküm prosesleri tamamlandıktan sonra yarı mamul oluşumu tamamlanmış, sıra haddeleme işlemine gelmiştir. Yarı mamul haddelemede belirli aşamadan geçerek ray halini alacaktır. Hadde prosesleri şu şekilde sıralanabilir:

- Hadde fırın şarjı ve Isıtma
- Ön hadde
- Ara hadde
- Son hadde
- Soğutma ve doğrultma
- Muayene, kesme ve paketleme

2.8.1. Hadde Fırın Şarjı ve Isıtma

Sürekli dökümden gelen yarı mamul 1200-1250 derece sıcaklıklarda yaklaşık 2 saat tavllanır. Östenit sıcaklık değerlerine kadar ısıtılan malzemede, döküm esnasında meydana gelmesi muhtemel segregasyon gibi yapı hatalarının giderilmesi beklenir. Belirlenen sıcaklıkta istenilen süre kaldıktan sonra yarı mamul ilk ön hadde prosesine başlamak için hat üzerinde yoluna devam eder [37].

2.8.2. Ön Hadde

1200-1250 derece sıcaklıklara kadar ulaşan yarı mamulün üzerinde tufal oluşur. Fırın çıkışında basınçlı hava ve su yardımıyla malzeme yüzeyinden uzaklaştırılır. Tufal uzaklaştırıldıktan sonra ilk hadde pasoları başlar. Burada amaç malzemenin boyca uzaması ve yüzey alanının daralmasıdır. Rayın ayak kısmı burada oluşmaya başlar.

2.8.3. Ara Hadde

Ön hadde pasoları tamamlandıktan sonra malzeme sıcaklığı yaklaşık 1100 derecelere gelir. Burada nihai şekillendirme için ilk işlemlerine başlanır. Rayın mantar kısmı burada oluşur.

2.8.4. Son Hadde

Bu nokta haddehanenin en kritik noktalarından biridir. Malzeme sıcaklığı yaklaşık 1000 derece civarındadır. Kaba hadde ve ara hadde işlemleri tamamlanmıştır ve artık son hadde durağından sonra malzeme nihai şekline kavuşmuştur.

2.8.5. Soğutma ve Doğrultma

Haddeleme işlemleri tamamlandıktan sonraki en önemli kısım soğumadır. Artık nihai şeklini almış olan malzeme hala östenit sıcaklığı olan yaklaşık 900 derecede soğuma bölgesine gelir. İşletmelere göre değişiklik göstermekle beraber malzeme yaklaşık 72 metre uzunluğunda soğuma bölgesine gelir. Burada ray eğik şekilde (S şeklinde) soğumaya bırakılır. Bunun sebebi çeşitli yüzey boyut farklarından dolayı iç gerilmelerin önüne geçmektir.

Yaklaşık 2 saatlik soğumanın ardından malzeme yatay ve dikey olarak doğrultma işlemine tabi tutulur. Herhangi bir eğrilik ve asimetric şekil kalmaması için doğrultma çok işlemi çok önemli bir aşamadır.

Mantar bölgesi sertleştirilmiş ray için ise bu proses biraz daha farklı işlemektedir. 900 derece civarında soğuma bölgesine gelen ray serbest bir şekilde soğumaya bırakılmaz, kontrollü bir şekilde soğutulur. Rayın tamamı kapalı bir alana alınır ve mantar bölgesine belirli sürelerde ve belirli parametrelerde hava ve su karışımı verilerek soğuma işlemi gerçekleştirilir. Malzeme kendi kendine soğuduğu zaman kaba perlitli yapı elde edilir. Ancak özel parametrelerle kontrollü bir soğuma gerçekleştirilerek ince perlitli yapı elde etme hedeflenir. Böylece mantar yüzeyinde daha sert yapı elde edilmiş olur. Bu proses özel bir teknoloji ve özel soğutma parametreleri gerektirir.

2.8.6. Muayene, Kesme ve Paketleme

Gerek yarı mamul kaynaklı gerekse de hadde prosesleri kaynaklı rayda kusur olma ihtimali vardır. Bu sebeple kullanım sahasına gönderilmeden önce rayın mutlak

suretle kontrollerinin yapılması gereklidir. Eddy-Current yöntemiyle yüzey ve yüzey altı kusurlar, Ultrasonik muayene yöntemiyle de iç yapı kusurları kontrol edilebilir.

Soğutulan malzemedeki ilk olarak uç-baş kesimi yapılır ve sonrasında doğrultma işlemi yapılır. Kullanım yerine göre rayın boyu ayarlanarak kesme işlemi yapılır.

Kalite kontrolü ve uygun boya kesme işlemi yapılan ray kullanım sahasına sevk edilebilir.

BÖLÜM 3

KALINTI GERİLME, KIRILMA TOKLUĞU VE ÇATLAK İLERLEMESİ

3.1. KALINTI GERİLME VE OLUŞUMU

Kalıntı gerilmeler metalik malzemelerin üretimleri esnasında oluşan elastik gerilmelerdir. Malzemeye herhangi bir dış kuvvet etki ettiğinde, kalıntı gerilmelerin büyüklüğüne ve türüne göre bu gerilmeler uygulama sırasında pozitif veya negatif etkiler gösterebilmektedir. Olumsuz etkileri; parçaların tahmin edilenden daha hızlı ve daha az gerilimde hasara uğraması ve istenmeyen birim şekil değişimleri olabilmektedir. Malzemelerdeki kalıntı gerilmelerin uygulama öncesinden bilinmemesi güvenlik ve tasarım sorunlarına sebep olabileceğinden, bu gerilmelerin ölçümü tasarım ve üretim sanayisinde büyük önem teşkil etmektedir [38].

Kalıntı gerilmenin birçok makine parçasında görülebilmekte ve ulaşabildiği en yüksek değer metallerin akma gerilmesi ile sınırlıdır. Basma kalıntı gerilmeleri ve çekme kalıntı gerilmeleri olmak üzere iki çeşittir ve basma kalıntı gerilmeleri malzemelerde yorulma davranışlarına pozitif etki sürerken, çekme kalıntı gerilmeleri erken hasarlara sebep olmaktadır. Pim, civata, sıkı geçme gibi bağlantı parçalarında kalıntı gerilmeler fayda sağlamakta fakat takımlarda, kaynak konstrüksiyonlarında ve kalıplarda çalışma süresinin azalmasına neden olmaktadır [38,39].

Tüm üretim teknikleri, malzemeye uygulanan kimyasal, mekanik ve termal yükler malzemelerin yorulma performanslarını ve kırılma davranışlarını etkileyen kalıntı gerilme oluşmasına neden olurlar. Plastik deformasyona uğrayan malzemelerdeki gerilme dağılımı homojen değilse her zaman kalıntı gerilmeler üretirler [39].

Birçok yüzey işlemi ve üretim teknikleri kalıntı gerilmeleri oluşumuna sebebiyet vermektedirler. Bunlar döküm, dövme, çekme, derin çekme, haddeme ve ekstrüzyon gibi üretim yöntemleri, talaş kaldırma gibi yüzey işleme yöntemleri, kaynak gibi birleştirme yöntemleri; mekanik yüzey prosesleri, su verme, CVD (Kimyasal Buhar Biriktirme), nitrürleme, karbonlama ve PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) kaplama olarak sıralanabilir [39].

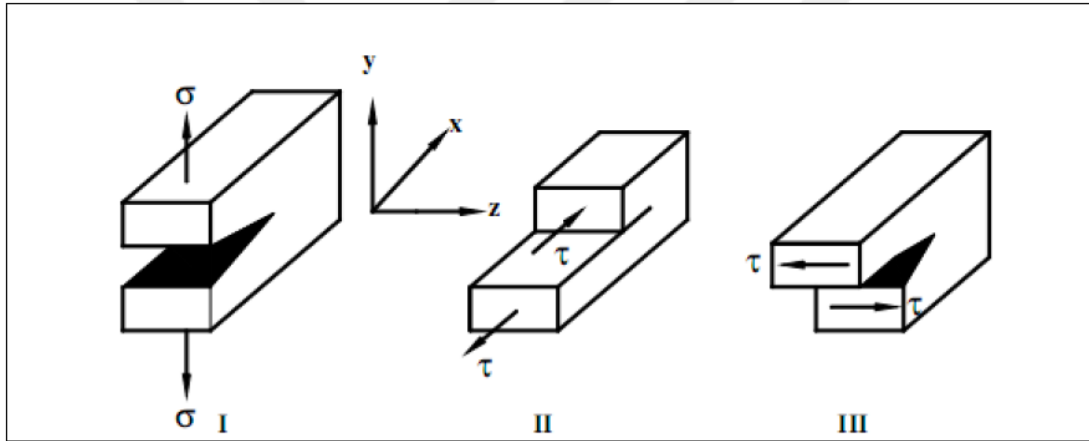
3.2. KIRILMA TOKLUĞU VE ÇATLAK OLUŞUMU

Kırılma, bir parçanın veya malzemenin çeşitli kuvvetler etkisi altında kalması sonucu iki ya da daha fazla parçaya ayrılması olarak tanımlanabilir. Kırılma tokluğu ise üzerinde çatlak bulunan bir malzemenin kırılmaya karşı gösterdiği dirençtir [40].

Kırılma, sünek ve gevrek kırılma olarak iki ana grupta incelenir. Sünek kırılmada çatlak oluşması ve ilerlemesi sırasında önemli ölçüde kalıcı şekil değişimi meydana gelir ve çatlak yavaş ilerler ve kırılma yüzeyi mat ve liflidir. Gevrek kırılmada ise kalıcı şekil değişimi çok az olmakta ve çatlak hızlı ilerlemektedir, kırılma yüzeyi parlak ve taneli bir görünümündedir. Gevrek kırılma önceden fark edilemediği için en tehlikeli olan kırılma tipidir ve felaketlerle sonuçlanan hasarlara sebep olabilir [41].

Genel olarak, numunenin genişliği ve çatlak ucundaki ölçüleri plastik alana göre yeterince büyükse, büyümenin başlangıcındaki gerilme şiddet faktörü (K) değeri sabit olmakla beraber, en düşük değer halini almaktadır. Bu ifade düzlemsel şekil değişimi tokluk faktörü olarak isimlendirilir ve malzemenin K_{IC} değeridir. K_{IC} özellikle numune seçimi hususunda önemli bir faktördür. Irwin ve arkadaşları G ile ifade edilen bir materyal özelliği tanımlamıştır [41]. G, birim kalınlık başına absorbe edilen toplam enerjidir. G kritik bir değere geldiğinde kırılma başlamaktadır. Irwin sonrasında gerilme şiddet faktörü diye bilinen yeni bir malzeme özelliğini açıklamıştır. Gerilme şiddet faktörü çatlak bölgesinde gerilme alanını belirleyen bir parametredir. Numunenin yükleme şekli, geometrik durumu, çatlağın konumu ve çatlak yönelimine bağlıdır. Buna göre çatlak ucunda meydana gelen gerilme dağılımı kritik bir eşiğe geldiğinde kırılma oluşmaktadır. Böylece kritik gerilme şiddet faktörü (K_{IC}) ortaya çıkmış olmaktadır [42].

Malzemelerde bulunan mevcut çatlaklar yüklenme durumuna bağlı olarak üç şekilde ilerleyebilmektedir. Bu çatlak ilerleme şekilleri; Çekme (açılma) modu (Mod I); düzlem içi kayma modu (Mod II); düzlem dışı kayma (makaslama) modu (Mod III) olmak üzere sınıflandırılmaktadır. En çok rastlanan ve sıklıkla hasara sebep olan çatlak ilerleme modunun çekme (açılma) modu (Mod I) olması nedeniyle çatlak ile ilgili matematiksel denklemler ve mekanik incelemelerde Mod I oldukça önemlidir. Şekil 3.1’de yüklemenin üç modu görülmektedir [41].



Şekil 3.1. Kırılma modları [40].

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar için üç farklı kalitede ray kullanılmıştır (R260, R260Mn ve R350HT). Böylelikle hem kimyasal kompozisyon hem de ısıl işlemin deneysel çalışmalar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Öncelikle numunelerin mantar kısımları kesilmiş ve bir takım metalografik işlemlerden sonra, spektral analiz ve sertlik analizlerine tabi tutulmuştur. Rayların mikro yapıları taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) incelenmiştir. Raylara kalıntı gerilme ölçümleri, yorulma çatlak ilerleme ve kırılma tokluğu deneyleri yapılarak kendi aralarında kıyaslamalar yapılmıştır.

4.1. METALOGRAFİK İŞLEMLER

Üç farklı kalite ray, mikro yapı ve sertlik analizleri için standart metalografik prosedürlerine tabii tutulmuştur. Öncelikle rayların mantar kısımları discotom kesme cihazında ayak ve web bölgesinden ayrılmıştır. Akabinde 60 mesh SiC zımparadan başlamak üzere sırasıyla 120, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 zımpara kullanılarak yüzeyleri hazırlanmıştır. Zımpara işleminden sonra parlatma işlemleri yapılmıştır. Parlatma işlemlerinde 6 ve 1 mikronluk elmas süspansiyon kullanılmıştır. Tane sınırlarının daha belirgin hale gelebilmesi amacıyla, kontrast oluşturma işlemi için parlatma işleminden sonra dağlama işlemi yapılmıştır. %3,5 Nital çözeltisi dağlayıcı olarak kullanılmış ve 15 saniye süreyle ray mantarları çözeltiliye daldırılmıştır. Şekil 4.1'de kesme ve otomatik zımparalama-parlatma cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Metalografi numune hazırlama cihazları.

4.2. SPEKTRAL ANALİZ VE SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Şekil 4.2’de deneysel çalışmalarda kullanılan GNR Atlantis marka spektral analiz cihazı verilmiştir. Bu cihaz vasıtasıyla üç farklı kalitedeki rayların kimyasal kompozisyonları tespit edilmiştir.



Şekil 4.2. Spektral analiz cihazı.

Şekil 4.3’te tezde kullanılan makro sertlik cihazına ait görüntü verilmiştir. Sertlik ölçümleri DIN EN 13674-1 standardının ön gördüğü tüm bölgeler yerine sadece ray mantarının en üst kısmından (RS) alınmıştır. Brinell sertlik ölçüm yöntemi kullanılmış, 187,5 kg. yük 15 saniye süreyle numunelere uygulanmıştır. Her bir bölgeden üçer ölçüm alınıp sonuçlar çizelge halinde kaydedilmiştir.



Şekil 4.3. Brinell sertlik ölçüm cihazı.

4.3. KESME YÖNTEMİYLE KALINTI GERİLME ÖLÇÜMÜ

Kesme yöntemiyle kalıntı gerilme ölçümleri için tedarik edilen üç farklı kalitede raylar, boyları bir metre olacak şekilde ayarlandı. Rayların taban kısımlarının orta bölgesi gerekli işaretlemeler yapılarak ayarlandı. El taşlama cihazı kullanılarak yüzeye zımparalama işlemi yapıldı. Akabinde 320 mesh zımparayla manuel olarak zımparalama işlemine devam edildi.

Zımparalanmış yüzeyler, yağ çözücüyle temizlendi. Temizlik işlemleri için gazlı bez kullanıldı. Yüzeyde herhangi bir kirlilik kalmadığından emin olduktan sonra, kimyasal temizleyici olarak özel asidik solüsyon kullanıldı. Yüzeyin pH dengesinin bozulmaması için üstüne bazik solüsyon dökülerek temizlik işlemi tamamlandı. Elde edilmiş yüzeylerin kesinlikle herhangi bir kir içermemesi ve kaba bir şekilde zımparalanmış olması gerekmektedir. (Gerinim ölçerlerin sağlıklı bir şekilde yapıştırılması için)

Elektriksel dirence sahip gerinim ölçerler (strain gauge) bant yardımıyla alınarak rayların temizlenen ve zımparalanan bölgesine düzgün bir şekilde yapıştırıldı.

Deneysel çalışmalarda kullanılan gerinim ölçerlere ait bilgiler aşağıda verilmiştir.

Model: “CEA-06-125UN-350”

Uzunluk: 3 mm

Direnç: 350 Ω

Ölçüm (Gage) faktörü: 2,11

Gerinim ölçerin ölçüm hassasiyeti: \pm %0,5

Gerinim ölçerlerin yapıştırılmasında M-Bond 200 marka Japon yapıştırıcısı kullanılmıştır. Gerinim ölçerlerin yapışmış olduğu bant yarıya kadar kaldırılarak, rayın üzerine bir damla yapıştırıcı dökülmüştür. Daha hızlı yapışmayı sağlamak için katalizör de kullanılmıştır. 2-3 dakika parmakla baskılama işleminden sonra bant rayın üzerinden çekilerek alınmıştır. Böylelikle gerinim ölçerler rayların belirlenen bölgesine yapışmıştır.

Üç telli elektriksel kablo (kırmızı-beyaz-siyah) lehimleme işlemi için kullanılmıştır. Çeyrek köprü konfigürasyonu yapılarak, siyah ve beyaz kablolar birleştirilmiştir. Gerinim ölçerlerin ayak bölgelerine kabloların ucu gelecek şekilde lehimleme prosesi uygulanmıştır. Multi metre vasıtasıyla gerinim ölçerlerin lehim bölgesinden direnç okunmuştur. Kesme esnasında bor yağıyla temas ve atmosferik etmenler düşünülerek, poliüretan malzemedan yapılmış özel kaplayıcı gerinim ölçerlerin üzerine sürülmüştür. Şekil 4.4’te kalıntı gerilme ölçümü için rayın hazırlanması ve kesilme aşaması gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Gerinim ölçerin yapıştırılması, deneyde kullanılan malzemeler ve kesme aşaması.

Kalıntı gerilme ölçümü için hazırlanan raylar, ölçüm yapılmak üzere Uzay marka şerit testereye yerleştirildi. Lehimin ucundaki soket 8 kanallı Vishay marka veri toplama cihazına bağlandı. Cihaza ait özel yazılım programında, gerinim ölçer, malzeme ve veri toplama kanalı bilgileri girilerek teste hazır hale gelindi.

Kesme işlemi gerinim ölçerlerin bağlı olduğu ray tabanının orta bölgesi çıkarılacak şekilde iki aşamada yapıldı. Kesme esnasında birinci ve ikinci kesimler neticesinde raylarda meydana gelen birim şekil değişimi değerleri yazılım kontrolünde kayıt altına alındı. DIN EN 13674-1 standardına göre rayın orta bölgesinden 20 mm.'lik parçalar çıkarılarak elde edilen net birim şekil değişim değeri Eşitlik 4.1'de verilen Hooke kanuna göre malzemelerin elastik modülüyle çarpıldı. Kesim esnasında elde edilen verilerin toplandığı cihaz Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

(4.1)

σ = Gerilme (MPa)

E= Elastik modülü (207 GPa)

ε = Birim şekil değıştirme değeri ($\mu\text{m/m}$)



Şekil 4.5. Veri toplama cihazı.

4.4. X IŞINI YÖNTEMİYLE KALINTI GERİLME ÖLÇÜMÜ

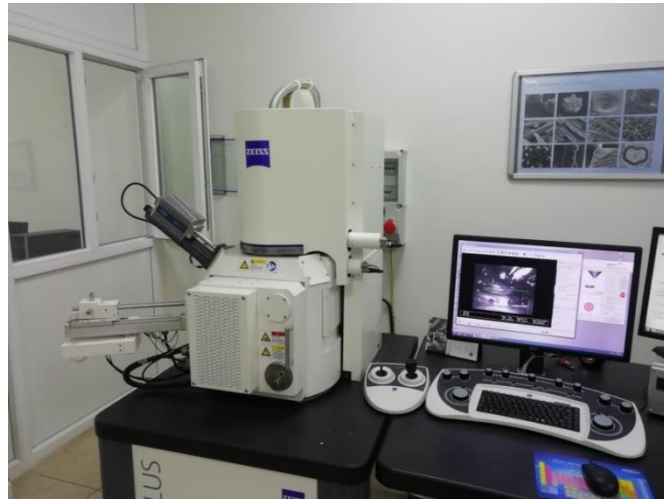
Tahribatlı kalıntı gerilme ölçme sistemlerinden kesme yöntemine ek olarak rayların mantar bölgesinin RS bölümünden numune hazırlanarak X ışını kırınımı tekniğiyle tahribatsız kalıntı gerilme ölçümü gerçekleştirildi. Şekil 4.6'da gösterilen Rigaku Ultima marka XRD cihazı kullanılarak gerilme ölçümleri yapıldı. Bu metot, raylarda düzlemler arası mesafeden yararlanarak ölçümlerin gerçekleştirilmesine olanak sağlayan bir tekniktir.



Şekil 4.6. Rigaku Ultima XRD cihazı.

4.5. MİKRO YAPI İNCELEMELERİ

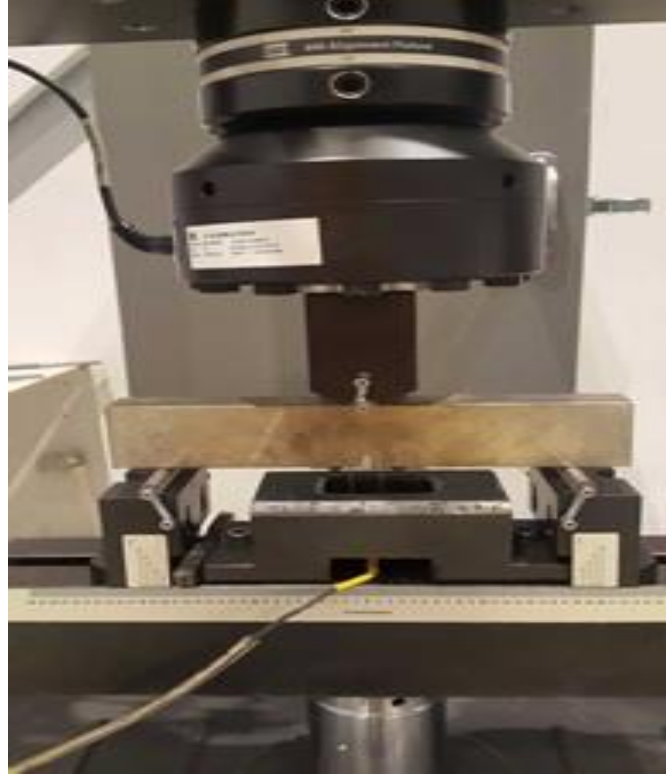
Şekil 4.7’de mikro yapı incelemeleri için kullanılan Carl Zeiss Ultra Plus SEM cihazı gösterilmiştir. Metalografik işlemler ardından, dağlanmış numuneler SEM cihazının haznesine uygun olarak ayarlanmış ve mikro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Farklı büyütmelerde görüntüler alınmış, rayların RS bölgelerinden inceleme yapılmıştır. Lameller arası mesafeler ölçülmüş ve bu tezde kullanılan ray kaliteleri kendi aralarında kıyaslanmıştır.



Şekil 4.7. SEM cihazı.

4.6. YORULMA ÇATLAK İLERLEME VE KIRILMA TOKLUĞU ANALİZLERİ

Şekil 4.8’de mekanik testlerde kullanılan MTS marka 100 kN yük kapasiteli hidrolik test cihazı gösterilmiştir. Raylara uygulanan yüke bağlı olarak çatlakların ilerleme hızı ve çatlaklara karşı göstermiş olduğu tepkiye bağlı olarak kırılma tokluğu testleri bu cihazda gerçekleştirilmiştir. Numuneler, ASTM E 647, ASTM E 399 ve DIN EN ISO 13674-1 standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır. Numunelerde önceden açılmış çentiğe bağlı olarak başlangıç çatlak boyları ölçülmüş ve deneysel sonuçlar kısmında belirtilen parametrelere göre ön çatlak oluşturulmuştur. Akabinde çatlakların ilerleme hızı hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu analizlerinde ise benzer prosedür uygulanmıştır. Kırılma tokluğu testlerinde kırılma işlemi -20 C’de gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8. Çatlak ilerleme ve kırılma tokluğu ölçümlerinin yapılması.

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında “Deneysel Çalışmalar” bölümünde belirtilen analizler için kullanılan raylara ait kimyasal kompozisyonlar Çizelge 5.1’de sunulmuştur. Bu kapsamda demiryollarında çok sık kullanılan R260 kalite raylar, R260 kalite ray ile hemen hemen aynı kompozisyona sahip fakat mangan miktarı daha yüksek olan R260Mn kalite ray ve hızlı tren hatlarında kullanılan mantarı sertleştirilmiş R350HT kalite ray kullanılmıştır. Tüm raylara sertlik ve mikro yapı incelemeleri yapılmış hem kesme yöntemiyle hem de X ışını yöntemiyle kalıntı gerilme ölçümleri yapılmıştır. Son olarak bu rayların mekanik özellikler açısından önem arz eden standartta da belirtilen kırılma tokluğu ve yorulma çatlak ilerleme analizleriyle yorulma performansları değerlendirilmiştir.

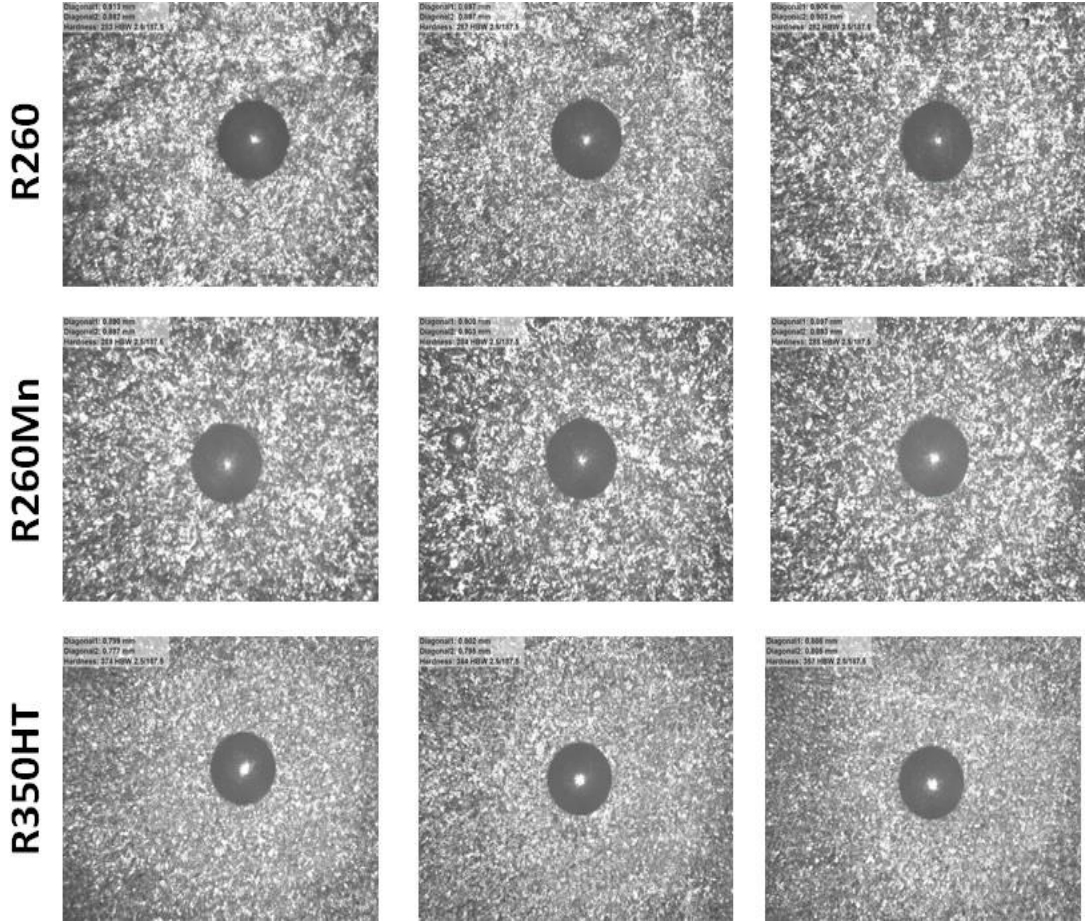
Çizelge 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan rayların kimyasal kompozisyonları [44].

Raylar	% C	% Mn	% Si	% S (max.)	% P (max)	%Al (max)
R260	0,62-0,80	0,65-1,25	0,15-0,58	0,008-0,025	0,025	0,0040
R260Mn	0,53-0,77	1,25-1,75	0,20-0,50	0,008-0,025	0,025	0,0040
R350HT	0,70-0-82	0,65-1,25	0,34-0,40	0,020	0,020	0,0040

5.1. SERTLİK SONUÇLARI

R260, R260Mn ve R350HT kalite raylara brinell sertlik metoduyla makro sertlik ölçümler uygulanmıştır. 187,5 kg. yük 15 saniye süreyle raylara uygulanıp 2.5 mm çapında batıcı uç bilye kullanılarak sertlik ölçümleri tamamlanmıştır.

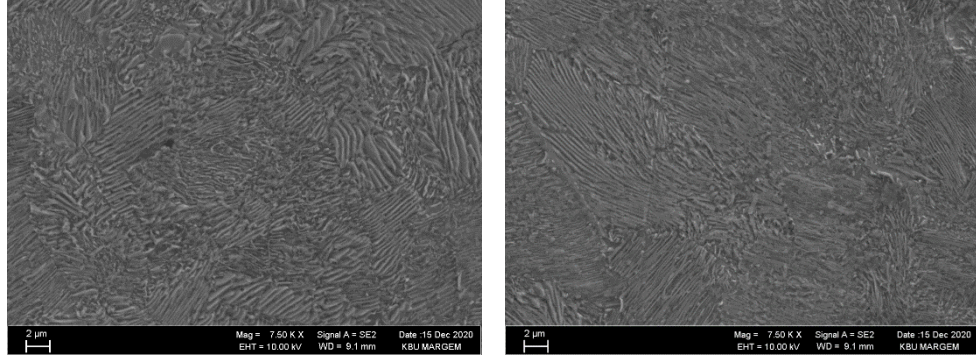
Ray eliklerinde hem kimyasal kompozisyonun (farklı mangan miktarının) hem de ısıl işlemin sertlik performansına etkisinin olup olmadığı bu çalışmada yer almıştır. Rayların standartta belirtilen mantar bölgesindeki 9 ölçüm noktasından değil, sadece yüklemeye en çok maruz kalan ray yüzey bölgesinden (RS) sertlik ölçümleri alınmıştır. şekil 5.1’de raylara uygulanan brinell sertlik ölçümleri görüntüleriyle birlikte verilmiştir. Yapılan ölçümler neticesinde, R260 kalite raylarda sırasıyla, 283, 287 ve 282 HBW sertlik değerleri elde edilmiştir. Mangan miktarı farklı olan R260Mn kalite rayda ise sırasıyla 284, 288 ve 289 HBW sertlikler bulunmuştur. İki farklı kalite rayda sertlik performanslarında herhangi net bir farklılık gözlemlenmemiştir. Fakat ısıl işleme ve haddeleme işleminde özel soğutma sistemine tabi tutulan R350HT kalite raylarda ise 374, 364 ve 357 HBW sertlikler elde edilmiştir. Özellikle mantar bölgesinin daha homojen ve hızlı soğutulması neticesinde ciddi bir sertlik artışı gözlemlenmiştir. Ayrıca sertlik ölçüm mikro yapıları da değerlendirildiğinde, R260 ve R260Mn kalite raylarda ferritik bölgeler (açık renkli) daha yoğun bir şekilde görölmektedir. R350HT kalite rayda ise bu yumuşak fazın yoğunluğunun daha az olduğu gözlemlenebilmektedir.



Şekil 5.1. Brinell sertlik ölçüm sonuçları.

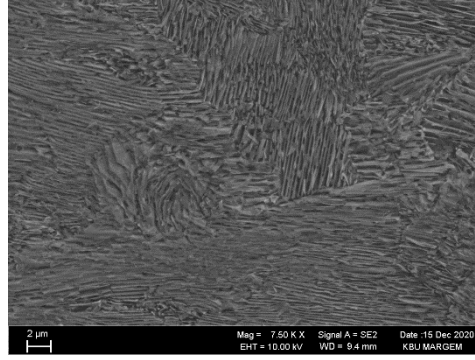
5.2. MİKROYAPI ANALİZ SONUÇLARI

Üç farklı kalite rayın RS bölgeleri, Bölüm 4.1’de belirtilen metalografik işlemler uygulanarak mikro yapı incelemelerine tabii tutulmuştur. Şekil 5.2’de bu ray kalitelerine ait Mikroyapı görüntüleri 7.500X büyütmede gösterilmiştir. Yapılar genel olarak perlitik olmakla beraber, R350HT kalite rayda perlitik yapıların daha sık olduğu ve ince perlitik yapının olduğu söylenebilmektedir.



(a)

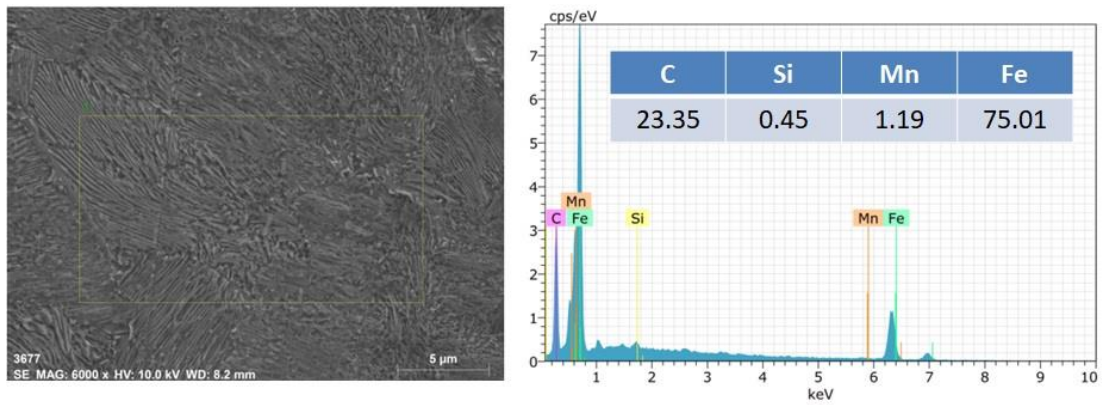
(b)



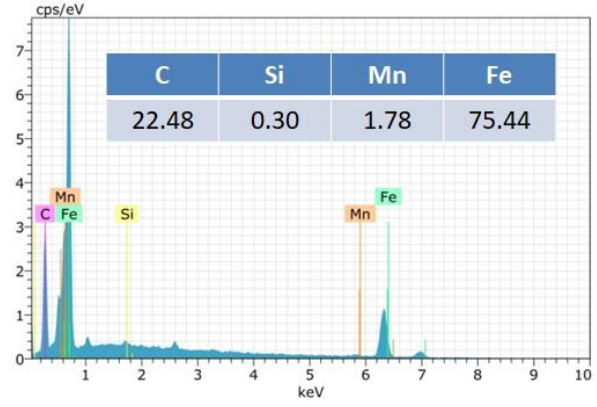
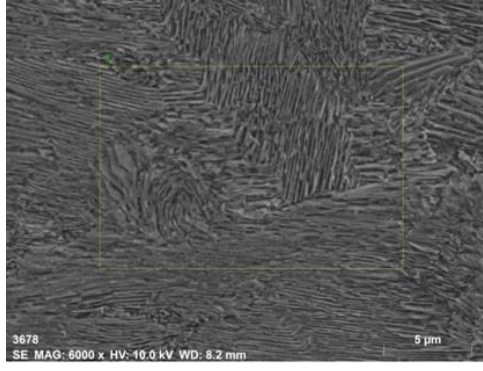
(c)

Şekil 5.2. Raylara ait SEM Mikroyapı görüntüleri (a)R260, (b)R260Mn ve (c)R350HT.

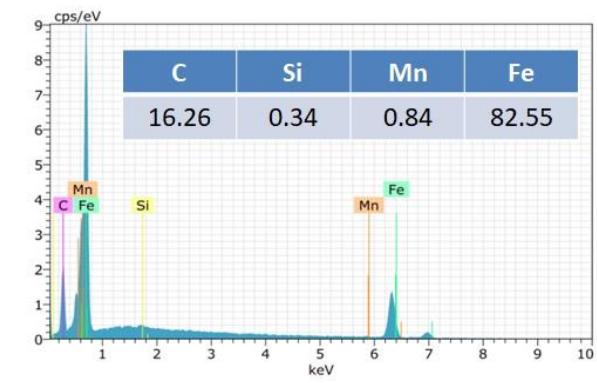
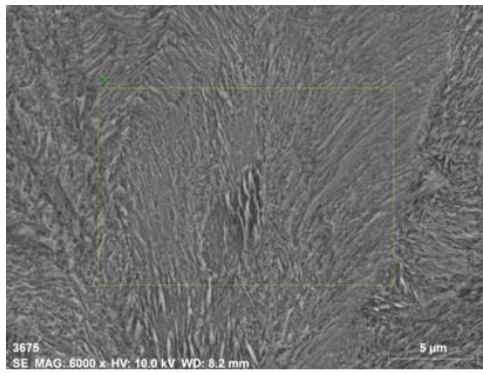
Şekil 5.3'te raylara yapılan EDS analizleri sunulmuştur. Yüksek büyütmelerde mikro yapıdan genel bölge seçilerek dikdörtgenel alan analiz edilmiştir. Karbon, Mangan, Silisyum ve Demir oranları incelenmiştir. R260 Mn kalite rayda mangan miktarının daha yoğun olduğu bölgesel olarak da tespit edilmiştir.



(a)



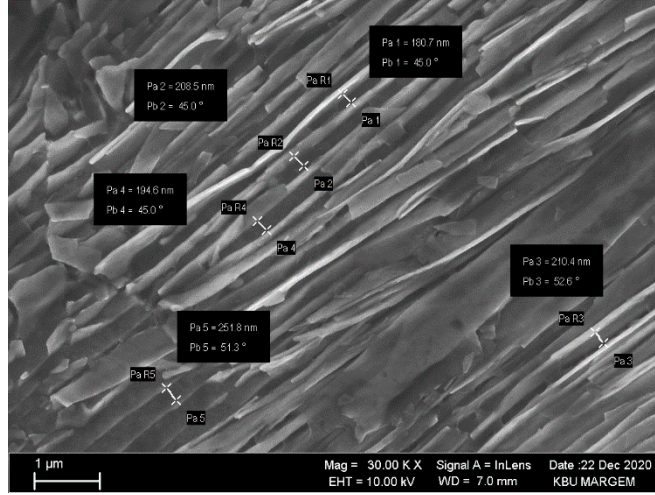
(b)



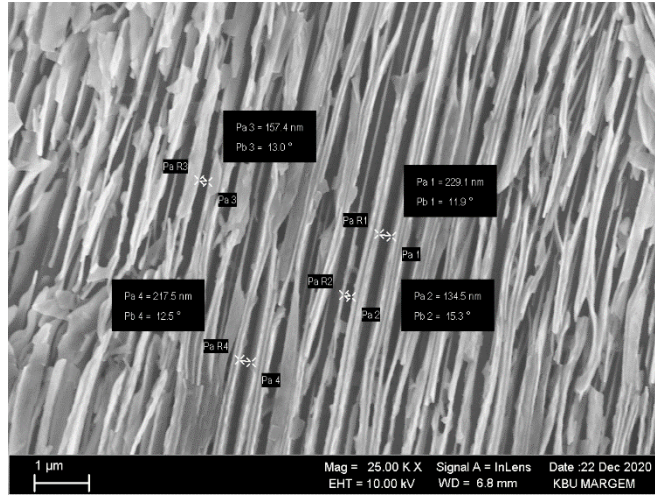
(c)

Şekil 5.3. Raylara ait EDX görüntüleri (a) R260, (b) R260Mn ve (c) R350HT.

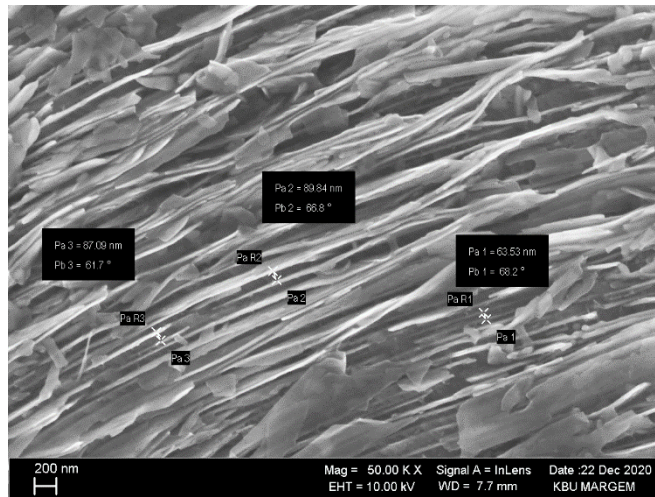
Mikroyapı görüntülemelerine ilaveten üç farklı kalitedeki rayların 25.000-30.000 büyütmelere çıkararak, perlit lamelleri arasındaki mesafeler de yine SEM cihazında ölçülmüştür (Şekil 5.4). Yapılan çok sayıda ölçüm neticesinde R260 kalite rayda ortalama 208 nm., R260Mn kalite rayda 186 nm. ve R350HT kalite ray da ise 82 nm. lameller arası mesafe tespit edilmiştir.



(a)



(b)



(c)

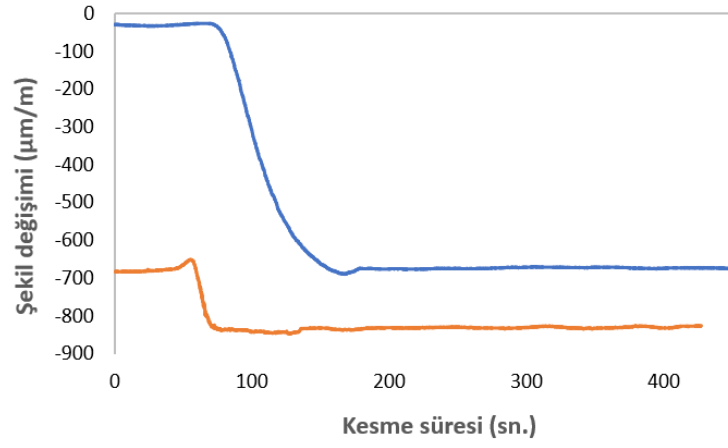
Şekil 5.4. Raylarda lameller arası mesafe ölçümü (a) R260, (b) R260Mn ve (c) R350HT.

5.3. KESME YÖNTEMİYLE KALINTI GERİLME ÖLÇÜM SONUÇLARI

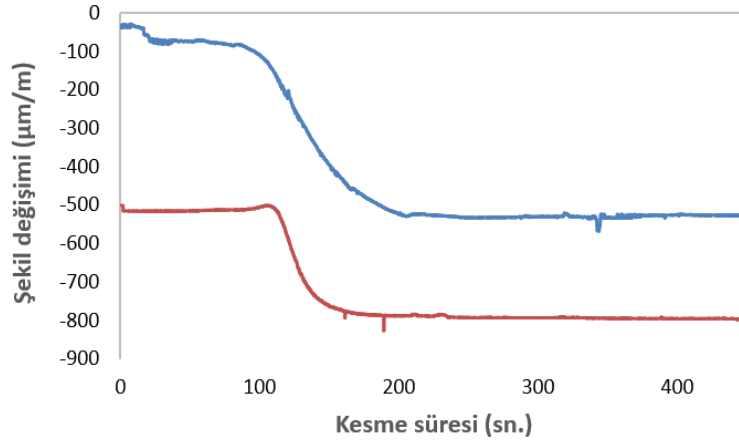
Üretim esnasında meydana gelen ve özellikle çeliklerin yorulma performanslarını da önemli ölçüde etkileyen kalıntı gerilme davranışları demiryolu ray standardında yer alan kesme yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bir metrelik rayların taban bölgesinin orta kısmına gerinim ölçerler yapıştırılmış ve kesme esnasında meydana gelen direnç değişiminden yola çıkarak kalıntı gerilmeler hesaplanmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan üç farklı kaliteye ait kalıntı gerilme ölçüm grafikleri Şekil 5,5'te sunulmuştur. Ölçüme hazır olan raylar şerit testerenin kesme bölümüne alındı. Gerinim ölçerlerin bağlı olduğu bölgeden 20 mm.'lik parça (EN 13674-1 ray standardına göre) yapılan iki farklı kesme işlemiyle çıkarıldı [43]. Şekil 5.5'te verilen grafiklerde mavi çizgi birinci kesimi ve kırmızı çizgi ise ikinci kesimi ifade etmektedir. Birinci kesime başlamadan birim şekil değişiminin sıfır veya sıfıra oldukça yakın olması gerekmektedir. Birinci kesim tamamlandıktan sonra mikrometre/metre cinsinden elde edilen birim şekil değişimi yazılımda kayıt altına alınmaktadır. İkinci kesimde ise mevcut birim şekil değişimi kaldığı yerden devam ederek kesme işlemi sonunda belli bir değere ulaşmaktadır. Elde edilen birim şekil değişimi/uzama rayların elastik modülüyle çarpılarak, kalıntı gerilme değerleri MPa cinsinden hesaplanmaktadır. Rayların elastik modülü 207.000 MPa olarak alınmıştır.

Ölçümler neticesinde R260 kalite rayda birim şekil değişimi 803 $\mu\text{m}/\text{m}$, R260Mn kalite rayda 767 $\mu\text{m}/\text{m}$ ve R350HT kalite rayda ise 710 $\mu\text{m}/\text{m}$ bulunmuştur. Kalıntı gerilme değerleri hesaplandığında sırasıyla R260 kalite rayda 166 MPa, R260Mn kalite rayda 159 MPa ve R350HT mantarı sertleştirilmiş rayda ise 146 MPa tespit edilmiştir. R260 ve R260Mn kalite ray birbirine yakın gerilme davranışı sergilerken, R350HT 'de kalıntı gerilme değeri biraz daha düşük çıkmıştır.

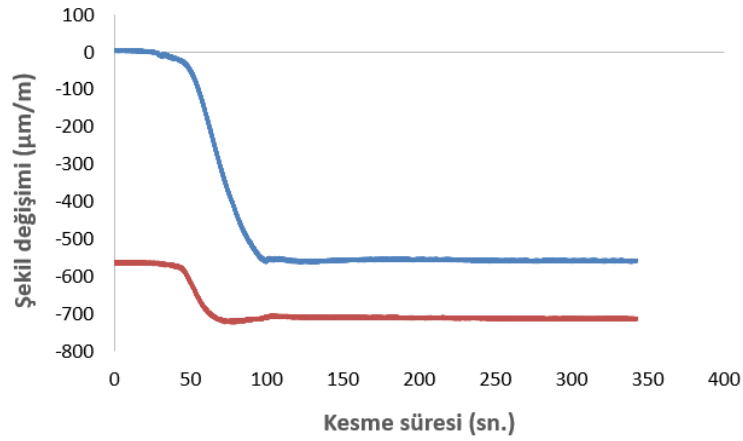
Kalıntı gerilmeler en fazla rayların haddeleme sonrası soğuma ızgaralarına gelerek soğuma aşamasında meydana gelmektedir. Rayların mantar kısımlarının ayak bölgesine göre yüksek kesit alanından dolayı daha yavaş soğuması neticesinde oluşmaktadır. Mantar sertleştirme ısıl işleminde mantar bölgesine ayrıca tatbik edilen hava+su karışımıyla ekstra soğutmanın sağlanması iç yapıdaki çekme kalıntı gerilmelerinin daha da az olmasına sebebiyet verdiği düşünülmektedir [44,45].



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.5. Raylara ait kalıntı gerilme grafikleri (a) R260, (b) R260Mn ve (c) R350HT.

5.4. X IŞINI YÖNTEMİYLE KALINTI GERİLME ÖLÇÜM SONUÇLARI

Standardın ön gördüğü kesme yöntemiyle kalıntı gerilme ölçümüne ek olarak tahribatsız yöntem olan X ışını ile de kalıntı gerilme ölçümü yapılarak, ölçüm yöntemlerinin artırılması ve yaygınlaştırılmasına yönelik çalışma bu tez kapsamında yapılmıştır. Rigaku marka X-ray cihazıyla, üç farklı rayın RS bölgelerine kalıntı gerilme ölçümü yapılmış ve sonuçlar Şekil 5.6'da verilmiştir.

Ölçümler için cihaz 40 kV ve 40 mA şartlarında çalıştırılmıştır. Ölçümün temel prensibi raylardaki düzlemler arası mesafenin farklılıklarından yola çıkarak poisson oranı ve elastik modülünün de kullanılmasıyla $\sin^2 \psi$ metodunun uygulanmasına dayanmaktadır. Poisson oranı 0,3 olarak alınmış ve Eşitlik 5.1'de verilen formül uygulanmıştır.

$$\frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\phi} \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (5.1)$$

Bu formüle göre;

$d_{\phi\psi}$: Kırınım düzlemi aralığı

d_0 : Gerilimsiz durumdaki latis aralığı

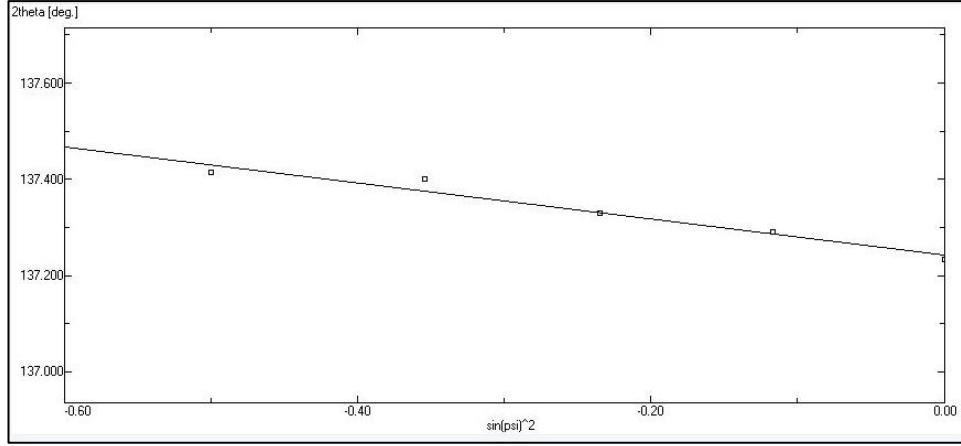
ν : Poisson oranı

E : Elastik modülü

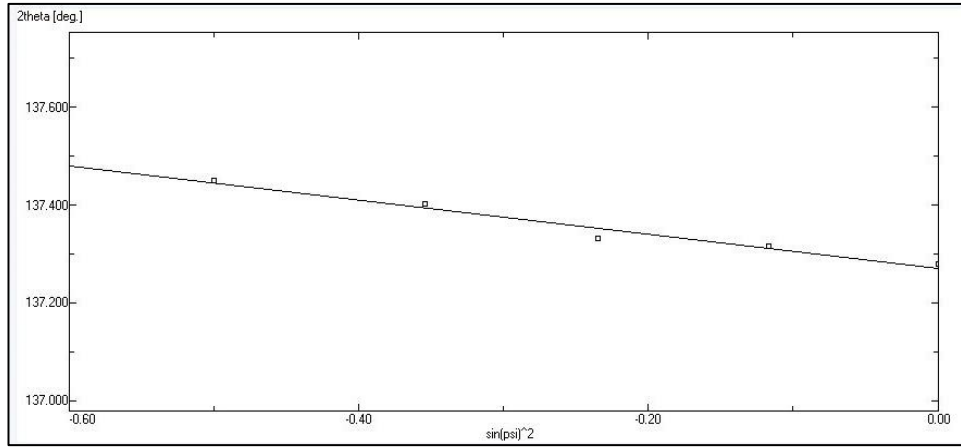
Bu ölçüm yönteminde, yüzeyin kalıntı gerilme değerleri polikristalin malzemeler için numuneler bozulmadan ölçülebilmektedir. XRD-sin²ψ yöntemi, gerinim ölçer olarak düzlemler arasındaki mesafeyi kullanmaktadır. Yapıdaki deformasyonun düzlem aralıklarında değişikliklere sebebiyet verdiği bilinmektedir [46]. Kalıntı gerilim ölçümü için, belirli bir kırınım zirvesi için bir dizi sabit açı uygulanmaktadır. Ölçümden sonraki 2θ değerleri doğrusal regresyon elde etmek için kullanılmakta ve böylece gerilim hesaplaması için ortaya bir eğim çıkmaktadır [47].

X-ışınları belli bir tarama açılarında (-45 , $-36,5^\circ$, -29° , -20° , 0°) numunenin yüzeyine temas ettiğinde, Bragg kırınimleri tanelerin (hkl) kafes düzlemleri ile açığa çıkmaktadır. Bir kırınım açısındaki (2θ) X-ışını, numune yüzeyinin normaline göre bir açı (ψ) ile belirlenmektedir. Daha sonra, kafes düzleminin (hkl), d aralığı ($d\phi\psi$) ölçülerek hesaplama yapılmaktadır.

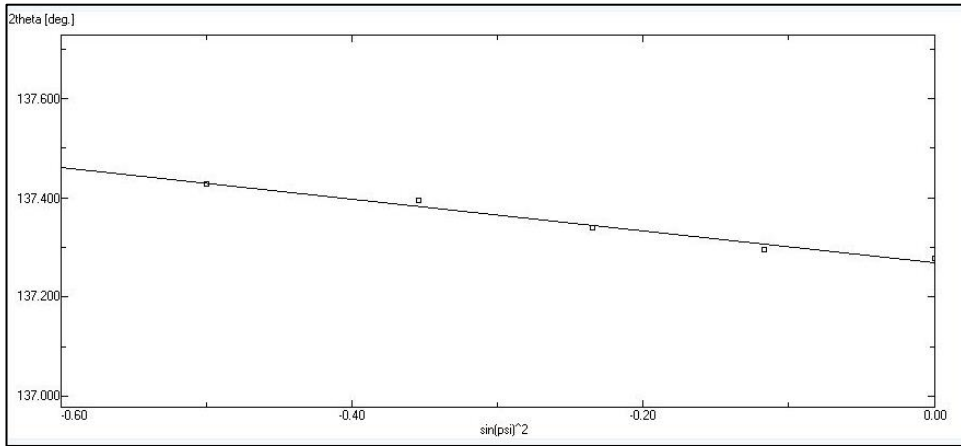
Elde edilen ölçüm sonuçlarına göre, R260 kalite ray 196 MPa, R260Mn kalite ray 184 MPa ve mantarı sertleştirilmiş R350HT kalite ray ise 169 MPa kalıntı gerilme değerine sahiptir. Elde edilen sonuçların büyüklüğüne göre kesme yöntemiyle tutarlı olduğu görülmektedir. Örneğin R350HT kalite rayda kalıntı gerilme değeri hem kesme yönteminde hem de X ışını yönteminde nispeten diğer raylara göre daha düşüktür. X ışını analizleri neticesinde genellikle, çok küçük bir bölgeden ölçüm alınması ve numunenin zımparalama ve parlatma aşamasında meydana gelen mekaniksel gerilmelerinde etkisiyle, diğer makro ölçüm yöntemlerine göre daha fazla (2-3 kat) kalıntı gerilme değerleri bulunabilir. Fakat bu çalışmada kesme yöntemine yakın sonuçların bulunmasının sebeplerinden biri, X ışını ile yapılan ölçüm hızının çok yavaş bir şekilde gerçekleştirilmesidir. Diğer sebep ise zımparalama işlemi neticesinde orda meydana gelmiş ilave gerilmelerin, ölçüm öncesi yapılan elektro dağlama işlemiyle ortadan kaldırılmasıdır. Normal şartlarda demir esaslı malzemelerin gerilme ölçümlerinde krom tüp kullanılması gerekirken, bu çalışmada mevcut imkanlar dahilinde bakır tüp kullanılmış ve ölçüm süresi 8-10 kat daha da artmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.6. XRD kalıntı gerilme grafikleri (a) R260, (b) R260Mn ve (c) R350HT.

5.5. YORULMA ÇATLAK İLERLEME HIZI DENEY SONUÇLARI

Yorulma çatlak ilerleme deneyleri, raylarda meydana gelebilecek çatlak oluşumlarının ilerleme hızı ve bu ilerlemeye karşı göstermiş olduğu direncin nasıl olduğunu ifade etmek açısından oldukça önemli bir deneydir. Bu deney, öncelikle malzemede ön çatlak oluşumu ve akabinde bu çatlağın kırılana kadar ki zaman diliminde ilerletilmesinden ibarettir.

Üç farklı ray kalitelerinin yorulma çatlak ilerleme performansının analizi için, üç nokta eğme aparatı kullanılarak, aynı koşullar altında ön çatlak oluşumu gerçekleştirilmiştir (Çizelge 5.2). Şekil 5.7’de numunelerde çevrim sayısına bağlı olarak, çentikten başlatılarak belli bir seviyeye kadar yapılan ön çatlak oluşum işlemine yönelik grafik verilmiştir.

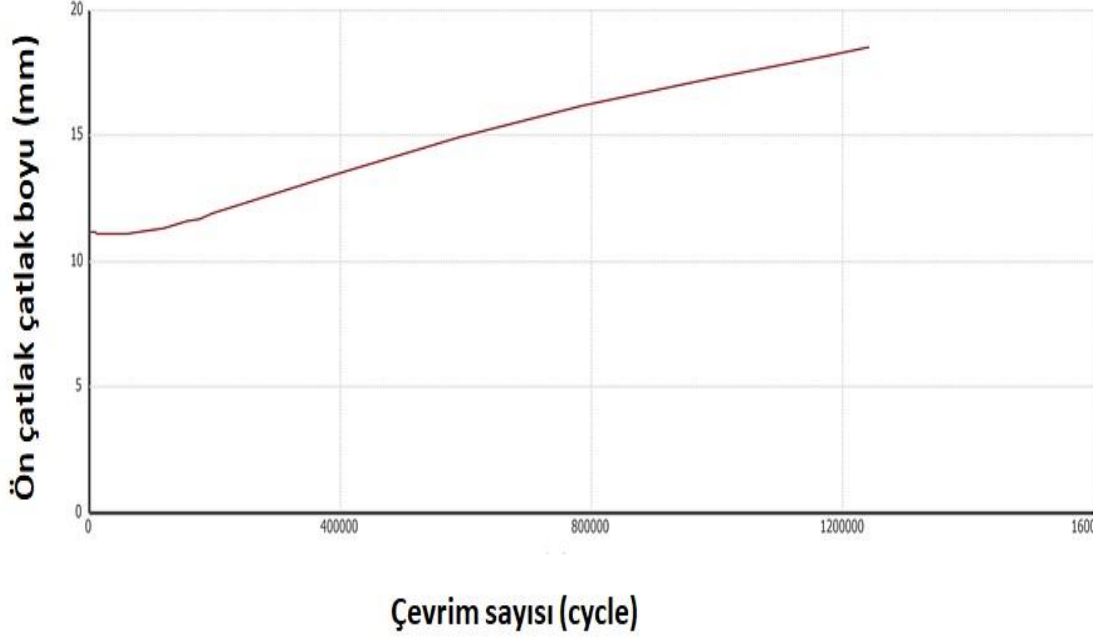
Çizelge 5.2. Ön çatlak oluşumu için kullanılan parametreler.

Numune türü	Üç nokta eğme numunesi
Gerilme Şiddet Seviyesi	18.5-21.5 MPa \sqrt{m}
Deney sıcaklığı	Oda sıcaklığı
Yükleme Oranı	0.5
Çentik dahil deney öncesi çatlak boyu	11 mm
Mesnetler Arası Mesafe	180 mm
Deney Frekansı	40 Hz

Çizelge 5.2’de belirtildiği üzere çentiği açılmış ve ray standardına uygun olarak hazırlanan numunelere 18-19 mm. seviyesine kadar ön çatlak oluşturma işlemi yapılmıştır. Bunun için 18-20 kN aralığında yük uygulanarak (R350 HT kalite raylarda ön çatlak oluşumu için 21 kN yük uygulanmıştır), oda sıcaklığında 40 Hz. frekansta ön çatlak oluşturulmuştur.

Ön çatlak işlemi bittikten sonra ikinci aşamaya geçilerek mevcut ön çatlağın ilerlemesi sağlanmıştır. 14 ile 7 kN aralığında yükleme oranı 0.5 olacak şekilde dinamik yük uygulanmaya devam etmiştir. Frekans 40 Hz. olarak ayarlanmış ve

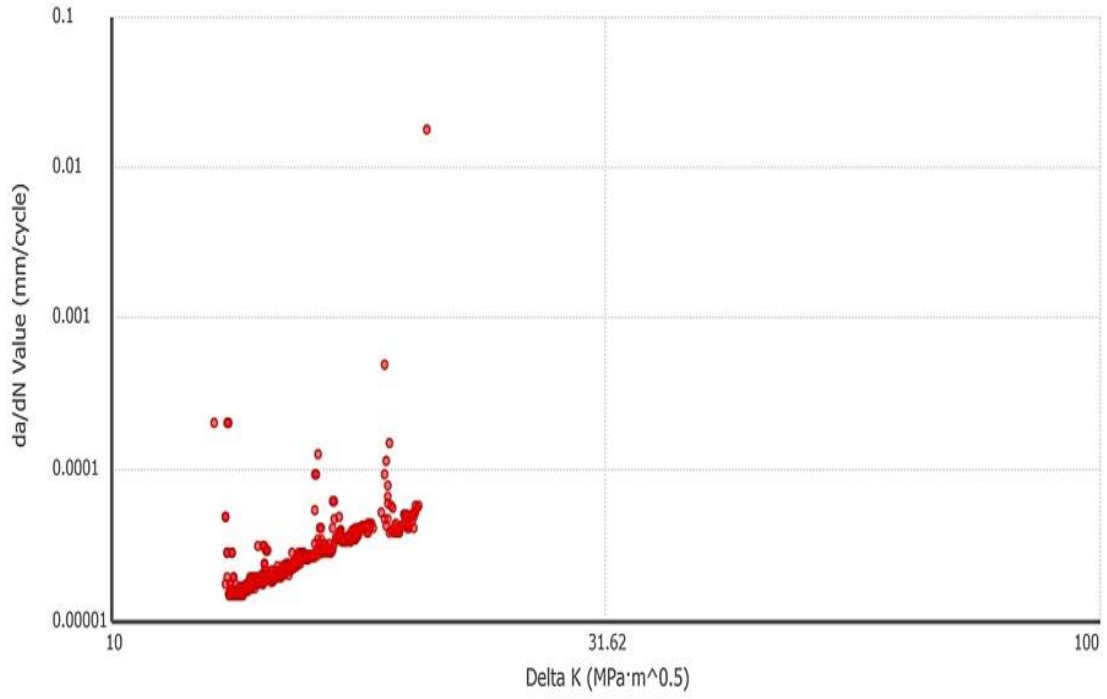
çatlağın ilerlemesi neticesinde farklı gerilme şiddeti değerlerinde (10 MPa \sqrt{m} ve 13.5 MPa \sqrt{m}) meydana gelen değişimler kayıt altına alınmıştır. Bu veriler çevrim sayısına bağlı olarak çatlaktaki açılma mesafesini (da/dn) ifade etmektedir.



Şekil 5.7. Yorulma çatlak ilerleme ön çatlak deneyi.

Şekil 5.8’de numunelere ait genel yorulma çatlak ilerlemesi hızı deney sonuç görüntüleri verilmiştir. EN 13674-1 (ISO 12108) standardında $\Delta K=10\text{Mpa}\sqrt{m}$ için elde edilen sonuçların 1.7×10^{-5} mm/Cycle değerinden, $\Delta K=13.5\text{Mpa}\sqrt{m}$ için ise 5.5×10^{-5} mm/Cycle değerinden daha düşük olacağı ifade edilmiştir [43].

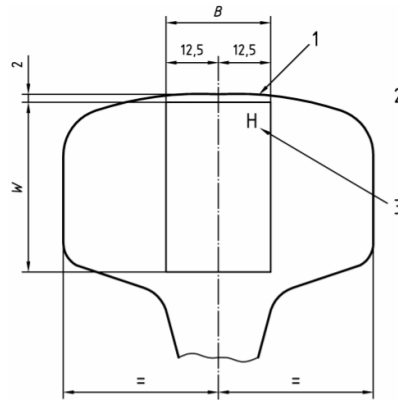
Bu çalışmada 13.5 MPa \sqrt{m} gerilme şiddet faktörü değeri için üç farklı kalitedeki rayın da/dn değerleri hesaplanmış ve kıyaslama yapılmıştır. R260 kalite rayda $1,63\times 10^{-5}$ mm/Cycle değeri elde edilirken, bu değer R260Mn ve R350HT kalitedeki raylar için sırasıyla $1,52\times 10^{-5}$ mm/Cycle ve $1,31\times 10^{-5}$ mm/Cycle olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre, yorulma çatlak ilerleme hızı en düşük olan numune mantarı sertleştirilmiş ray olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 5.8. Yorulma çatlak ilerleme hızı deneyi.

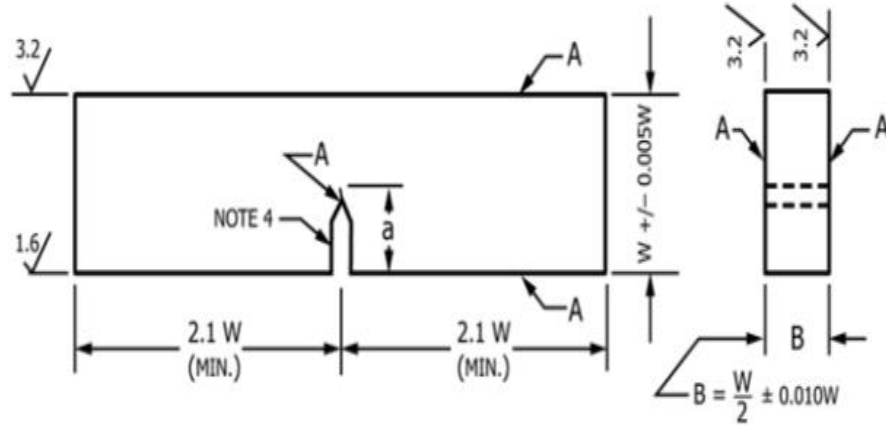
5.6. KIRILMA TOKLUĞU ANALİZİ DENEY SONUÇLARI

Malzemelerde mevcut çatlakların oluşumu ve bu çatlığa karşı gösterilen direnci ifade etmenin en önemli yollarından biri de kırılma tokluğu ölçüm verileridir. Üç farklı kalite ray, Şekil 5.9’da gösterilen ray bölgelerinden alınan numuneler neticesinde hazırlanmıştır.



Şekil 5.9. Kırılma tokluğu analizi için raydan numune alınan kısım [43].

Şekil 5.10’da Metalik malzemelerde kırılma tokluğu ölçüm standardı olan ASTM E399’a göre hazırlanan numune geometrisi ve ölçüleri verilmiştir.

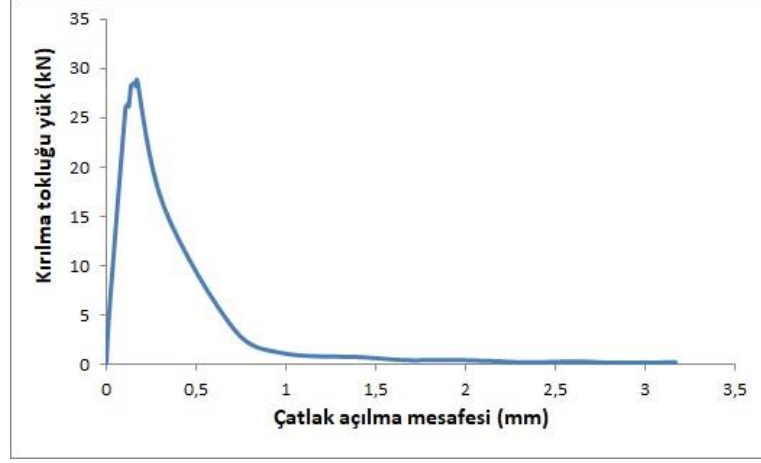


Şekil 5.10. ASTM E399 standardına göre kırılma tokluğu analizi için numune boyutları [48].

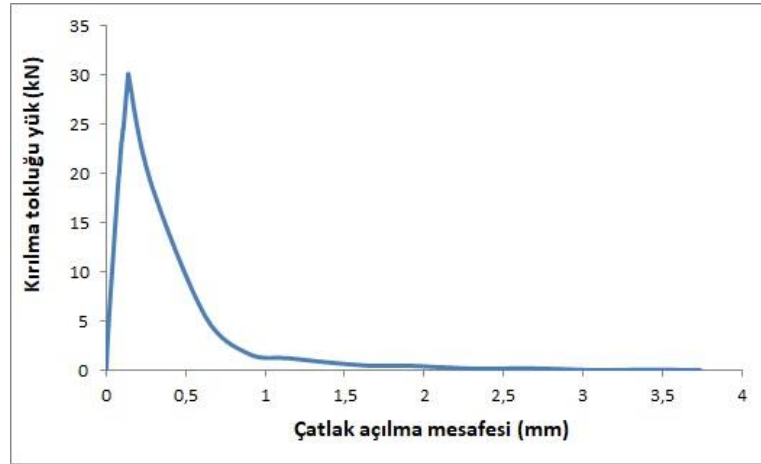
Kırılma tokluğu ölçüm deneyi de yorulma çatlak ilerleme hızı testi gibi aynı aşamalardan geçmektedir. Kırılma tokluğu ölçümü öncesi, bu deneysel çalışmalarda kullanılan üç farklı kalite raya ön çatlak oluşturulmuştur. Ön çatlak oluşumu 18.5-19.5 mm. 'ye kadar oluşturulmuş ve gerilim şiddet seviyesi 18.5 ile 21 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ arasında uygulanmıştır. Bu değer yüksek ya da düşük olması malzemenin sertliğine göre değişiklik göstermektedir. Frekans yine 40 Hz. olarak belirlenmiş ve oda sıcaklığında ön çatlak oluşumu tamamlanmıştır.

Ön çatlak oluşturulan numunelere $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de yük kontrollü olarak (0.05 kN/s) yorulma deneyi uygulanmış ve uygulanan yüke bağlı olarak çatlak açılma mesafesi ve kırılma tokluğu yük değerleri hesaplanarak Şekil 5.11'de grafiksel olarak sunulmuştur. Düşük sıcaklık sağlanması için kırılma esnasında numuneler kırılma tokluğu düzeneğiyle beraber özel bir kabinin içerisine alınmış ve sıvı azot ile soğuma sağlanmıştır. Elde edilen kırılma tokluğu yükü ve çatlak açılma mesafesi verileri MTS Landmark cihazının kırılma analizleri için geliştirdiği özel yazılımına aktarılarak kırılma tokluğu değerleri hesaplanmıştır. R260 ve R260Mn kalite raylar yine birbirine yakın bir performans sergilemiş ve sırasıyla bu raylar için kırılma tokluğu değerleri 35,37 ve 37,91 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ olarak hesaplanmıştır. Mantarı

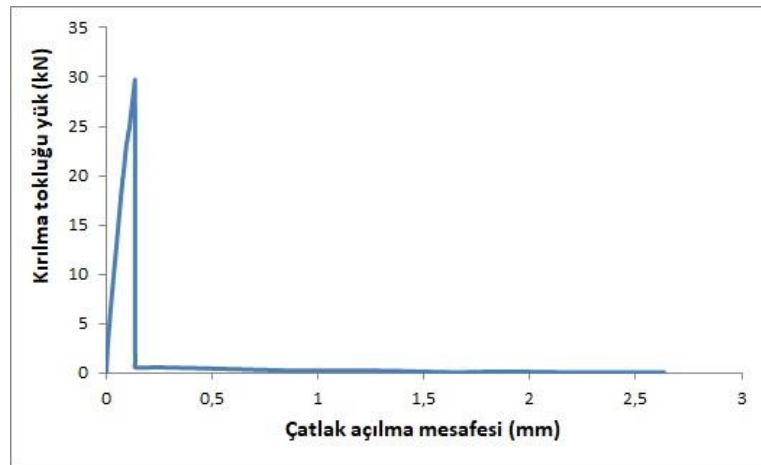
sertleştirilmiş R350HT kalite rayda ise bu kırılma tokluğu değeri 41.08 MPa√m değerine ulaşmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.11. Raylara ait kırılma tokluğu testleri (a) R260, (b) R260Mn ve (c) R350HT.

BÖLÜM 6

GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasının genel olarak amacı, farklı kalitedeki rayların sertlik, mikro yapı, kırılma tokluğu ve yorulma çatlak ilerleme hızı performanslarının karşılaştırılmasıdır. Bir diğer hedef, standartta belirtilen kalıntı gerilme ölçümüne ek olarak tahribatsız yöntemlerle de kalıntı gerilme ölçümlerinin yapılıp kıyaslanabilmesidir. Bu sayede farklı ölçüm yöntemleriyle alakalı bilgi birikiminin artırılması hedeflenmiştir. Sadece ray üreticileri açısından değil, tüm çelik malzemelerde kalıntı gerilme bir malzemenin mekanik performansları açısından önem arz ettiği için bilinmesi gerekli ve ölçüm yöntemlerinin sanayiye uyarlanması gereklidir. Bu deneysel çalışmalarda kullanılan X ışını yöntemi laboratuvar ölçekli olduğu için ölçümler yavaş sürse de mobil X ışını cihazlarının veya ilerde geliştirilmesi mümkün olabilecek tahribatsız, ultrasonik yöntemler üretim hatlarında kullanılabilir. Bu çalışma da görüldüğü gibi raylar için standart ölçüm yöntemiyle (kesme yöntemi) uyumlu sonuç veren X ışını ile kalıntı gerilme ölçümü sayesinde üretim hattına düşen tüm numunelerin kalıntı gerilme değerlerini kısa sürede bilmek mümkün olabilecektir. Ayrıca bu çalışmanın önemli amaçlarından biri de bu kalıntı gerilme değerleriyle yorulma ve kırılma tokluğu performanslarının nasıl değiştiğidir. Yapılan tüm deneysel çalışmalar neticesinde özetle aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Mikroyapı ve sertlik sonuçları birlikte ele alındığında, R350HT kalite mantarı sertleştirilmiş rayın ince perlitik yapıya sahip olduğu sertlik değerlerinin ise diğer raylara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. R260 ve R260Mn arasında mikro yapısal ve sertlik açısından belirgin bir fark gözlemlenememiştir.

- Kesme yöntemiyle ve X ışını yöntemiyle kalıntı gerilme ölçüm sonuçlarına göre, en düşük kalıntı gerilme değeri R350HT kalite rayda gözlemlenmiştir. Ölçüm yöntemlerinin kendi arasında tutarlı olduğu görülmüştür.
- R260 ve R260Mn kalite raylar kendi aralarında kıyaslandığında, Mangan miktarı daha fazla olan R260Mn nispeten daha yüksek kırılma tokluğuna ve daha düşük yorulma çatlak ilerleme hızına sahiptir. Manganın normal şartlarda çeliğe ilave edilmesiyle yapıdaki kükürtü bağlamakta ve dayanımı yükseltmektedir. Bu yüzden R260Mn kalite rayda mangan miktarının diğer kalite raya göre daha fazla olması muhtemel mukavemet artışına ve neticesinde yorulma çatlağının daha ilerlemesine neden olabilmekte ve kırılma tokluğu performansını da deneysel olarak geliştirebilmektedir. Teorik olarak ray standardı incelendiğinde genellikle R260 ve R260Mn kalite raylar için sertlik, kırılma tokluğu ve çatlak ilerleme gibi deneylerde aynı referans aralıklarda olması gerektiği sadece belirtilmiştir. Yapılan deneysel analizlerde ise R260Mn kalite rayın göstermiş olduğu performans bir miktar daha iyi yöndedir. R260 kalite ray ile aynı kimyasal kompozisyona sahip R350HT kalite ray diğer deney numuneleriyle karşılaştırıldığında, kırılma tokluğu değerinin daha yüksek, yorulma çatlağının ilerleme hızının daha düşük olduğu görülmüştür. Soğuma ızgaralarında mantar bölgesine yapılan ekstra soğuma işlemlerinde, östenit bölgesinden perlitik bölgeye geçişte diğer raylara göre daha düşük sıcaklıklarda faz dönüşümleri gerçekleşmekte, çekirdeklenme hızı daha yüksek olmakta ve bu da daha ince perlitik yapının oluşmasına olanak sağlamaktadır. İnce perlitik yapıdan dolayı mekanik özellikleri ve yorulma, tokluk performansları bu kalite raylar için daha iyi olabilmektedir.
- Kalıntı gerilme değerleri düşük olan rayların sertliğinin biraz daha yüksek, yorulma çatlak ilerleme hızının daha yavaş ve kırılma tokluğu değerlerinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Hem kalıntı gerilme yöntemlerinin kendi arasında optimizasyonu hem de kalıntı gerilme-yorulma-tokluk özelliklerinin formülize edilebilmesi için çok daha fazla veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışması tüm bu analizlerin kendi arasında belirtildiği şekilde ilişkili olduğunu ortaya koymuştur.

KAYNAKLAR

1. Ergin, H., “Bazik oksijen fırınının yapay agrega olarak esnek üst yapılarda alt temel ve temel tabakalarında kullanılabilirliğinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 16 (2017).
2. Geerdes, M., Toxopeus, H., “Modern Blast Furnace Ironmaking.”, *IOS Press*, Amsterdam, 9- 10 (2009).
3. Ariyama, T., “Evolution of blast furnace process toward reductand flexibility and carbon dioxide mitigation in steel works”, *ISIJ International.*, 14 (2): 1681-1696 (2016).
4. Turkdogan, E. T., Fruehan, R. J., “Fundamentals of Iron and Steelmaking”, Pyrometallurgy & Thermochemistry, *The AISE Steel Graw Hill*, Pittsburgh, 1-145 (1998).
5. Gözdamla, E., “The investigation of the reyclability of the iron minerals in the blast furnace flue dusts”, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 3-5 (2020).
6. Yıldırım, M., “Yüksek fırında scaffold (skaffold) önleme metotlarının analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 5-13 (2012).
7. Bozkurt, E., “Yüksek fırın analizi ve yapay sinir ağı ile modellemesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 9-14 (2007).
8. Aydın, Ö., “Yüksek fırın işletmeciliğinde optimizasyon”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 3-5 (2005).
9. Keskinılıç, E., “Examination of the desulfurization behaviour of ladle furnace slags of a low sulfur steel”, Doktora Tezi, *The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University*, Ankara, 4-5 (2007).
10. Nita, P. S., “Evaluation of some self-sustained capillary effects taking place in slag at the interface during desulphurization process”, *Material Science and Engineering A*, 495: 320-325 (2007).
11. Ozmen, K., Eskiuyurt, T. G., Şahin, H., Erkal, H., Kocabaş, T., Çakır, A. M., Atan, B. S., “Sıvı Ham Demir Kükürt Giderme Prosesinde Kullanılan Granüle Magnezyum Tüketiminin Seviye-2 Yazılımı ile Optimizasyonu”, *II.19th International Metallurgy & Materials Congress*, İstanbul, 908-911 (2018).

12. Huang, H., Chai, T., Luo, X., Zheng, B., and Wang, H., “Two stage method and applicaion for molten iron-making plants and steel making plants”, *Proceedings of the 18th World Congress*, Milano, 9476-9481 (2011).
13. Shigemori, H., “Desulphuriation control system through locally weighted regression model”, *Proceedings IFAC Workshop on Automation in the Mining, Mineral and Metal Industries*, Gifu, 234-239 (2012).
14. Sağlam, M., “Bazik oksijen fırınlarında refrakter astar ömrünün artırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 6 (2006).
15. Fruehan, R. J., “Overwiev of Steelmaking Process and Theşr Development”, Pyrometallurgy & Thermochemistry, *The AISE Steel Graw Hill*, Pittsburgh, 1-12 (1998).
16. Terpak, J., Lacial, M., Kacur, J., “Endpoint Prediction of Basic Oxygen Furnace Steelmaking Based on Gradient on Relative Decarburization Rate”, *II. 2020 21th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, Slovakia, 1-4 (2020).
17. Bilgiç, Ç. D., “Effect of the bottom stirring on basic oxygen steelmaking”, Yüksek Lisans Tezi, *The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 24-30 (2016).
18. Emiroğlu, H. İ., “Bazik oksijen fırını (bof) ile çelik üretim prosesinde kullanılan endüstriyel fandaki aşınmaların iyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 6 (2019).
19. Okur, S., “Çelikhane (bof) tesisinde yapar sinir ağı (ann) uygulamaları ile karbon (c) ve fosfor (p) tahmini”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 3-5 (2019).
20. Kayrak, A., “Bazik oksijen fırını için külçe alüminyum besleme sistemi tasarımı ve optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay, 27-29 (2016).
21. Özbek, A., “Bazik oksijen fırınında yapar sinir ağlarının uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 7-20 (2007).
22. Carlson, N. R., “Model fort he basic oxygen process in steel refining”, *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics.*, 2 (1): 41-44 (1966).
23. Conejo, A, N., Lara, F, R., Hernandez, M, M., “Steel Research International”, *Wiley-Blackwell.*, US, 141-150 (2007).
24. Aydemir, O., “Use of aluminium dross for slag treatment in secondary steelmaking to decrease amount of reducible oxides in ladle furnace”, Yüksek

Lisans Tezi, *The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 21-28 (2007).

25. Dumitru, M. G., “Steel refining possibilities”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 294 (012018): 1-6 (2017).
26. Yuasa, G., Yajima, T. And Ukai, A., “Refining practice and application of the ladle furnace (lf) process in japan”, *Transactions ISIJ.*, 24 (2): 412-418 (1984).
27. Özdemir, M. M., “Sürekli döküm yöntemi ile çelik üretimine ait proses optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 10-14 (2007).
28. Mishra, S. K., and Jha, P. K., “Inclusion removal study in multistrand tundish with turbostopper”, *Ind. Advances in Science and Engineering Technology International Conferences*, Abu Dhabi, 1-4 (2018).
29. Zu, L., Meng, H., and Xie, Z., “Coupled numerical simulation of fluid field and temperature field in five-strand tundish of continuous casting”, *2011 International Conference on Electric Information and Control*, Wuhan, 251-255 (2011).
30. Cockerell, R. A., Grabe, S. F., Elsey, G., Crisafulli, S. And Goodwin, G. C., “Design study for continuous caster tundish weight control and ladle steel flow estimate”, *2011 IFAC Automation in Steel*, Korea, 235-240 (1997).
31. Zheng, L., “Elastic Vibration Research of the Non-sinusoidal Oscillation System for the Mold of Continuous Casting”, *Proceedings of 2011 International Conference of Electronic & Mechanical Engineering and Information*, Harbin, 2920-2923 (2011).
32. Xudong, W., Zhaofeng, W., Man, Y., “Particle Swarm Optimization for Estimation on Mould Oscillation for Continuous Casting Process”, *2011 Seventh International Conference on Natural*, Shanghai, 2226-2229 (2011).
33. Akpınar, M., “Minimization of banned structure in spring steels by the optimization of continuous casting machine parameters”, Yüksek Lisans Tezi, *The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 15-17 (2019).
34. Çelik, E., “Yeni bir kalıp kullanımının ve ikincil soğutma iyileştirmelerinin çeliklerin sürekli döküm süreci üzerine etkilerinin incelenmesi: bir sanayi uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Osmaniye, 23-28 (2019).
35. Ji, Z., Yang, J., “Online Dynamic Control of Secondary Cooling for the Continuous Casting Process”, *2010 Third International Conference on Intelligent Networks and Intelligent*, Shenyang, 269-272 (2010).
36. Worapradya, K. and Thanakijkasem, P., “Optimum Spray Cooling in Continuous Slab Casting Process under Productivity Improvement”, *2009*

IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Hong Kong, 120-124 (2009).

37. Haddehaneler Müdürlüğü, “Hizmetiçi Eğitim Notları”, Kardemir A.Ş., Yayın No:33 Karabük (2020).
38. Çınar, K., Toktaş, G., Aralık. 19, *Mühendis ve Makina*, 36: 48-56 (2019).
39. Yiğit, O., Dilmeç, M., Halkacı, S., Nisan. 08, *Mühendis ve Makina*, 49 (579):20-27 (2008).
40. Borazan, K. S., “Partikül takviyeli kompozitlerin kırılma tokluğunun belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Uşak, 38-42 (2018).
41. Bican, İ. E., “Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tabakalı kompozitlerde arayüzey kırılma tokluğunun analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 1-11 (2016).
42. ARASAN, Ş., “Hibrit kompozitlerin kırılma tokluğunun belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Uşak, 19-27 (2014).
43. TS EN 13674-1: Railway Applications – track – rail – Part 1: Vignole railway rails 46kg/m and above. Brussels, 2011.
44. Turan, M. E., Ozcelik, S., Husem, F., “The effect of head hardening process on the residual stress of rails”, *Proc. IMechE. Part F: J Rail and Rapid Transit* 1–7 (2016).
45. Ozcelik S. “Mantar Sertlestirilmis, raylarda yorulma davranislarinin incelenmesi”. *Yildiz Technical University*, Master Thesis, 2014.
46. Anderoglu O. “Residual stress measurement using X-ray diffraction”. PhD Thesis, *Texas A&M University*; 2005.
47. Luo Q, Jones AH. “High-precision determination of residual stress of polycrystalline coatings using optimised XRD-Sin² ψ technique”. *Surf Coat Technol.* 2010;205(5):1403–1408.
48. ASTM E399-20 Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials.

ÖZGEÇMİŞ

Sabri ERTAN 1991 yılında Karabük'te doğdu, ilk ve orta öğrenimini Antalya'da tamamladı. Antalya H. Duda – Mehmet GEBİZLİ lisesinden mezun oldu. Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2015 yılında mezun oldu. 2017 yılında KARDEMİR A.Ş. Sürekli Dökümler Müdürlüğü'nde Sürekli Döküm Makineleri İşletme Mühendisi olarak göreve başladı ve halen aynı fabrikada çalışmaya devam etmektedir. 2017 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Öğlebeli Mah. İstiklal Cad. No:35 / KARABÜK

Tel : (538) 691 5878

E-posta : sabriertan@gmail.com