

**R260 KALİTE TREN RAYLARINDA KALINTI
GERİLMENİN BELİRLENMESİ VE BUNUN
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

**2015
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

Muhammet Emre TURAN

**R260 KALİTE TREN RAYLARINDA KALINTI GERİLMENİN
BELİRLENMESİ VE BUNUN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Muhammet Emre TURAN

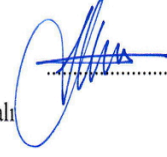
**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Ocak 2015**

Muhammet Emre TURAN tarafından hazırlanan “R260 KALİTE TREN RAYLARINDA KALINTI GERİLMENİN BELİRLENMESİ VE BUNUN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Yavuz SUN

Tez Danışmanı, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

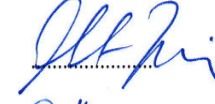


Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir. 12/01/2015

Unvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Cevdet GÖLOĞLU (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Yavuz SUN (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Hayrettin AHLATCI (KBÜ)

...../...../2015

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Mustafa BOZ

Fen Bilimleri 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.”

Muhammet Emre TURAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

R260 KALİTE TREN RAYLARINDA KALINTI GERİLMENİN BELİRLENMESİ VE BUNUN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Muhammet Emre TURAN

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Yavuz SUN

Ocak 2015, 64 sayfa

Bu çalışmada, EN 13674-1 standartına göre aynı döküm numarasına sahip altı adet R260 kalite raylarda kalıntı gerilme ölçümleri yapılmış, değerlerde farklılık gösteren raylardan numuneler alınarak mekanik özellikleri ve mikroyapıları incelenmiştir.

Kalıntı gerilme ölçümünün ardından bütün numunelere Brinell sertlik testi yapılmış, kalıntı gerilme ile sertlik arasında ilişki kurulmuştur. Ray mantarının RS ve merkez bölgesine özellikle dikkat edilmiştir. Kalıntı gerilme değeri en yüksek olan, kalıntı gerilme değeri en düşük olan ve ortalama değerlerde olan, toplam üç adet numune mikroyapı incelemelerine tabii tutulmuştur. Sertlik dağılımı yapılan bölgelerden optik mikroskop ile mikroyapı görüntüleri çekilmiş, mantar bölgelerinin RS kısımlarından numuneler alınarak, gerekli metalografik prosedürler uygulandıktan sonra XRD ile faz incelemeleri, SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Lameller arası

mesafe ölçülerek, kalıntı gerilme ve mikroyapı arasında ilişkiler kurulmuştur. Tahribatlı yöntemle yapılan kalıntı gerilme ölçümüne ek olarak, tahribatsız yöntemlerden X ışını kırınımı yöntemi kullanılarak seçilen bu üç ray numunesine kalıntı gerilme ölçümü yapılmıştır. Böylelikle bu iki yöntem kendi aralarında kıyaslanmıştır. Kalıntı gerilme ölçümlerinin ve yapılan mikro yapı analizlerinin ardından bu üç ray numunesine çekme testleri yapılmıştır. Akma, çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri kaydedilmiş kalıntı gerilme değerleriyle ilişki kurulmuştur.

Kalıntı gerilme değeri en yüksek olan rayda sertlik değerleri en fazla çıkmıştır. RS bölgelerinde yapılan incelemeler neticesinde, kalıntı gerilme değeri en yüksek olan rayın lameller arası mesafe değeri en düşük çıkmıştır. Bu bölgede optik mikroskop görüntülerine bakıldığında ferrit yapının en az olduğu görülmüştür. Kalıntı gerilmesi en düşük olan rayın akma ve çekme mukavemeti en düşük, kalıntı gerilme değeri en yüksek olan rayın akma ve çekme mukavemeti en yüksek çıkmıştır.

Anahtar Sözcükler : R260 kalite ray, kalıntı gerilme, mikroyapı ve mekanik özellikler.

Bilim Kodu : 915.1.092

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

RESIDUAL STRESS MEASUREMENT IN R260 QUALITY RAILWAY RAILS AND INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES

Muhammet Emre TURAN

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Yavuz SUN

January 2015, 64 pages

In this study, residual stress of R260 quality railway rails were measured according to the standardization. By preparing specimens from rails which had different residual stress values, mechanical and microstructure properties were examined.

For residual stress measurement, cutting method that was related in EN 13674-1 standardization were used. After the residual stress measurement, brinell hardness of all samples were measured thus, between residual stress and hardness relationship was established. Especially RS of rail head was examined. The microstructure of three specimens, one of these has biggest residual stress value, other one has average and the other has lowest residual stress value were analyzed. Microstructures images were taken from hardness distribution regions by optical microscope. After specimens were prepared in RS of rail head with a metallographic procedure, XRD phase

analysis, SEM and EDX tests were performed. Thanks to these tests, the relationship between lamellar spacing and residual stress was established. In addition to destructive test, X ray diffraction method was performed to these three specimens for residual stress measurements. Thus these two methods were compared with each other. After the residual stress measurements and microstructure analysis, tensile tests were performed for three rails. Yield, tensile strength and percent elongation values were recorded then the relationship was established between residual stress and mechanical properties.

Maximum hardness was seen in rail which had biggest residual stress value. In this rail, when RS region was examined, distance between lamellar was the lowest. Yield and tensile strength value changed directly proportional with residual stress

Key Words : R260 quality rail, residual stress, microstructure and mechanical properties.

Science Code : 915.1.092

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Yavuz SUN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsünde ve Metalurji Malzeme Mühendisliğinde çalışan öğretim üyesi hocalarım ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca bugüne kadar maddi ve manevi hiçbir yardımı esirgemediğim yanımda oldukları için sevgili aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	3
GİRİŞ	3
BÖLÜM 2	4
DEMİR YOLU RAYLARI ÜRETİMİ	4
2.1. YÜKSEK FIRIN PROSESİ	4
2.2. ÇELIKHANE PROSESLERİ	3
2.2.1. Bazık Oksijen Konverteri	4
2.2.2. Pota Fırını ve Vakum Altında Gaz Giderme	5
2.2.3. Sürekli Döküm	5
2.3. HADDEHANE PROSESLERİ	6
2.3.1. Ray Çeliğinin Tavlanması	7
2.3.2. Ray Çeliğinin Haddelenmesi	7
2.4. ÖZELLİKLERİNE GÖRE RAY SINIFLARI	8
2.4.1. Doğal Olarak Sert Raylar	9
2.4.3. Yüksek Alaşımli Raylar	9
2.4.4. Beynitik Raylar	10
2.4.5. Korozyona Dirençli Raylar	10

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 3	11
KALINTI GERİLMELER	11
3.1. TAHRİBATLI KALINTI GERİLME ÖLÇME YÖNTEMLERİ	14
3.1.1. Tabaka Kaldırma Yöntemi	14
3.1.2. Delik Delme Yöntemi (Hole Drilling Method)	16
3.1.3. Halka Çekirdek Yöntemi (Ring Core Method)	16
3.1.4. Kanal Açma Yöntemi (Crack Compliance Method)	17
3.1.5. Kesit Profili Ölçme Yöntemi (Contour method)	18
3.1.6. İnce Kesitlere Ayırma Yöntemi (Sectioning Method).....	18
3.2. TAHRİBATSIZ KALINTI GERİLME ÖLÇME YÖNTEMLERİ.....	19
3.2.1. Kırınım Yöntemleri	19
3.2.2. X-ışını Kırınımı Yöntemi:	20
3.2.3. Şiddetli X-ışını Kırınımı	21
3.2.4. Nötron Kırınımı	21
3.2.5. Ultrasonik Yöntemler	21
3.2.6. Manyetik Yöntemler	21
3.2.7. Termoelastik Yöntemler	22
BÖLÜM 4	23
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	23
4.1. KALINTI GERİLME ÖLÇÜMÜ	23
4.2. SERTLİK TESTİ.....	29
4.3. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU	30
4.3.1. Optik Mikroskop Çalışmaları	30
4.3.2. SEM Çalışması	31
4.3.3. XRD Çalışması	31
4.4. ÇEKME TESTİ	32
BÖLÜM 5	33
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	33
5.1. KALINTI GERİLME ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	33
5.1.1. Kesme Yöntemi Ölçüm Sonuçları	33

	<u>Sayfa</u>
5.1.2. X Işını Kırınımı Ölçüm Sonuçları	37
5.2. SERTLİK ÖLÇÜM SONUÇLARI	38
5.3. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU	39
5.4. SEM KARAKTERİZASYONU.....	43
5.5. XRD KARAKTERİZASYONU	50
5.6. ÇEKME TEST SONUÇLARI.....	51
BÖLÜM 6	52
DENEYSEL SONUÇLARIN İRDELENMESİ.....	52
6.1. KALINTI GERİLME SERTLİK İLİŞKİSİ	52
6.2. KALINTI GERİLME MİKROYAPI İLİŞKİSİ	53
6.3. KALINTI GERİLME LAMELLER ARASI MESAFE İLİŞKİSİ.....	55
6.4. KALINTI GERİLME AKMA VE ÇEKME MUKAVEMETİ İLİŞKİSİ.....	58
BÖLÜM 7	59
SONUÇLAR	59
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Yüksek fırın tepkimeleri	3
Şekil 2.2. Bazık oksijen fırını ve ekipmanları.....	4
Şekil 2.3. Sürekli döküm şeması	6
Şekil 2.4. Ray haddehanesi merdane pasoları	7
Şekil 2.5. Ray doğrultma ünitesi	8
Şekil 3.1. Kalıntı gerilme ölçme yöntemleri	14
Şekil 3.2. Numunedeki gerilme dağılımı	15
Şekil 3.3. Delik delme yöntemi ve halka çekirdek yöntemi	16
Şekil 3.4. Kanal açma yöntemi	17
Şekil 3.5. Kesit profili ölçme yöntemi	18
Şekil 3.6. İnce kesitlere ayırma yöntemi	19
Şekil 3.7. X ışını kırınım yöntemi	20
Şekil 4.1. Ray numunesinin ölçülerek çizilmesi	24
Şekil 4.2. Ray numunesinin otomatik zımpara taşı ile temizlenmesi	24
Şekil 4.3. Deney numunesinin temizlenmesi	25
Şekil 4.4. Ray numunesinin nötrleştirici ile temizlenmesi.....	25
Şekil 4.5. Strain gage'in plate'e yapıştırılması	26
Şekil 4.6. Strain gage'in raya yapıştırılması	26
Şekil 4.7. Strain gage'in yapıştırılması	26
Şekil 4.8. Strain gage'e katalizör sürülmesi.....	27
Şekil 4.9. Kabloların strain gage'e lehimlenmesi	27
Şekil 4.10. Veri alma cihazı	28
Şekil 4.11. TS EN 13674-1 standardına göre sertlik değerlerinin alınacağı bölgeler	29
Şekil 4.12. Sertlik ölçümlerinin yapıldığı Qness marka universal sertlik cihazı	29
Şekil 4.13. Mikroyapı görüntüleri için numune çıkarılacak bölgeler	30
Şekil 4.14. MA200 optik ışık mikroskobu	31
Şekil 4.15. Carl-Zeiss Ultra Plus SEM cihazı	31
Şekil 4.16. X-ray çekimlerinin yapıldığı Rigaku Ultima IV xrd cihazı	32

	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.17. MTS 100 kN çekme cihazı	32
Şekil 5.1. Ray 1 için ölçüm sonucu.....	34
Şekil 5.2. Ray 2 için ölçüm sonucu.....	34
Şekil 5.3. Ray 3 için ölçüm sonucu.....	35
Şekil 5.4. Ray 4 için ölçüm sonucu.....	35
Şekil 5.5. Ray 5 için ölçüm sonucu.....	36
Şekil 5.6. Ray 6 için ölçüm sonucu.....	36
Şekil 5.7. Kalıntı gerilme sonuçları.....	37
Şekil 5.8. Sertlik ölçüm noktaları.....	38
Şekil 5.9. Ortanca kalıntı gerilme değerine sahip raya ait mikroyapı görüntüleri (500X).....	40
Şekil 5.10. En düşük kalıntı gerilme değerine sahip raya ait mikroyapı görüntüleri (500X).....	41
Şekil 5.11. En yüksek kalıntı gerilme değerine sahip raya ait mikroyapı görüntüleri (500X).....	42
Şekil 5.12. En düşük kalıntı gerilme değerine sahip raya ait SEM görüntüleri	44
Şekil 5.13. En düşük kalıntı gerilme değerine sahip raya ait SEM görüntüsü ve EDS analizi	45
Şekil 5.14. En düşük kalıntı gerilme değerine sahip raya ait EDS pikleri	45
Şekil 5.15. Ortanca raya ait SEM görüntüleri	46
Şekil 5.16. Ortanca raya ait SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	47
Şekil 5.17. Ortanca raya ait EDS pikleri	47
Şekil 5.18. En yüksek kalıntı gerilme değerine sahip raya ait SEM görüntüleri	48
Şekil 5.19. En yüksek kalıntı gerilme değerine sahip raya ait SEM görüntüsü ve EDS analizi	49
Şekil 5.20. En yüksek kalıntı gerilme değerine sahip raya ait EDS pikleri	49
Şekil 5.21. Rayların faz analizleri	50
Şekil 6.1. Raylarda oluşan basma ve çekme kalıntı gerilme bölgeleri.....	52
Şekil 6.2. Kalıntı gerilme sertlik ilişkisi.....	53
Şekil 6.3. Ray yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri	54
Şekil 6.4. Ray yüzeylerinin lameller arası mesafe değerleriyle birlikte SEM görüntüleri	56
Şekil 6.5. Kalıntı gerilme ve lameller arası mesafe ilişkisi.....	57
Şekil 6.6. Kalıntı gerilme akma çekme mukavemeti ilişkisi.....	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. TCDD için ray çeliğinin kimyasal kompozisyonları.....	5
Çizelge 2.2. Farklı kalite rayların kimyasal bileşimleri ve çekme mukavemetleri.....	9
Çizelge 2.3. Beynitik rayların mekanik özellikleri	10
Çizelge 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan rayın kimyasal kompozisyonu	23
Çizelge 5.1. Ölçülen değerler ve hesaplanan kalıntı gerilmeler.....	33
Çizelge 5.2. Kalıntı gerilme ölçümünde kullanılan parametreler	38
Çizelge 5.3. X ışını kırınımı yöntemiyle yapılan kalıntı gerilme ölçüm sonuçları ...	38
Çizelge 5.4. Sertlik ölçüm sonuçları	39
Çizelge 5.5. Numunelere yapılan x-ışını çekimleri sonucu elde edilen fazlar.....	50
Çizelge 5.6. Raylara ait çekme test sonuçları	51
Çizelge 6.1. Kalıntı gerilme lameller arası mesafe ilişkisi	57
Çizelge 6.2. Kalıntı gerilme akma ve çekme mukavemeti ilişkisi.....	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- Rm : Çekme mukavemeti
Ra : Akma mukavemeti
S : Stress
kN : kilonewton
MPa : MegaPascal
C : Karbon
Fe : Demir
Cr : Krom
Co : Kobalt
Mn : Manganez
Si : Silisyum

KISALTMALAR

- SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
EDS : Electron Diffraction Scanning (Elektron Difraksiyon Taraması)
XRD : X-Ray Diffractometer (X-ışını Difraktometresi)
LOM : Optik Mikroskop
OBM : Oxygen and Lime Bottom Blowing Process (Altan oksijen ve kireç üfleme prosesi)
LD : Linz-Donowiz
LDAC : Argon yöntemli konverter tipi
CVD : Chemical Vapor Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme)
PVD : Physical Vapor Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
TCDD : Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
UIC : International Union Of Railway (Uluslararası Demir Yolları Birliği)

- EN : European Norm (Avrupa Standardı)
- ISO : International Organization Of Standardization
- ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika Malzeme Testleri Birliği)
- HB : Hardness of Brinell (Brinell Sertlik)
- R : Rail (Ray)
- RS : Rail Surface (Ray Yüzeyi)
- PPM : Part Per Million (Milyonda Bir)
- BOF : Basic Oxygen Furnace (Bazik Oksijen Fırını)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Raylar demiryolu altyapısının önemli bir parçasıdır. Demiryolu sektöründe yerli demiryolu sanayinin oluşturulması sektöre yönelik ar-ge faaliyetlerinin arttırılması ile doğrudan ilişkilidir. Ülkemizde yerli sanayinin gelişmesi ve dışa bağımlılığın azaltılması için rayların iyileştirilmesi gerekmektedir. Performans artışını sağlamak için raylarda ihtiyaç duyulan ana özellikler; aşınma direnci, yorulma direnci, plastik deformasyon direnci, kaynaklanabilirlik ve kalıntı gerilmelerin giderilmesi işlemleridir.

Kalıntı gerilmeler çeşitli üretim ve imalat aşamalarından sonra parçada kalan elastik gerilmelerdir. Kalıntı gerilmeler, parçanın performansını ve ömrünü önemli derecede etkiler. Çekme kalıntı gerilmeleri malzemenin yorulma ömrünü azaltıp erken bir hasara neden olabilirken, basma kalıntı gerilmelerin malzemenin yorulma ömrünü arttırıcı etkisi vardır. Ayrıca basma kalıntı gerilmelerinin malzemenin kırılma mukavemeti ve gerilme korozyonu üzerinde olumlu etki yaptığı bilinmektedir. Bu nedenle, malzemenin kalıntı gerilme durumunun bilinmesi onun çalışacağı ortamda nasıl davranacağı konusunda bilgi vermektedir.

Bu çalışmada, kalıntı gerilme ölçümleri kesme yöntemi kullanılarak yapılmış ve kalıntı gerilme değerleriyle, yapılan mekanik testler neticesinde mekanik özellikler ile ilişkiler kurulmuştur.

BÖLÜM 2

DEMİR YOLU RAYLARI ÜRETİMİ

II. Dünya Savaşı'na kadar ray çeliği üretiminde bazik Bessemer, asidik Bessemer, elektrik fırını ve Siemens-Martin fırınları kullanılmaktaydı. 1950-1960 yılları arasında oksijen üfleme üfleme üretim kullanılmaya başlandı. 1967 yılında ise OBM (Alttan oksijen ve kireç üfleme prosesi) metodu kullanılmaya başlandı. Bu metod sıcak metal banyosuna oksijen üflenerek uygulanan bir çalışma şeklidir. OBM metodunda da, LD (Linz-Donowiz) ve LDAC (Argon yöntemli konverter tipi) gibi saf oksijen kullanılır. Bu uygulamada oksijenin verildiği nozullarda alev oluşuyorsa soğutma çok önemlidir [1].

Ülkemizde ray çeliği BOF yöntemi ile üretilmektedir. Bu üretimin ana kademeleri şu şekildedir;

- Yüksek Fırın Prosesi
- Çelikhane Prosesleri
- Haddehane Prosesleri

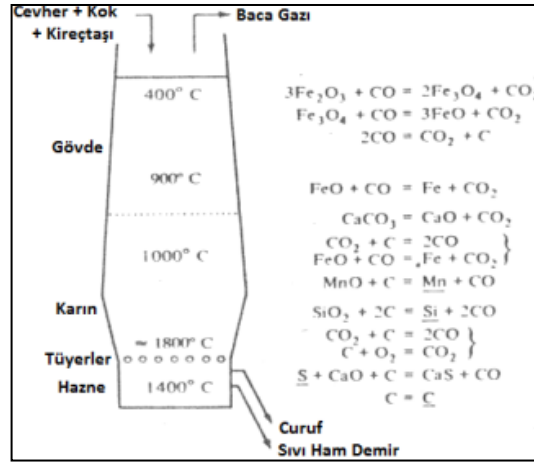
2.1. YÜKSEK FIRIN PROSESİ

Yüksek fırın prosesinde ray üretimi için çok özel bir kademe yoktur ancak, üretilen sıvı ham demirin olabildiğince kükürt, fosfor gibi kirleticilerden arınması gerekmektedir.

Genel olarak yüksek fırından sıvı ham demir eldesini incelediğimizde şarj malzemeleri olarak; kok, demir cevheri, curuf yapıcı katkıları ön plana çıkmaktadır. Kok kömürü, taş kömürünün kok fırınlarında uçucu maddelerden arınması sonucu oluşan ve yüksek fırın şartları için uygun fiziksel ve kimyasal özelliklere haiz bir yakittir.

Demir cevheri, sinter ya da pelet olarak yüksek fırına şarj edilen demirce zengin ham maddedir. Curuf yapıcı olarak genelde kireç taşı kullanılır. Şarj içerisindeki kirletici maddeleri curuf fazından toplama için fırın içerisine şarj edilir [2].

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, demir doğada saf halde bulunmadığı için yüksek fırında redüklenerek sıvı ham demir halini alır. Bu redüklenme için kok kömürünün yanması ve CO oluşturması gerekir. Kok kömürünün yanması için fırına sürekli tüyerlerden yaklaşık 1000°C sıcaklığında hava verilir. Verilen havanın miktarı fırın kapasitesi, çalışma şekli ve üretime göre değişebilir [3].



Şekil 2.1. Yüksek fırın tepkimeleri [4].

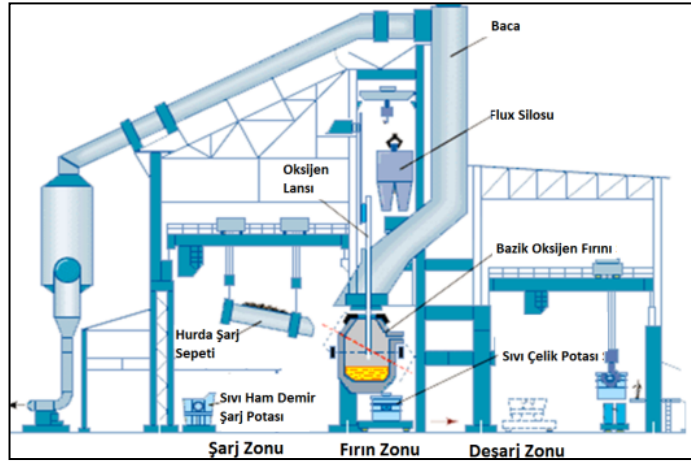
Fırının ağız kısmından şarj edilen malzemenin redüklenmesi, sıvı ham demirin yapısına karbon alması ve curufun oluşması yaklaşık olarak 9 saat sürer. Yüksek fırın sürekli çalışan bir sistem olduğu için periyodik olarak şarj edilir, hammaddler yüklenir ve hazne kısmında biriken sıvı ham demir ve curuf alınır [2].

2.2. ÇELIKHANE PROSESLERİ

Yüksek fırınlardan alınan sıvı ham demir çelikhane ray çeliği için nihai kimyasal bileşimine kavuşur. Bu işlemler işlemler için ilk olarak sıvı ham demir sıvı çelik haline gelmeli ve istenilen kimyasal bileşime kavuşmalıdır.

2.2.1. Bazik Oksijen Konverteri

Bazik oksijen konverteri (BOF) olarak bilinen metot çelik üretiminde büyük bir öneme sahiptir. Ülkemizde üretim yapmakta olan üç adet entegre tesis vardır ve hepsinde de bu yöntem uygulanmaktadır. Modern bir fırın bir seferde yaklaşık 150-350 ton civarında malzeme alabilir ve bunu 40 dakikada çelik bileşimine getirebilir. Sıvı ham demir BOF'un en önemli girdisidir, şarjın yaklaşık olarak %80'ini oluşturur. Bu nedenle buradan gelecek kirletici element miktarı da fazladır. Bu olumsuz etkiyi yok etmek için sıvı ham demir, BOF'a alınmadan önce, kükürt giderme işlemine tabii tutulur [2].



Şekil 2.2. Bazik oksijen fırını ve ekipmanları [2].

BOF'a yüklenen sıvı ham demir ve hurda üzerine lans yardımıyla kuru ve saf oksijen üflenir. Ayrıca oksijen üflemesi yapılırken akışkanlığı artırmak ve curuf oluşumunu sağlamak için kireç ilave edilir. Bu sayede istenmeyen elementler oksitlenerek curuf fazını oluştururlar ve yoğunlukları düşük olduğu için sıvı çeliğin yüzeyinde birikirler. Bu işlemlerin ardından kimyasal bileşimi incelenen sıvı çelik, uygun bulunursa, döküm deliğinden çelik potasına alınır ve pota ocağına gönderilir. Curuf ise BOF'un ağzından curuf potasına alınır. Potaya alınan sıvı çeliğe ihtiyaca göre kömür ve alüminyum ilave edilir. İlave edilen kömür, % C miktarını belirlerken, alüminyum sıvı çelikte içerisinde kalan oksijeni bağlayarak çeliğin mukavemetinin düşmesini önler. Burada dikkat edilmesi gereken konu, oksijen üflemesidir. Çünkü oksijen az

üflenirse sıvı çelik yeterince temizlenemez ve istenilen kimyasal bileşim yakalanamaz, çok üfleme yapıldığında ise sıvı çelik bünyesine fazla oksijen girecektir ve deoksidasyon için fazla alüminyum kullanımına sebep olacaktır. Alüminyumun fazla kullanılması ise sürekli dökümde problem çıkaracaktır [2].

2.2.2. Pota Fırını ve Vakum Altında Gaz Giderme

Pota fırını sıvı çeliğin nihai bileşimine kavuştuğu istasyondur. Burada malzeme üzerinde bir curuf tabakası oluşturulur ve bu tabaka üzerinden arkla malzeme ısıtılır bununla birlikte potanın altından argon gazı verilerek karıştırılır. Bu esnada da alaşım için gerekli ilaveler yapılır. Bu sayede hem potanın her yerinde eşit kimyasal kompozisyon sağlanır hem de pota döküm için uygun sıcaklığa getirilir [2].

Bu istasyondan çıkan sıvı çelik vakum altında gaz giderme işlemine tabii tutulur. Burada vakum uygulanarak sıvı çelik içerisinde çözünen gazlar uzaklaştırılır. Bu işlem sıvı çelik bünyesindeki hidrojeni 2 ppm'im altına çekerken oksijeni tamamen yok etmeye çalışır. Hidrojen miktarının 2 ppm'in altında olması birikinti oluşumunu önler bu sayede malzemede gaz boşlukları olmayacağından mukavemeti de artar. Vakum altında gaz giderme işlemi yapılan potanın ağzı kapatılarak hava ile teması kesilir.

Çizelge 2.1. TCDD için ray çeliğinin kimyasal kompozisyonları [4].

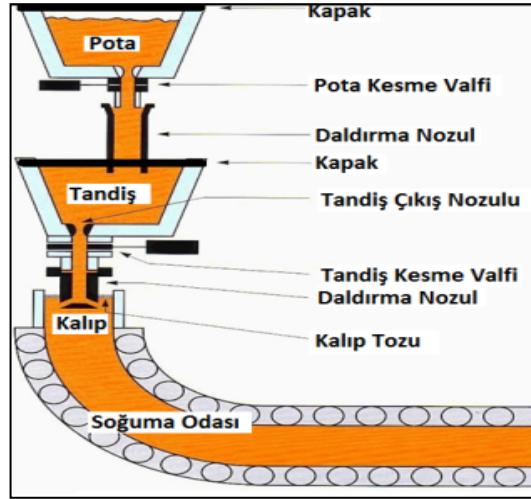
Ray Tipi	TCDD Şartnameleri/ Ağırlık %				
	C	Si	Mn	P (max.)	S
R260	0,70-0,80	0,20-0,60	0,95-1,25	0,030	0,008-0,030

2.2.3. Sürekli Döküm

Kimyasal olarak tüm değerleri sağlayan sıvı çeliğin bir ara ürün olarak katılaştırıldığı istasyondur. İngot dökümü takiben geliştirilmiş ve şuan yüksek kapasiteli ve sürekli üretim yapan tesislerin kullandığı bir döküm yöntemidir. Potadan tandişe akan sıvı çelik burada üç yola ayrılarak “blum” olarak adlandırılan ray taslağı haline gelmektedir. Bu prosesin ray üretimi için hassas olan noktası sıvı çeliğin kesinlikle

hava ile temas etmemesidir. Çünkü sıvı metal yüksek gaz çözünürlüğüne sahiptir. Bu hususa dikkat edilmezse vakum altında gaz giderme işlemi uygulanan çelik bünyesine tekrar gaz girişi olur. Sıvı metal ile hava temasını önlemek için potaların ağzı ve tandişin üzeri kapalı olmalı nozul çıkışlarında da gerekli önlemler alınmalıdır. Bu döküm şekline gömme döküm adı verilmektedir [2].

Tandişlerden soğutmalı bakır kalıplara akan sıvı çeliğin kalıba yapışmaması ve akışın devam etmesi için, bakır kalıplar dakikada 60-200 tur aralığında sarsılır. Burada döküm hızı yaklaşık 0.8 m/dk civarındadır. Sağlıklı katılaşma için elektromagnetik soğutma sistemi kullanılmaktadır [2].



Şekil 2.3. Sürekli döküm şeması [3].

2.3. HADDEHANE PROSELERİ

Haddehane çelikhane prosesleri neticesinde elde edilen ara ürünün nihai ürün haline geldiği tesistir. Burada ara ürünlerin tavlama, sıcak şekillendirilmesi, soğutulması ve doğrultulmasını takiben gerekli kalite kontrol işlemleri yapılmaktadır.

2.3.1. Ray Çeliğinin Tavlanması

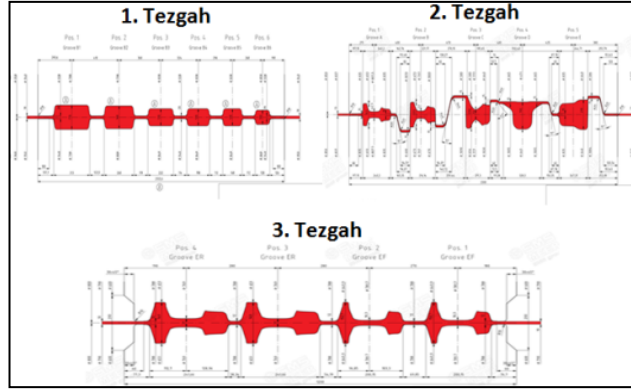
Çelikhaneden uygun kimyasal bileşimde yarı mamul olarak alınan, 260 x 360 mm kesitli, blumlar tav fırınlarında tamamı östenit bölgesine ulaşmaya kadar ısıtılırlar. Blumlar tav fırınına soğuk olarak şarj edilirler ve fırın içerisinde ilerledikçe 1250⁰C sıcaklığa kadar ulaşırlar [5].

Ray çeliği %0,60-0,80 aralığında, yüksek miktarda, karbon içerdiği için tavlama esnasında fırın şartları sürekli kontrol edilmelidir. Homojen tavlama yapılabilmesi için yakıt-oksijen oranı, fırın içi ısı rejimi ve tavlama süresi sürekli kontrol edilmelidir. Bu sayede tavlama esnasında oksidasyon, dekarburizasyon, aşırı ısınma ve yanma gibi muhtemel hatalardan sakınmış oluruz [6].

Çelik fırın içerisinde yüksek sıcaklıkta uzun süre kalırsa yanar. Çeliğin yanması, yüzeyden içeri nüfuz eden fırın gazındaki oksijene maruz kalması ve tane sınırlarında oksitlenme meydana gelmesidir. Bu sebeple tane sınırları zayıflayarak malzemenin kırılma olmasına sebep olur [6].

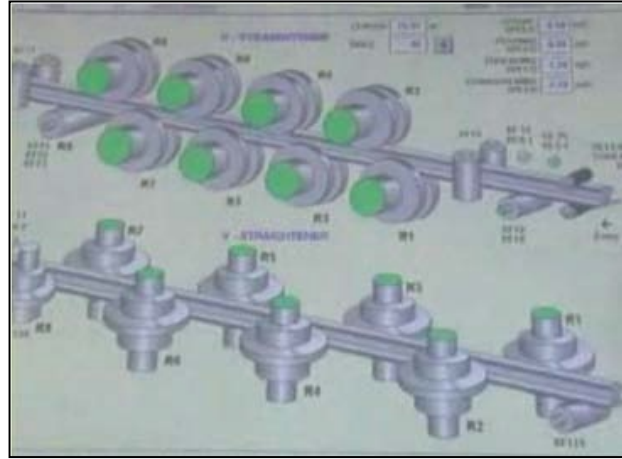
2.3.2. Ray Çeliğinin Haddelenmesi

Tamamen östenitlenen yarı mamül ray çelikleri nihai şekillendirme için üç ayrı istasyonda haddelenirler. Fırından çıkan malzeme Şekil 2.4'de görüldüğü gibi, toplam 10 pasoda nihai şeklini alır. Östenitlenen blumlar hadde tezgahlarına girmeden önce yüksek basınçlı su ile temizlenir ve yüzeylerindeki tufal tabakası alınır, aksi halde yüzeydeki tufal, haddeleme sonrası, malzemede iz bırakır. Şekillendirilen malzeme soğuma ızgarasına alınır. Soğuma esnasında raylar kesit farklılıklarından dolayı çarpılmaktadır.



Şekil 2.4. Ray haddehanesi merdane pasoları [7].

Bu çarpılmanın kontrol altında tutulabilmesi ve doğrultmada giderilebilmesi için sıcak raylar ortadan itilir. Soğumanın kontrollü yapılabilmesi için ızgara muhafaza altına alınmış ve altına fanlar yerleştirilmiştir. Soğuması tamamlanan raylar doğrultma ünitesine gönderilerek lineer hale getirilir. Doğrultmada raylar Şekil 2.5'deki gibi, formlarına uygun metal tekerleklerden geçirilerek çarpıklıkları giderilir [5].



Şekil 2.5. Ray doğrultma ünitesi [5].

2.4. ÖZELLİKLERİNE GÖRE RAY SINIFLARI

Gerek fiziki konumları gerek üzerlerinde hareket eden trenlerin hız ve ağırlıklarına göre raylardan farklı özellikler beklenebilir. Maliyet parametresi de göz önünde bulundurularak ilgili hatlarda optimum değerleri sağlayan raylar kullanılmalıdır.

2.4.1. Doğal Olarak Sert Raylar

Raylar genellikle doğal sertliklerinde teslim edilir. Haddemeleme işlemini takiben soğutma ve doğrultma işlemleri esnasında elde ettiği mekanik değerler bu ürünün nihai özellikleridir. Bunlar kristalleşme durumuna göre adlandırılan perlitik raylardır. Örneğin R260 kalite raylar, düz yolda her 100 m’de yaklaşık 0,7-1 mm ve 600 m yarıçaplı kavislerde 2-3 mm aşınma göstermektedir. 200 N/mm² ile çekme mukavemeti artışı, aşınma oranının yarısına denk gelmektedir. Çekme mukavemetindeki bu artış ısıtma işlemiyle elde edilir. Doğal sertlikteki farklı raylar Çizelge 2.2’de incelenebilir [8].

Çizelge 2.2. Farklı kalite rayların kimyasal bileşimleri ve çekme mukavemetleri [9].

Kalite	Freze Son Katı	Gösterim	Kimyasal Bileşim (%)					Rm (N/mm ²)
			C	Si	Mn	Cr	V	
700	“doğal sertlik”	Standart kalite	0,5	0,2	1	-	-	680
900 A	“doğal sertlik”	Aşınma direnci kalitesi	0,7	0,3	1	-	-	860
1100	“doğal sertlik”	Yüksek aşınma direnci kalitesi	0,72	0,6	1,1	0,9	0,1	1080
1200	“doğal sertlik”		0,77	1	1,1	0,9	0,15	1180
1200 HH	“doğal sertlik”		0,77	0,3	0,9	0,1	-	1175
1400	“doğal sertlik”	(beynitik)	0,3	1,8	2	2-3	1400	0,3

2.4.3. Yüksek Alaşımli Raylar

Bu malzeme grubunda asıl hedef yüksek çekme mukavemetidir. Alaşımli ray çeliklerinin çekme mukavemetleri 1300 N/mm²’ye kadar gelmektedir. Bu değerler, perlitin büyüme oranının kontrolü sayesinde, perlit lamelleri arası mesafenin düşük olmasının sonucudur. Fakat yüksek alaşımli rayların dezavantajı kaynak

hassasiyetlerinin artmasıdır [6,8]. Mobil parlak uçlu kaynak makinesi bu malzeme grubu için uygun soğuma şartlarını sağlayarak bu eksikliği tolere edebilir [7].

2.4.4. Beynitik Raylar

Beynit; karpit, martensit ya da ikinci aşama olarak kalıntı östenit içeren, güçlü bir şekilde gerdirilmiş fertten oluşan yapıdır. Perlitik raylarda olduğu gibi perlitik raylardan da, viskozitede kayıp olmaksızın, daha yüksek mekanik mukavemet değerleri beklenmektedir. Bu çelikler, düşük karbonlu, krom ve molibden ihtiva eden çeliklerdir. Geliştirme prosesi makul düzeyde su verme işlemi içerir. Mikro yapı, tabakalardan oluşmayan topaklanmış sementit ve plaka şeklinde ferritten oluşur. Beynitik rayların mekanik özellikleri Çizelge 2.3'de gösterilmiştir [6].

Çizelge 2.3. Beynitik rayların mekanik özellikleri [7].

Mikroyapı	Rm (MPa)	% A	K _{1c} (MPa m ^{1/2})	U çentikli Charpy (J, 200C)	Yorulma Dayancı (MPa)	Aşınma (gr/saat)
Beynitik	1400	13,5	98	39	870	0,77

2.4.5. Korozyona Dirençli Raylar

Bakır, alüminyum, silisyum ve krom elementlerinin ilavesiyle geliştirilen bu raylar yüzeylerinde yapışkan bir oksit filmine sahiptirler. Bu film rayların yüzeyi ile ortamın temasını keserek korozyon direnci sağlamaktadır. Eğer mekanik özelliklerde de bir iyileşme isteniyorsa, krom uygun bir çözüm önerisidir. Bu çeliklerde % 0,33 Cu ve % 0,15 Mo mevcuttur [9].

BÖLÜM 3

KALINTI GERİLMELER

Kalıntı gerilmeler üretim ve işlem sırasında oluşabildikleri gibi servis sırasında da oluşabilirler. Bu gerilmeler; bir dış yük uygulanması olmaksızın üniform sıcaklık şartları altında parçanın içerisinde kalıntı olarak var olan ve kendi kendini dengeleyen gerilmeler olarak tanımlanabilirler [10].

Kalıntı gerilmeler, mühendislik malzemelerinin yorulmalarında önemli rol oynamaktadır. Çünkü yorulma çatlakları genellikle yüzeyde başlar. Kalıntı gerilmelerin de yüzeyde oluşması genellikle bu durum için çok uygundur. Yüksek gerilme alanlarında basma gerilmeleri genellikle faydalıdır. Özellikle basma kalıntı gerilmelerinin parçaların yorulma ömrü, kırılma mukavemeti ve gerilme korozyonu üzerinde olumlu etki yaptığı bilinmektedir. Basma gerilmeleri, yorulma çatlaklarının oluşumuna ve gelişimine engel olur. Çekme gerilmeleri ise çatlak oluşumuna ve gelişimine yardımcı olduğundan zararlıdır. Ayrıca çekme nedenli, parçanın kalıntı gerilme durumunun bilinmesi arıza nedenlerinin anlaşılması açısından önemlidir [11-17].

Hemen hemen üretilen tüm parçalar, malzeme özelliklerini ve şeklini değiştiren herhangi bir işlem tarafından oluşturulan az da olsa kalıntı gerilmelere sahiptirler. Malzeme, işleme prosesi, montaj ve servis sırasında karşılaşılabilecek etkilerin karmaşık bir bileşimi ile oluşan bu gerilmeler önceden kolayca tahmin edilemezler. Ancak servis yükleri ile birleştikleri zaman malzemenin kırılmasına neden olacak aşırı bozukluklara yol açabilirler [10].

Kalıntı gerilmeleri tahmin edebilmek için, malzemenin termomekanik davranışının, malzemeye uygulanacak dış kuvvetlerin, ısıl ve mekanik kuvvetler arasındaki etkileşimlerin ve metalin yapısal dönüşümlerinin bilinmesi gerekir. Plastik deformasyona

uğrayan malzemelerdeki gerinme dağılımı üniform değilse daima kalıntı gerilmeler üretilecektir [18]. Kalıntı gerilmeler, homojen olmayan plastik deformasyonlar, ısıl büzölmeler, üretim işlemleri ile oluşan faz dönüşümleri ve kompozit bileşenlerinin akma gerilmelerindeki, elastiklik modüllerindeki veya ısıl genişleme katsayılarındaki farklılıklardan oluşabilir [19].

Pek çok üretim yöntemi ve yüzey işlemleri kalıntı gerilmeleri oluşturur. Bunlar döküm, derin çekme, dövme, çekme, ekstrüzyon, haddeme ve bükme gibi üretim yöntemleri; talaş kaldırma, elektroerozyon gibi yüzey işleme yöntemleri; kaynak, sert lehimleme gibi bağlama yöntemleri; püskürtmeli sertleştirme, lazer şoku gibi mekanik yüzey işlemleri; su verme, karbonlama, nitrüleme, karbonitürasyon, PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme), CVD (Kimyasal Buhar Biriktirme) kaplamalar, elektro kaplama olarak sıralanabilir [10]. Kalıntı gerilmeler gerilmenin dengelendiği aralık veya alana göre makroskobik gerilmeler ve mikroskobik gerilmeler olarak iki sınıfa ayrılabilir. Makroskobik gerilmeler; ısıl işlem, talaş kaldırma, ikincil işlem ve montaj sırasında ortaya çıkabilir. Mikroskobik gerilmeler ise genellikle bileşenler ve fazlar arasındaki ısıl genişleme katsayısı uygunsuzluğundan veya faz dönüşümlerinden kaynaklanır. Her iki gerilme tipi de bir parça veya malzeme de aynı anda bulunabilir.

Bu gerilmeler parçanın çalışma performansına zarar verici ve/veya faydalı olabilirler. Kalıntı gerilmeler parçada gerilme korozyon çatlamasına, sürünmeye, çarpılmaya, aşınmaya, kırılmaya, yorulma çatlamasına ve zamansız hatalara yol açabilir. Üretim sırasında oluşan zararlı kalıntı gerilmeleri mümkün olduğu kadar kontrol altına almak için ısıl işlem teknikleri uygulanır. Isıl işlem görmemiş kaynak bölgesi birleştiği zaman erken çatlamalara neden olabilir. Buna karşın püskürtmeli sertleştirme gibi teknikler uygulanarak parçanın yorulma performansını geliştirmek amacıyla, parçada faydalı kalıntı gerilmeler kasıtlı olarak da oluşturulabilir.

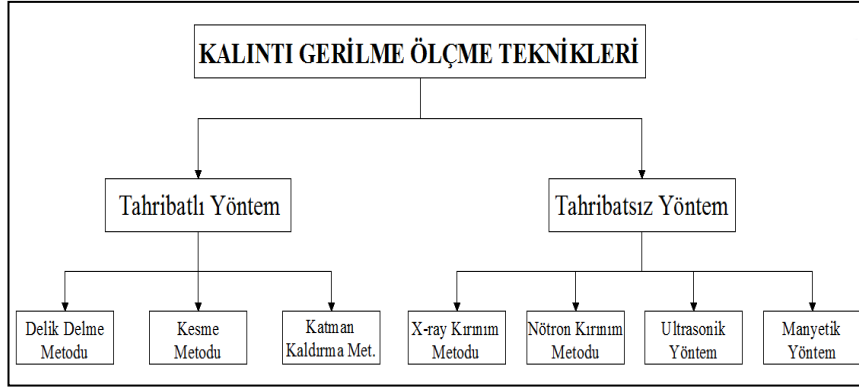
Basma kalıntı gerilmesi genellikle çatlak başlangıcını ve çoğalmasını geciktirdiğinden dolayı yorulma ömrü ve gerilim korozyonu üzerinde faydalı bir etkiye sahiptir. Çekme kalıntı gerilmesi tam aksine malzemenin mekanik performansını azaltmaktadır. Kalıntı gerilmedeki küçük değişimler bir parçanın ömründe önemli bir etki yapabilir. Bu etkilerin önemini anlamak ve bir parçanın olası performansını

değerlendirmek için parça içerisindeki kalıntı gerilme seviyesinin bilinmesine gerek vardır. Gerilme ölçme terimi yaygın olarak kullanılmasına rağmen gerilme direct olarak ölçülemeyen bir özelliktir. Gerilme ölçme yöntemlerinin tamamı gerilme gibi bazı özelliklerin ölçülmesini ve bileşik gerilmenin hesaplanmasını gerektirmektedir. Bir parçanın tasarımında uygulanan gerilmelerin hesabında kalıntı gerilmeleri tahmin etmek ve güvenli şekilde ölçmek zordur. Dolayısıyla kalıntı gerilmelerin hesaplanması normal gerilmelerin hesaplanmasından daha zordur. Kalıntı gerilme ölçümleri geleneksel gerilme analiz işlemleri kullanılarak gerçekleştirilemez. Çünkü kullanılan sensörler yalnızca uygulanan yükün neden olduğu gerilmedeki değişimi ölçmektedirler. Bu sensörler kalıntı gerilmeleri doğrudan ölçemezler. Malzeme performansını en uygun hale getirme ve parça ağırlığını azaltma çabaları, kalıntı gerilmenin rolünü daha iyi anlamamızı sağlamaktadır. Kalıntı gerilmelerin daha iyi belirlenebilmesi için ölçme yöntemlerinin geliştirilmesine ve mevcut yöntemlerden daha güvenilir sonuçlar elde edilmesine ihtiyaç vardır [10]. Günümüzde uzay, nükleer ve diğer mühendislik endüstrilerindeki tasarımlarda gerilmelerin belirlenmesine büyük önem verilmektedir [18].

Kalıntı gerilme ölçüm teknikleri üzerinde 1900'lü yıllardan beri çalışmalar yapılmış ve birçok ölçüm yöntemi geliştirilmiştir. Genellikle kalıntı gerilme ölçümlerinde kullanılan bu teknikler tahribatlı ve tahribatsız ölçme yöntemleri olarak adlandırılır [13].

Tahribatlı ölçme yöntemleri, parçaya delik açılması ve parçadan talaş kaldırılması veya tabaka kaldırılması gibi işlemlerden sonra, parçadaki gerilme denge durumunun belirlenmesine dayanır.

Tahribatsız yöntemler ise malzemedeki gerilme durumunun, malzemenin fiziksel veya kristalografik özelliklerine bağlı olması durumunda kullanılır [14-16].



Şekil 3.1. Kalıntı gerilme ölçüm yöntemleri [13].

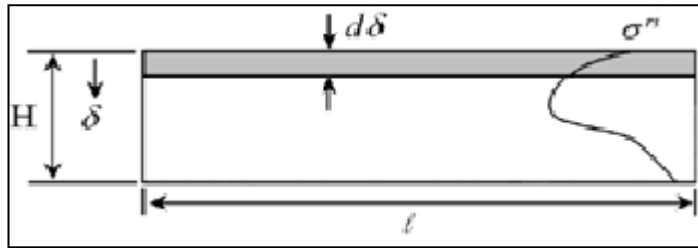
3.1. TAHRİBATLI KALINTI GERİLME ÖLÇME YÖNTEMLERİ

Mekanik kalıntı gerilme ölçme yöntemleri olarak da adlandırılan bu yöntemler, gerilme gevşemesine müsaade etmek amacıyla kasıtlı olarak malzeme kaldırılarak, gerilme sırasında veya sonrasında parçada meydana gelen şekil değiştirmenin ölçülmesi esasına dayanmaktadır. [18]. Bu yöntemlerde ilk olarak, analiz edilen parçadan malzeme kaldırılarak yeni bir gerilme durumu oluşturulur, daha sonra yer değiştirmeler ölçülerek gerilmedeki yerel değişimi belirlenir, son olarak elastisite teorisi kullanılarak kalıntı gerilmeler hesaplanır [20]. En çok kullanılan tahribatlı yöntemler; Tabaka kaldırma (Layer removal), Delik delme (Hole drilling), Halka çekirdek (Ring core), Kanal açma (Crack compliance veya Slotting), Kesit profil ölçme yöntemi (Contour) olarak verilebilir.

3.1.1. Tabaka Kaldırma Yöntemi

Tabaka kaldırma yönteminin temel prensibi; elektrokimyasal veya kimyasal işleme yöntemleri kullanılarak, malzemedeki kalıntı gerilmeler içeren ince tabakalar kademeli olarak kaldırıldığı zaman iç gerilmelerin ve momentlerin dengelenmesine dayanmaktadır. İç gerilmelerin yeniden dengelenmesinden dolayı oluşan gerilme veya şekil değiştirmeler, kaldırılan tabakadaki gerilmelerle ilişkilendirilebilmektedir. Elastisite teorisi kullanılarak kalıntı gerilmeleri hesaplamak amacıyla bu gerilmeler ölçülür [20].

Kalıntı gerilmeleri içeren düz bir levhanın bir yüzeyinden ardı ardına tabakalar kaldırıldığı zaman gerilmeler dengesiz hale gelir ve levha eğilir. Levhanın eğriliği kaldırılan tabakadaki orijinal gerilme dağılımına ve levhanın elastik özelliklerine bağlıdır. Tabaka kaldırıldıktan sonra bir dizi eğrilik ölçümleri yapılarak levhadaki gerilme dağılımı ortaya çıkarılabilir. Numunenin eğriliği ölçme aletinin aralığına ve çözünürlüğüne bağlı olarak, uzama teli (strain-gage), lazer tarama ve optik mikroskop gibi çeşitli yöntemler kullanılarak ölçülebilir. Ölçümler, mekanik kararsızlık ve çok eksenli eğrilikten kaçınmak için genellikle dar şeritler (genişlik/boy<0,2) üzerinde yapılır [18]. Yöntem, numune yüzeyine paralel olan bir tabakadaki kalıntı gerilmelerin önemli olarak değişmediği varsayılabilen silindirik numunelere ve düz levhalara uygulama için uygundur ve yöntemle sadece numune eksenine paralel temel gerilme bileşenleri hesaplanabilir (Şekil 3.2) [19]. Kalınlık doğrultusundaki ve sayfa düzlemine dik doğrultudaki gerilmeler değerlendirmeye alınmazlar. Yöntem hacimdeki makro gerilmeleri ölçmek için uygun bir yöntemdir. Bu yöntemle yüzeydeki ve yüzey kenarındaki gerilmeler ölçülememektedir.

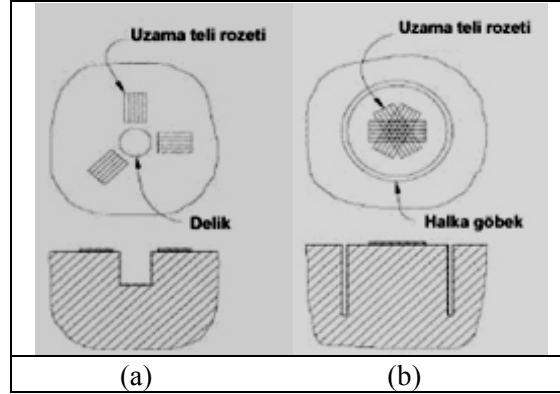


Şekil 3.2. Numunedeki gerilme dağılımı [10].

Bu yöntem sürekli veya ayırık olarak uygulanabilmektedir. Sürekli ölçmede tabaka kaldırma sırasında ölçme yapılırken, ayırık ölçmede önce tabaka kaldırılır sonra ölçme yapılır. Sürekli ölçme yerine ayırık ölçmede, numuneden önce bir tabaka kaldırılır sonra numune kalınlığı ve eğriliği elektrolitik banyo dışında ölçülür. Bu işlem kaldırılan her bir tabakada tekrarlanır. Böyle bir analiz için gerekli zaman sürekli ölçme yöntemlerinden kesinlikle daha büyüktür. Fakat elektrokimyasal işleme için kalibrasyon eğrilerine artık ihtiyaç yoktur. Buna ilaveten, elektrokimyasal işlemenin kaldırma karakteristiği, işleme herhangi bir zorluk getirmemektedir [20].

3.1.2. Delik Delme Yöntemi (Hole Drilling Method)

Bu yöntemde numuneye, Şekil 3.3' de görüldüğü gibi özel olarak tasarlanmış rozet tipi uzama teli yapıştırılır. Sonra geometrik merkezde, tipik olarak 0.4-2 mm derinliğinde, sıg bir delik delinir. Delik içerisindeki gerilmeli tabakanın kaldırılması, malzeme çevresindeki gerilmeleri yeniden düzenlemekte ve rozetteki uzama telleri gerilme gevşemelerini ölçmektedir [19]. Yöntemin kullanımı kolay ve çabuktur, maliyeti azdır. Ayrıca birçok malzeme çeşitlerine uygulanabilirliği, güvenilir sonuçlar vermesi, daha az özel ekipman gerektirmesi, ölçüm tesisatının taşınabilir olması ve numuneye az zarar vermesinden dolayı bu yöntem kullanışlıdır [19]. Ancak en büyük dezavantajı elde edilen bilginin yorumlanmasıdır. Ayrıca, kenarlara yakın yerlerde ölçme yapılamaması, gerilme hassasiyetinin derinlik ile değişmesi, sınırlı uzaysal çözünürlüğe sahip olması, delme sırasında ilave gerilme oluşturması dezavantajları arasındadır [19].



Şekil 3.3. a) Delik delme yöntemi ve b) halka çekirdek yöntemi [22].

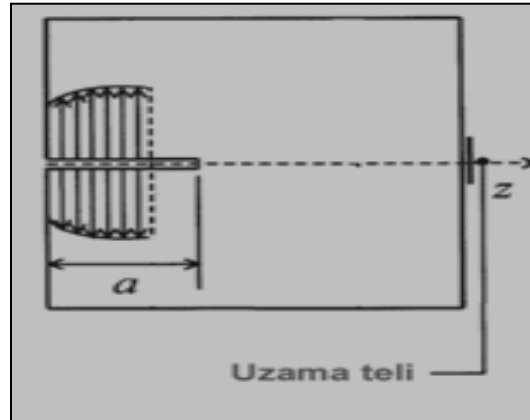
3.1.3. Halka Çekirdek Yöntemi (Ring Core Method)

Halka çekirdek yöntemi, delik delme yönteminin değişik bir biçimidir [22]. Bu yöntemde delik delme yöntemindeki gibi rozet içerisinde bir delik delinmesi yerine rozetin dış kenarı civarında çevresel bir kanal açılmaktadır (Şekil 3.3 (b)). Bu yöntem tipik olarak 0.1-6 mm derinlikteki kalıntı gerilmeleri ölçebilmektedir.

Bu yöntem ile delik delme yöntemine göre daha büyük gerinme gevşemeleri ölçülebilmektedir [22]. Bundan dolayı bu yöntemle malzemenin akma gerilmesinin üzerindeki kalıntı gerilmeler hassas olarak ölçülebilmektedir. Delik delme sırasında önemli ilave kalıntı gerilmeler oluşabilirken, bu yöntemde genellikle oluşmamaktadır. Ayrıca yöntemin hassasiyeti daha yüksektir ancak delik delme yönteminden daha tahribatlı bir yöntemdir [19].

3.1.4. Kanal Açma Yöntemi (Crack Compliance Method)

Kanal açma yönteminde kalıntı gerilmeleri belirlemek amacıyla numune üzerinde küçük bir kanal açılmaktadır. Kanalin açılması kanala dik kalıntı gerilmeleri gevşetmektedir. Bunun sonucunda numune içerisindeki gerilmeler yeniden dengelenmektedir ve kanal bölgesinde oluşan kanala dik gerinme gevşemeleri uzama teli kullanılarak ölçülmektedir (Şekil 3.4) [19].

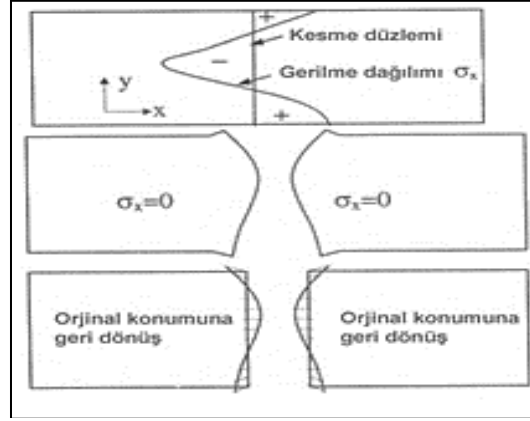


Şekil 3.4. Kanal açma yöntemi [19].

Yöntemin uygulaması basit ve çabuktur ve özellikle yerel kalıntı gerilmelerin ölçümünde iyi bir hassasiyet göstermektedir. Ayrıca değişik geometri numunelerdeki kalıntı gerilmeler başarıyla ölçülmektedir ve iyi bir derinlik - gerilme çözünürlüğüne ve hassasiyete sahiptir. Kristal yapıya sahip olmayan numunelere de başarıyla uygulanabilmektedir. 150 mm derinliğe kadar uygulanabilmektedir [23]. Ancak bu yöntem ile sadece kanal doğrultusuna dik kalıntı gerilmeler ölçülebilmektedir ve uzama tellerinin ve kanalın standart bir düzeni yoktur [19].

3.1.5. Kesit Profili Ölçme Yöntemi (Contour Method)

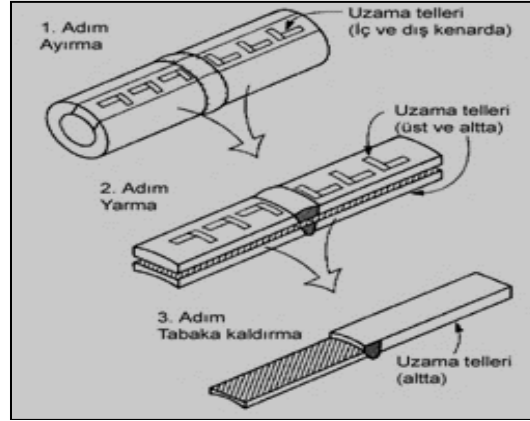
Bu yöntemde numune, içerisindeki kalıntı gerilmeleri belirlemek amacıyla kesilerek ikiye ayrılır (Şekil 3.5). Parçada kalıntı gerilme mevcutsa yüzey kesit profili kesme düzleminde sapacaktır. Kesme sonucunda ortaya çıkan kesit profili kalıntı gerilmelerle ilişkilendirilmektedir. Yöntem tahrip olmasına rağmen kullanımı basittir ve tüm kesit boyunca kalıntı gerilmeleri uygun maliyette ve kısa sürede ölçülebilmektedir. Ancak bu yöntemde sadece kesme düzlemine dik kalıntı gerilmeler ölçülebilmektedir [24].



Şekil 3.5. Kesit profili ölçme yöntemi [24].

3.1.6. İnce Kesitlere Ayırma Yöntemi (Sectioning Method)

İnce kesitlere ayırma yönteminde de numune içerisindeki kalıntı gerilmeler numunedan parçalar kaldırılarak ölçülmektedir. Kalıntı gerilmeleri belirlemek için numune değişik kesitlerde sıralı olarak kesilir (Şekil 3.6). Ayırma, yarma ve tabaka kaldırma işlem adımlarının birleştirilmesi ilgilenilen bölge boyunca kalıntı gerilmelerin detaylarını belirlemede büyük esneklik sağlamaktadır. Tabaka kaldırma adımı bu gerilmeleri açığa çıkarır. Uzama telleri sayesinde ortaya çıkan gerilmeler ölçülür [20].



Şekil 3.6. İnce kesitlere ayırma yöntemi [20].

3.2. TAHRİBATSIZ KALINTI GERİLME ÖLÇME YÖNTEMLERİ

Bu yöntemler numune üzerinde tahribat meydana getirmemektedir. Kalıntı gerilmeler malzemenin çeşitli fiziksel büyüklüklerinden faydalanılarak belirlenmektedir [18]. Kalıntı gerilmeleri ölçmek için en çok kullanılan tahribatsız yöntemler; Kırınım yöntemleri (Diffraction methods), Ultrasonik yöntemler (Ultrasonic methods), Manyetik yöntemler (Magnetic methods), Termo elastik yöntemler (Thermoelastic methods), Fotoelastik yöntemler (Photoelastic methods) olarak verilebilir.

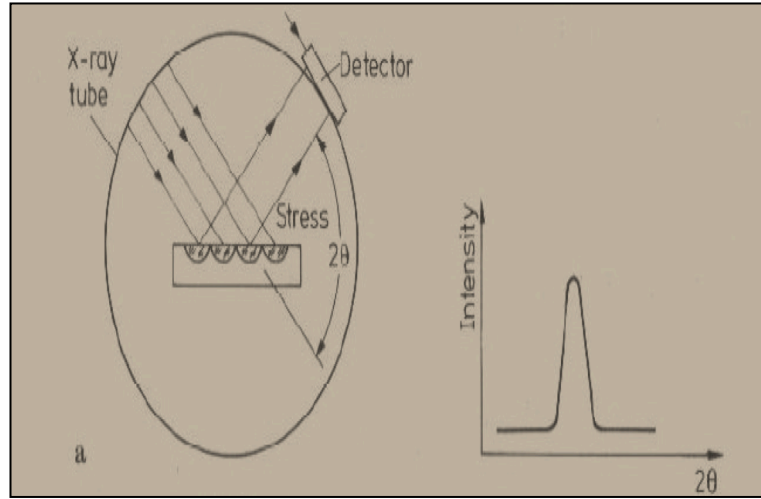
3.2.1. Kırınım Yöntemleri

Kırınım yöntemleri yalnızca kristal yapılı malzemelere veya malzemedeki kristal fazlara uygulanabilir. Bu yöntemler, kristalli bir malzeme gerilmeye maruz kaldığı zaman malzemenin kristal kafes düzlemleri arasındaki mesafelerde meydana gelen değişimlerin incelenerek kafes gerilmelerinin ölçülmesine dayanmaktadır. Kırınım yöntemlerinin uzaysal ve nüfuziyet çözünürlüğü mekanik yöntemlerden daha fazladır, ancak mekanik yöntemler için gerekli deney süresi kırınım yöntemlerinden daha kısadır. X-ışını, şiddetli X-ışını ve Nötron kırınımı yöntemleri en çok kullanılan kırınım yöntemleridir.

3.2.2. X-ışını Kırınımı Yöntemi

X-ışını kırınımı metodu kalıntı gerilimlerin bulunmasında oldukça doğru sonuçlar veren bir yöntemdir. Kristal yapı içerisinde bulunan atomik düzlemler arasındaki mesafe, uygulanan gerilimler veya malzeme içerisinde kalan kalıntı gerilimler sayesinde uzayıp kısalmır. Bu mesafenin artması o bölgede oluşan bir çekme gerilimi ifade ederken mesafenin azalması ise basma gerilimlerin varlığını gösterir. X-ışını kırınımı yönteminde malzemeye gönderilen X-ışınları malzeme içerisindeki kristal düzlemlerden yansır. Bu sırada malzemeye gelen ışınların yönü değiştirilerek en çok yansımanın olduğu açı bulunur. Bulunan açı ve Bragg yasası kullanılarak iki atomik düzlem arasındaki mesafe hesaplanır.

Malzeme içerisinde kalıntı gerilimler mevcutsa bu mesafe parçanın gerilim olmayan haline göre farklılık gösterir. Bu farklılık kullanılarak parçanın içerisinde kalan kalıntı gerilimler hesaplanabilir. Şekil 3.7’de X ışını kırınım yönteminin ölçüm prensibi şematik olarak gösterilmiştir [26].



Şekil 3.7. X ışını kırınım yöntemi [27].

Bu yöntem, mikro ve makro kalıntı gerilmeleri tahribatsız olarak belirleyebilen tek yöntemdir. Milimetre seviyesinde yüksek uzaysal çözünürlüğe ve mikron seviyesinde nüfuziyet ve 50 µm derinliğe kadar var olan kalıntı gerilmeler ölçülebilmektedir [10].

3.2.3. Şiddetli X-ışını Kırınımı

Yöntemin prensibi XRD yöntemi ile aynıdır. Senkrotron veya şiddetli X-ışınları çok şiddetli yüksek enerjili X-ışınları sağlamaktadırlar. Bu X-ışınları geleneksel X-ışınlarından daha derinlere nüfuz edebilmektedir. Bu nüfuziyet çoğu malzemede 1-2 mm ve alüminyumda yaklaşık 50 mm kadar olabilmektedir.

3.2.4. Nötron Kırınımı

Nötronların nüfuziyeti X-ışınlarının nüfuziyetinden hemen hemen 1000 kat daha fazladır. Bu nedenle Nötron kırınımı yöntemi ile çoğu mühendislik malzemelerinin daha derinlerine nüfuz edilebilmektedir ve dolayısıyla yöntem 4-50 mm gibi daha büyük nüfuziyet derinliğine sahiptir [10].

3.2.5. Ultrasonik Yöntemler

Ultrasonik yöntemler, bir katı boyunca hareket eden sesötesi (ultrason) dalga hızlarının katı içerisindeki mevcut gerilme seviyelerine duyarlılığından faydalanmaktadır. Parçadaki mevcut kalıntı gerilmelerin doğrultuları ve büyüklükleri malzemedeki sesötesi dalga hızlarının değişimine doğrudan etki etmektedir. Yani bir malzemenin gerilmeli durumunda ilettiği sesötesi dalga hızı, malzemenin gerilmemiş durumundaki ses ötesi dalga hızına göre değişecektir. Malzeme elastik olarak davrandığı sürece, dalga hızı malzemedeki kalıntı gerilme durumuna bağlıdır.

3.2.6. Manyetik Yöntemler

Çeliklerin ve diğer ferromanyetik malzemelerin manyetik özellikleri, mıknatıssal büzülme ve manyetoelastik etkilerden dolayı malzemedeki iç gerilme durumuna duyarlıdırlar. Bu yöntem gerilme ve mıknatıslanma arasındaki etkileşime dayanmaktadır [10]. Parçadaki gerilme durumuna bağlı olarak parçanın elektro-manyetik özellikleri değişmektedir. Parçadaki gerilme durumu elektromanyetik özelliklerin değişiminin ölçülmesi ile belirlenebilmektedir.

3.2.7. Termoelastik Yöntemler

Malzemedeki elastik deformasyonlar sıcaklıkta küçük değişimlere neden olmaktadır (Örneğin çelikte 1 MPa için 1 m°K). Bu sıcaklık değişimi direk olarak yüzey gerilmelerinin toplam değişimi ile orantılıdır. Bu sayede parça içerisindeki kalıntı gerilmeler bulunabilmektedir. Yöntem genellikle yorulma çalışmalarında kullanılmaktadır ve kullanımı kolay, çabuk ve ölçüm aralığı geniştir [25].

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalara altı adet R260 kalite raylara standartların gerektirdiği kesme yöntemiyle kalıntı gerilme ölçümü yapılarak başlanmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan R260 kalite rayların kimyasal kompozisyonu Çizelge 4.1’de verilmiştir. Kesme yöntemiyle kalıntı gerilme ölçümünün ardından bu değerlerde farklılık gösteren raylar belirlenmiş, tahribatsız yöntemlerden olan X-ışını kırınımı yöntemiyle kalıntı gerilme ölçümü ve mekanik testler yapılmıştır.

Çizelge 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan rayın kimyasal kompozisyonu.

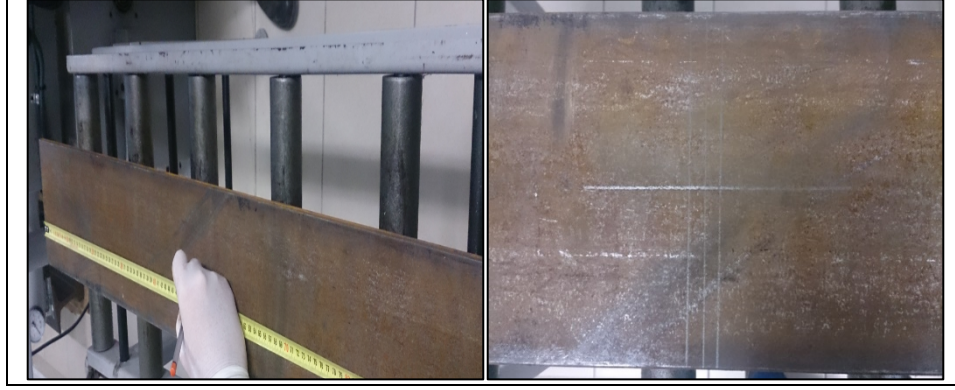
Ray	%							Ppm		Rm (MPa)
	C	Si	Mn	P (max)	Cr	A l(max)	V (max)	O	H	
R260	0,60- 0,82	0,13- 0,60	0,65- 1,25	0,030	0,15 max.	0,004	0,030	20	2,5	880

4.1. KALINTI GERİLME ÖLÇÜMÜ

Raylardaki kalıntı gerilmelerin ölçülmesi için pek çok geçerli yöntem vardır. EN 13674-1 standardı tarafından kabul gören yöntem olarak bilinen “Enine Şablon Kesme Yöntemidir.

Kalıntı gerilme ölçümü yapılacak ray profilinin EN 13674-1 standardına göre 1 m lik ray profilinin orta kısmından 20 mm uzunluğundaki bir dilim çıkarılacaktır. Kesme sırasında ölçümler alınarak raylarda meydana gelen kalıntı gerilme değerleri bulunacaktır. Kalıntı gerilme ölçümü için gereken numune hazırlama ve ölçümüyle alakalı aşamalar aşağıda verilmiştir.

- 1m uzunluğunda ray numunesi şerit metre ile ölçülerek kontrol edilir. 1 m'lik ray tabanının orta noktası belirlenerek 10 mm sağından ve solundan olmak üzere kesim yapılacak yerler numune üzerine işaretlenir (Şekil 4.1).



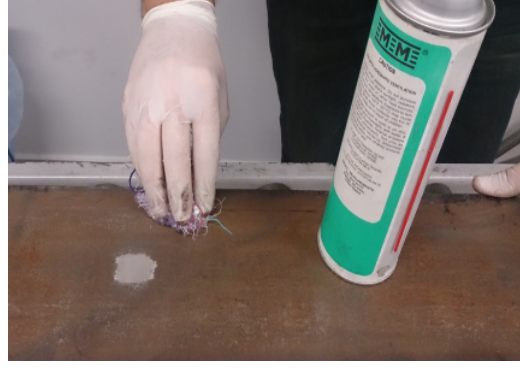
Şekil 4.1. Ray numunesinin ölçülerek çizilmesi.

- Ray tabanındaki 20 mm'lik alan üzerindeki pürüzler ince zımpara taşı ve zımpara kağıdı ile giderilir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Ray numunesinin otomatik zımpara taşı ile temizlenmesi.

- Zımparalama işleminden sonra yağ çözücü ile yüzey üzerindeki pas ve diğer kirli partiküller temizlenir (Şekil 4.3).



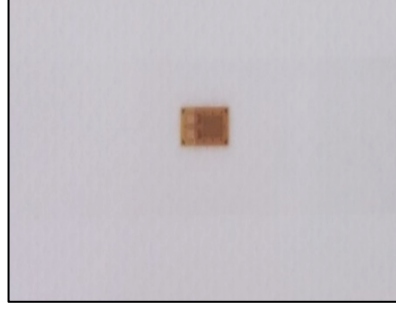
Şekil 4.3. Deney numunesinin temizlenmesi.

- Yüzey gazlı bez ile temizlenerek yağ çözücünün yüzeyden uzaklaşması sağlanır.
- Asidik özellikte bir şartlandırıcı kimyasal sürülerek gazlı bez ile temizlenir.
- Profilin yüzeyine strain gage in yapıştırılacağı alana kurşun kalemle aksel çizgiler çizilir.
- Çizgiler çizildikten sonra nötrleştirici bir kimyasal ile temizlenir ve gazlı bez ile kurulur (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Ray numunesinin nötrleştirici ile temizlenmesi.

- Strain gage ray tabanına yapıştırılmadan önce plate üzerine konularak bir bant yardımıyla yapıştırılır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Strain gage'in plate'e yapıştırılması.

- Bant yatayla 45° açı yapacak şekilde plate yüzeyinden kaldırılır.
- Strain gage yapıştırılan bant profile yüzey temizleme işlemleri sırasında çizilen çizgilerin merkezine gelecek şekilde yapıştırılır (Şekil 4.6).



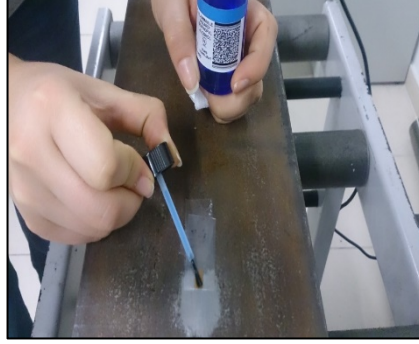
Şekil 4.6. Strain gage'in raya yapıştırılması.

- Bant yarıya kadar tekrar kaldırılarak strain gage'in altına bir damla M-Bond 200 yapıştırıcısı uygulanır (Şekil 4.7).



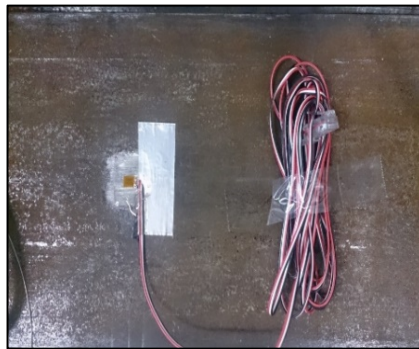
Şekil 4.7. Strain gage'in yapıştırılması.

- Yapıştırıcının aktivasyonu için strain gage in altına fırça yardımıyla katalizör sürülür (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Strain gage'e katalizör sürülmesi.

- İyi bir yapışmanın sağlanması sıcaklık ve basınçla gerçekleştiği için strain gage üzerine parmak ile iki dakika boyunca baskı uygulanır.
- Yapışma gerçekleştikten sonra bant yatayla maksimum bir açı yapacak şekilde strain gage üzerinden kaldırılır.
- Üç telli (kırmızı-beyaz-siyah) kablo çeyrek köprü konfigürasyonu yapılır (beyaz – siyah kablolar birleştirilir).
- Strain gage'in bir ayağına kırmızı tel, bir ayağına birleştirilmiş siyah beyaz tel gelecek şekilde lehimleme yapılır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Kabloların strain gage'e lehimlenmesi.

- Lehimleme yapıldıktan sonra her bir kablo çifti ucundan direnç ölçülerek kontrol edilir.

- Strain gage bağlantı telleri ve bağlantı noktaları korozyondan korunmak için koruyucu ile kaplanır ve koruyucunun kuruması için bir saat beklenir.
- Kuruma işlemi bittikten sonra kablonun konnektörü Şekil 4.10'daki veri alma cihazına takılır ve cihaza ait yazılım program çalıştırılır.



Şekil 4.10. Veri alma cihazı.

- Ray şerit testere tezgahına doğru bir şekilde yerleştirilir.
- Bağlama işlemi tamamlandıktan sonra testere çalıştırılır, aynı anda cihaz yazılımı başlatılır.
- Cihazdan alınan veriler doğrultusunda ilgili formülasyona göre kalıntı gerilmeler hesaplanır.

$$\sigma = E\varepsilon$$

Burada;

$$E = 2.07 \times 10^5 \text{ MPa (Elastikiyet Modülü)}$$

ε = ölçülen $\mu\varepsilon$ (Mikro Uzama)

$$\sigma = \varepsilon \times 10^{-6} \times 2.07 \times 10^5 \text{ MPa}$$

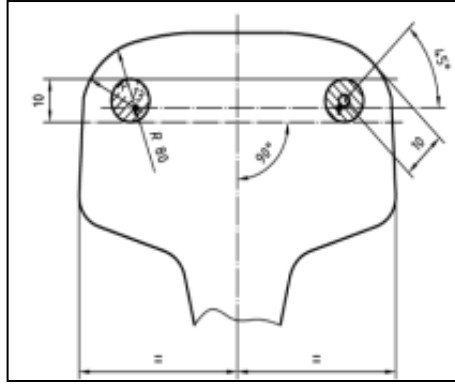
$$\sigma = \varepsilon \times 0.207 \text{ MPa}$$

4.3. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU

4.3.1. Optik Mikroskop Çalışmaları

Mikroyapı çalışmaları, metalografik prosedüre göre yapılmış olup, mikroyapı fotoğrafları optik ışık mikroskopunda gerçekleştirilmiştir. İncelenecek numuneler diskatonda kesme işlemi yapılarak uygun boyuta getirilmiş, zımparalama (220, 500, 1200, 2000 zımparayla) ve sırasıyla 6 µm, 3 µm ve 1 µm keçeler kullanılarak otomatik parlatma cihazında parlatılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler % 2 Nital ile dağlanıp optik mikroskopta mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir.

Standartta Şekil 4.13’de gösterildiği bölgelerden mikroyapı alınması gerekmektedir. Sertlik ve mikroyapı ilişkisinin incelenebilmesi için sertlik alınan 9 bölgeden de mikroyapı ölçümleri alınmıştır.



Şekil 4.13. Mikroyapı görüntüleri için numune çıkarılacak bölgeler.

Mikroyapı resimleri Nikon Eclipse MA 200 optik ışık mikroskopunda (LOM) 500X büyütmede çekilmiştir. Şekil 4.14.’de kullanılan optik ışık mikroskobu görülmektedir.



Şekil 4.14. MA200 optik ışık mikroskobu.

4.3.2. SEM Çalışması

SEM çalışması Carl-Zeiss Ultra Plus cihazında gerçekleştirilmiştir. Sem mikro-yapılarıyla birlikte lameller arası mesafe ölçülmüştür SEM cihazında yapılan incelemeler sırasında iç yapıya EDS analizleri yapılmıştır. Kullanılan SEM cihazı Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Carl-Zeiss ultra plus SEM cihazı.

4.3.3. XRD Çalışması

XRD ölçümleri Rigaku Ultima IV Marka XRD Cihazında 20-90° aralığında 5 derece/dk tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Tahribatsız yöntemlerden olan X ışını kırınımı yöntemiyle kalıntı gerilme ölçümü bu cihazda gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.16’da XRD cihazı görülmektedir.



Şekil 4.16. X-ray çekimlerinin yapıldığı Rigaku Ultima IV XRD cihazı.

4.4. ÇEKME TESTİ

Çekme testleri kalıntı gerilme değerlerinde farklılık gösteren üç farklı ray numuneleri için MTS marka 100 kN kapasiteli cihazda gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.17.'te çekme cihazı görülmektedir. Çekme deneyleri 0.017 mm/sn hızda oda sıcaklığında yapılmıştır.



Şekil 4.17. MTS 100 kN çekme cihazı.

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. KALINTI GERİLME ÖLÇÜM SONUÇLARI

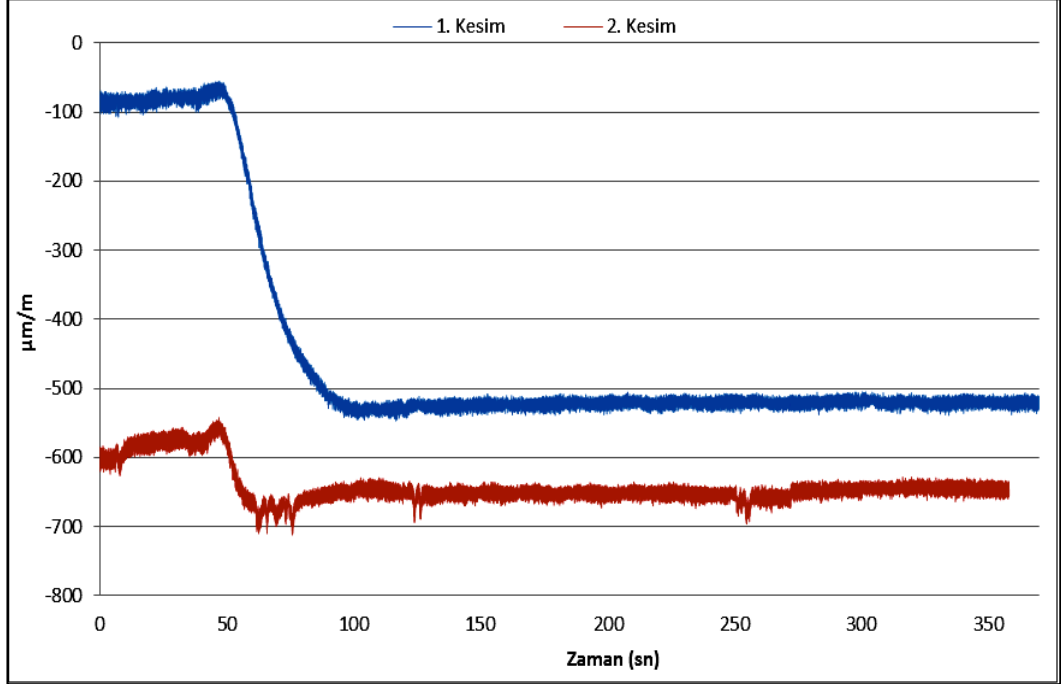
5.1.1. Kesme Yöntemi Ölçüm Sonuçları

EN 13674-1 Standardı Madde 8.5 ve Ek C'ye göre üretilen ve her biri 1 m uzunluğunda olan 6 adet rayın tabanında uzunlamasına yönde kalıntı gerilme ölçümleri yapılmıştır. Ray tabanının ortasındaki yüzey, kalıntı gerilme durumuna zarar vermeyecek şekilde temizlenmiştir. % 0,1 doğrulukla ölçüm yapan gerilme-ölçme sistemi (strain gage) yüzeye yapıştırılmış ve soğutma sıvısı ile temasını engellemek için kaplanmıştır. Ray dilimi kesilmeden önce ve kesildikten sonra okunan uzama değerleri farkı $2,07 \times 10^5$ MPa ile değeriyle çarpılarak kalıntı gerilme değerleri hesaplanmıştır. Ölçme sisteminin kabloları ölçüm ekipmanına bağlanarak dengeleme/kalibrasyon yapıldığı için standart "ilk veri" daima sıfır kabul edilmiş olup, kalıntı gerilme hesaplaması için ikinci veri kullanılmıştır. Gerilme ölçme sisteminin yapıştırıldığı noktadan her iki yönde 10 mm mesafeden ray kesilmiştir.

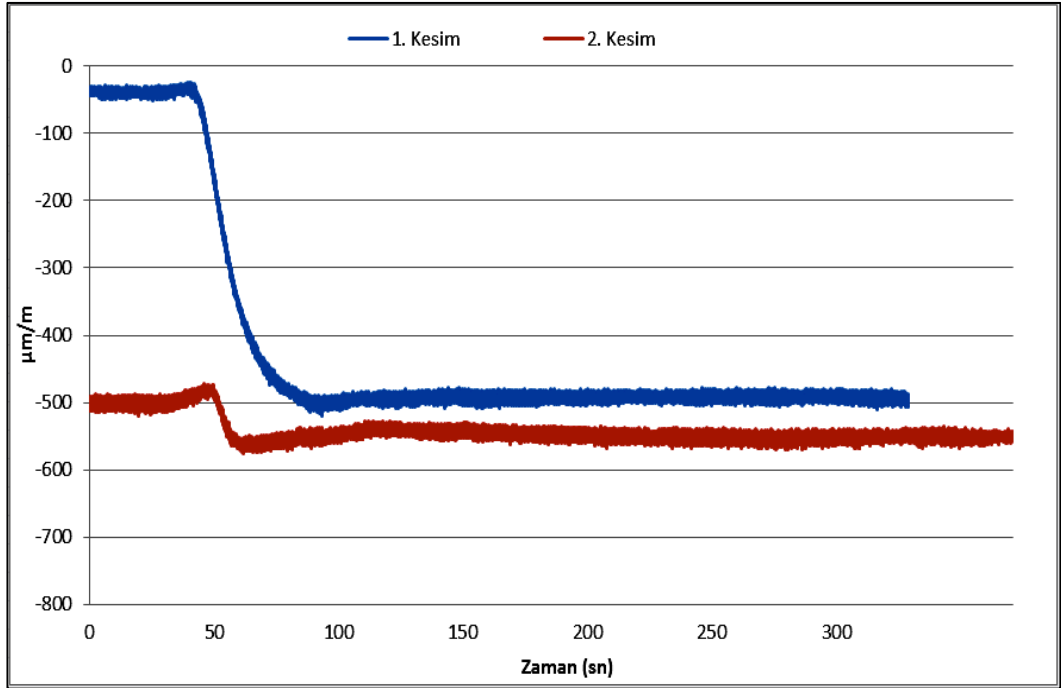
Çizelge 5.1. Ölçülen değerler ve hesaplanan kalıntı gerilmeler.

Numune No	Strain $\mu\text{m/m}$	Kalıntı Gerilme MPa
1	652,5	135
2	550	114
3	637,5	132
4	748	155
5	708	146,5
6	630	130,4

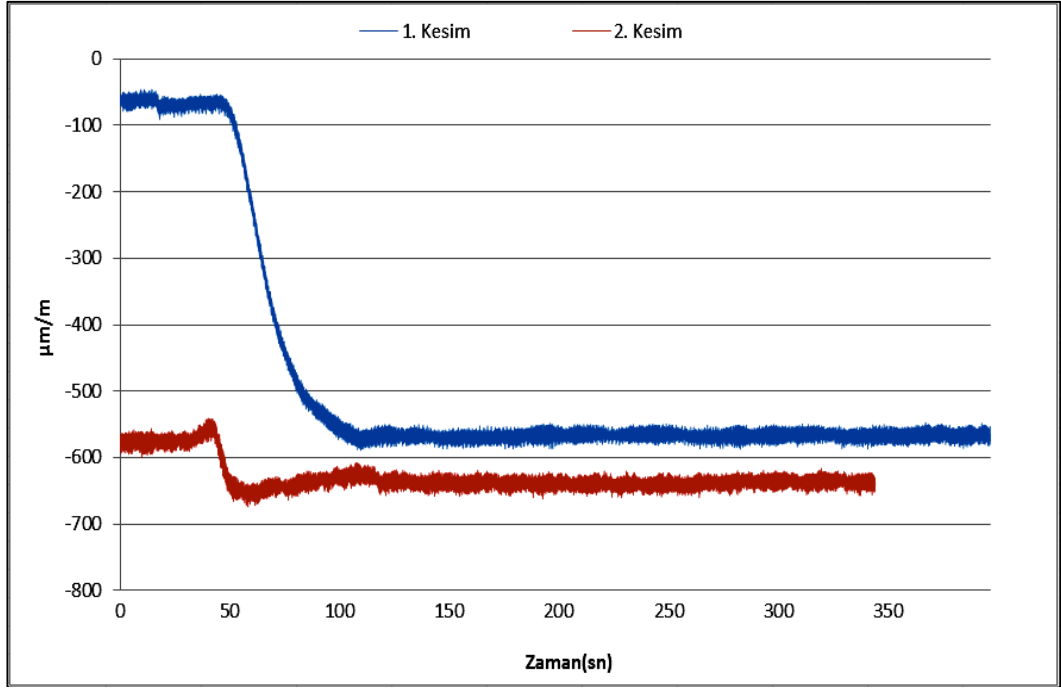
Birinci kesme işlemi mavi çizgilerle, ikinci kesme işlemi kırmızı çizgilerle gösterilmektedir.



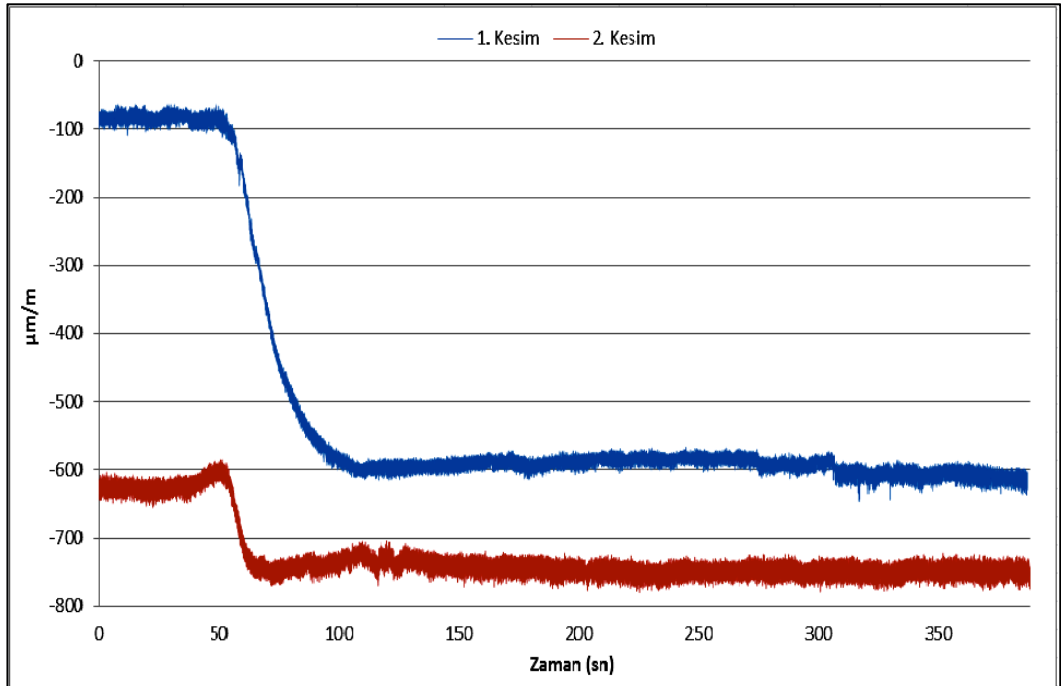
Şekil 5.1. Ray 1 için ölçüm sonucu.



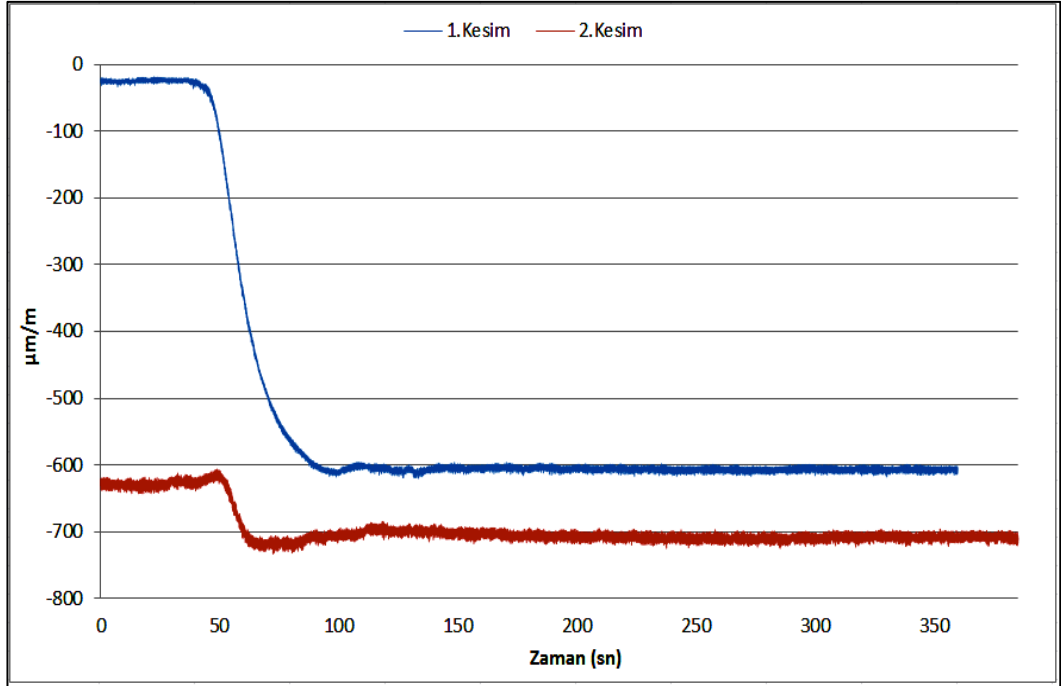
Şekil 5.2. Ray 2 için ölçüm sonucu.



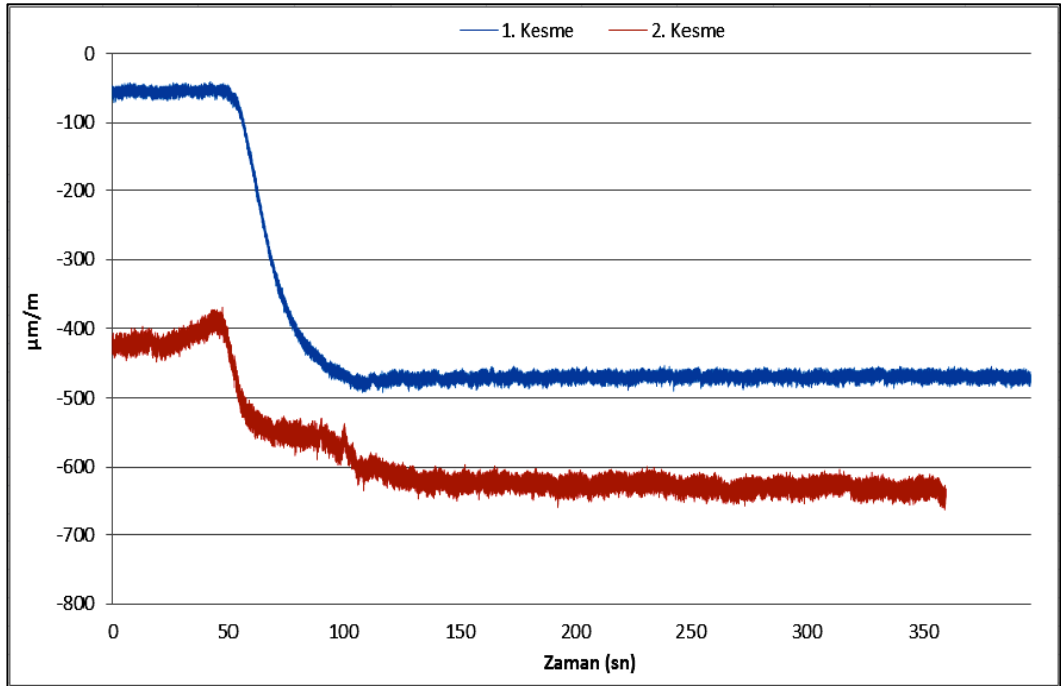
Şekil 5.3. Ray 3 için ölçüm sonucu.



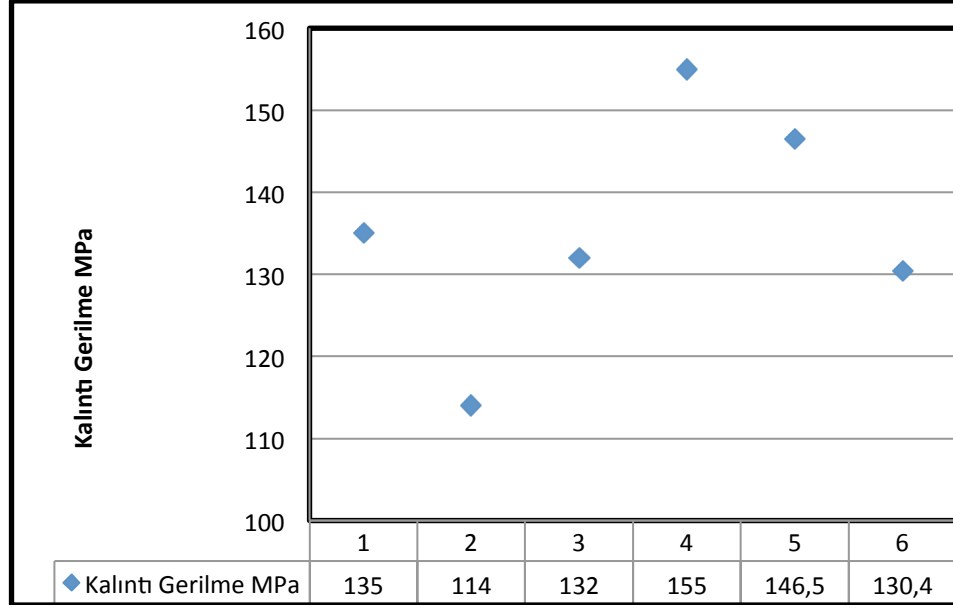
Şekil 5.4. Ray 4 için ölçüm sonucu.



Şekil 5.5. Ray 5 için ölçüm sonucu.



Şekil 5.6. Ray 6 için ölçüm sonucu.



Şekil 5.7. Kalıntı gerilme sonuçları.

Şekil 5.7’de Kalıntı gerilme sonuçları verilmiştir. Maksimum kalıntı gerilmenin 155 MPa ile dördüncü rayda olduğu, minimum kalıntı gerilmenin ise 114 MPa ile ikinci rayda olduğu görülmektedir.

5.1.2. X Işını Kırınımı Ölçüm Sonuçları

Kesme yöntemiyle yapılan ölçümlerin ardından, kalıntı gerilme değeri en yüksek olan dördüncü ray, ortalama değerlerde çıkan birinci ray ve en düşük gerilmeye sahip ikinci ray numunelerinin mantar kısımlarının RS bölgesinden cihaza uygun olarak örnek kesitler alınmış ve XRD yöntemiyle kalıntı gerilme ölçümleri yapılmıştır.

Cihazdan elde edilen dört farklı psi değerlerinden en yüksek pik değerleri ele alındı ve kalıntı gerilme ölçümleri yapıldı. Bu ölçümlerin yapılması için gerekli olan parametreler Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Kalıntı gerilme ölçümünde kullanılan parametreler.

hkl yüzeyi	Lattice parametreleri			Young Modülü	Poison Oranı	Dalga Boyu	Brag Açısı
	a	b	c				
222	2.86640	2.86640	2.86640	207000 MPa	0.3	1.540562	137

X ışını kırınımı yöntemiyle ölçümleri yapılan rayların kalıntı gerilme sonuçları Çizelge 5.3’de verilmiştir.

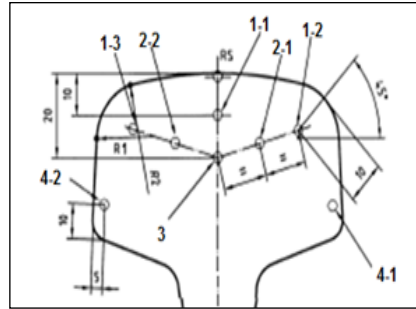
Çizelge 5.3. X ışını kırınımı yöntemiyle yapılan kalıntı gerilme ölçüm sonuçları.

Numune	Kalıntı gerilme sonucu (MPa)
1 numaralı ray	277.53
2 numaralı ray	207.11
4 numaralı ray	351.92

X ışını kırınımı yöntemiyle yapılan kalıntı gerilme ölçüm sonuçlarına göre, dört numaralı ray 351.92 MPa değeriyle en yüksek kalıntı gerilme değerine, iki numaralı ray ise 207.11 MPa ile en düşük kalıntı gerilme değerine sahiptir.

5.2. SERTLİK ÖLÇÜM SONUÇLARI

Sertlik ölçüm taramaları Şekil 5.8’de gösterildiği bölgelerden alınmıştır. Bulunan ortalama sonuçlar Çizelge 5.4’de verilmiştir.



Şekil 5.8. Sertlik ölçüm noktaları.

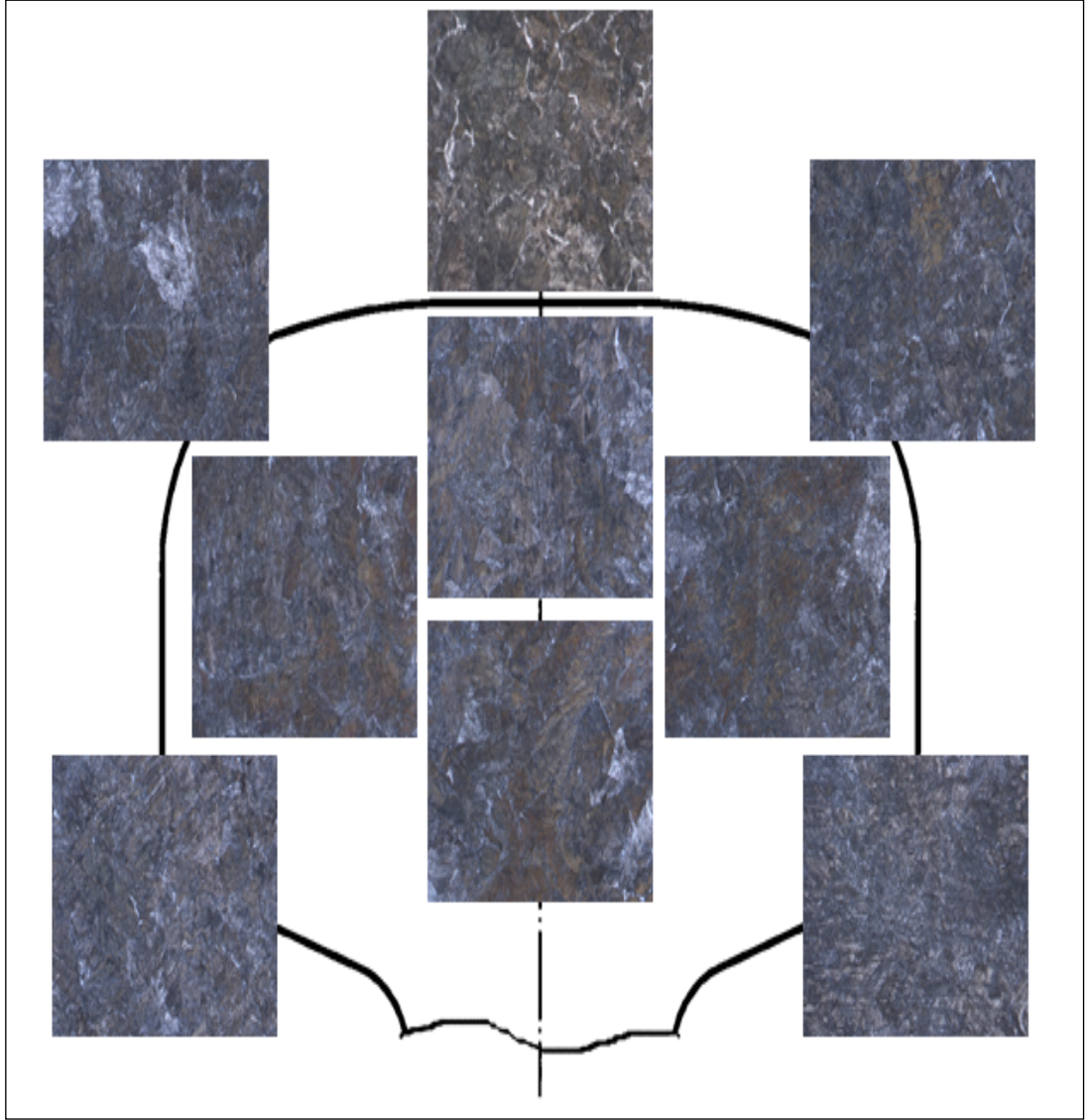
Çizelge 5.4. Sertlik ölçüm sonuçları (HB).

Ölçüm Noktaları	RAY-1	RAY-2	RAY-3	RAY-4	RAY-5	RAY-6
RS	282	285	277	291	287	281
1-1	276	281	269	276	281	275
3	270	270	260	267	268	261
1-3	274	280	272	280	277	272
2-2	272	273	266	269	272	269
2-1	272	278	265	270	273	268
1-2	274	279	272	282	275	271
4-2	277	285	272	280	279	280
4-1	279	282	273	282	284	280

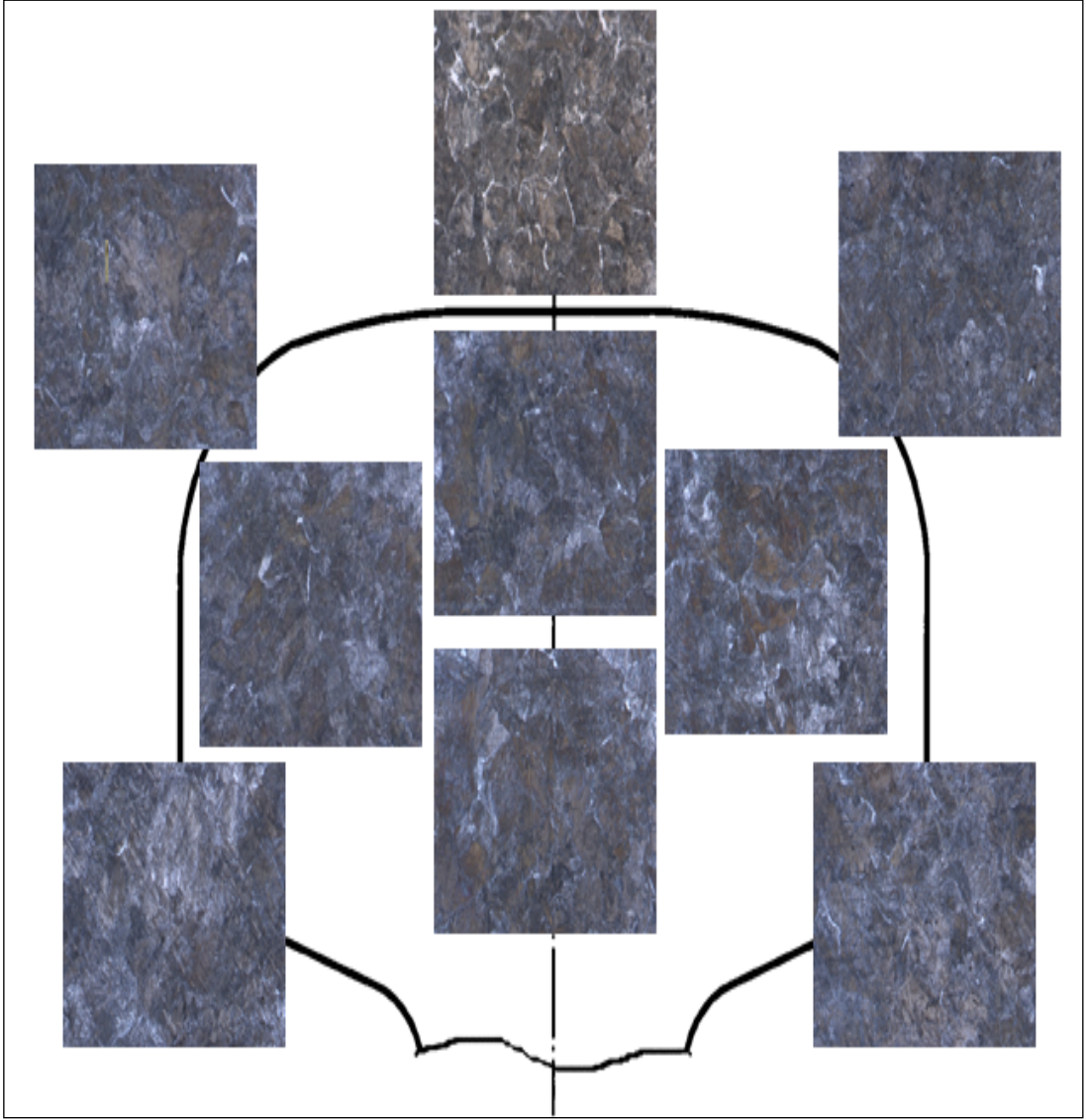
TS EN 13674-1 standardına göre raylarda sertlik ölçüm testleri mantar kısmından yapılmaktadır. Sertlik değerleri 260-300 HB arasında olması gerekmektedir. Alınan ölçüm sonuçlarına göre özellikle RS bölgeleri ele alınacak olursa, sertlik değerleri en yüksek olan 4 numaralı raydır. R260 kalite raylar için bakılması gereken en önemli nokta mantarın 0.5 mm altındaki Rs bölgesidir. Alınan ölçümlerde Rs bölgesinin diğer noktalara göre sertliği daha fazladır. Bunun nedeninin Rs yüzeyinin daha hızlı soğumasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ölçüm sonuçlarına göre mantarın orta kısmı yani 3 noktasında sertliklerin diğer bölgelere göre nazaran düşük olduğu görülmektedir. Üç noktasının en geç soğuduğu düşünüldüğünde bu bölgenin düşük sertlikte olması normal karşılanmaktadır.

5.3. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU

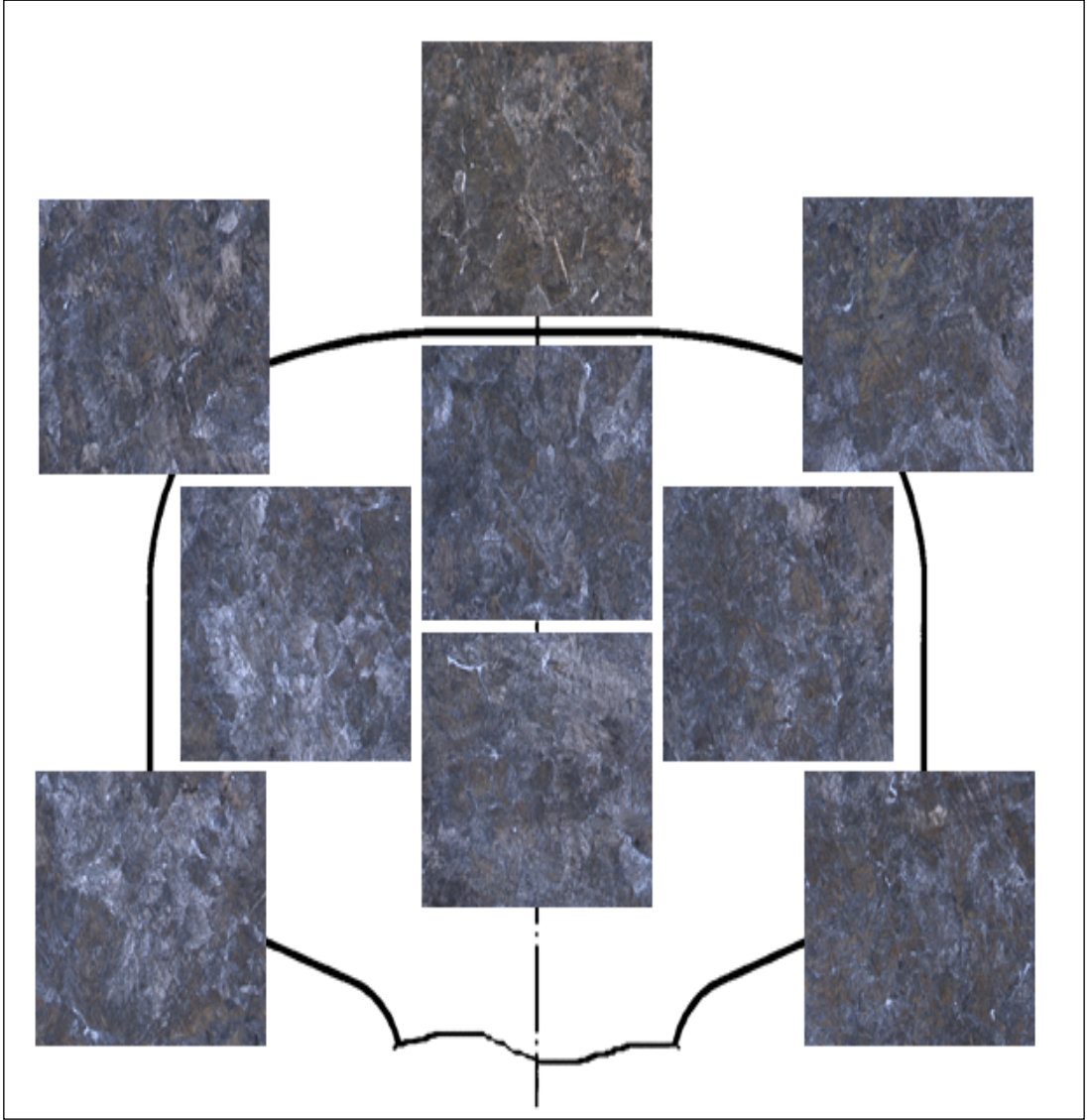
Kalıntı gerilme ölçümü ve akabinde sertlik ölçümü yapılan raylarda sonuçlar kendi aralarında kıyaslandığında, kalıntı gerilme değerleri en yüksek olan dördüncü ray, ortalama değerlerde olan birinci ray ve kalıntı gerilme değeri en düşük olan ikinci ray ele alınmış, gereken yüzey hazırlama işlemleri yapıldıktan sonra optik mikroskopta görüntüleri incelenmiştir.



Şekil 5.9. En düşük kalıntı gerilme değerine sahip raya ait mikroyapı görüntüleri (500X).



Şekil 5.10. Ortanca kalıntı gerilme değerine sahip raya ait mikroyapı görüntüleri (500X).



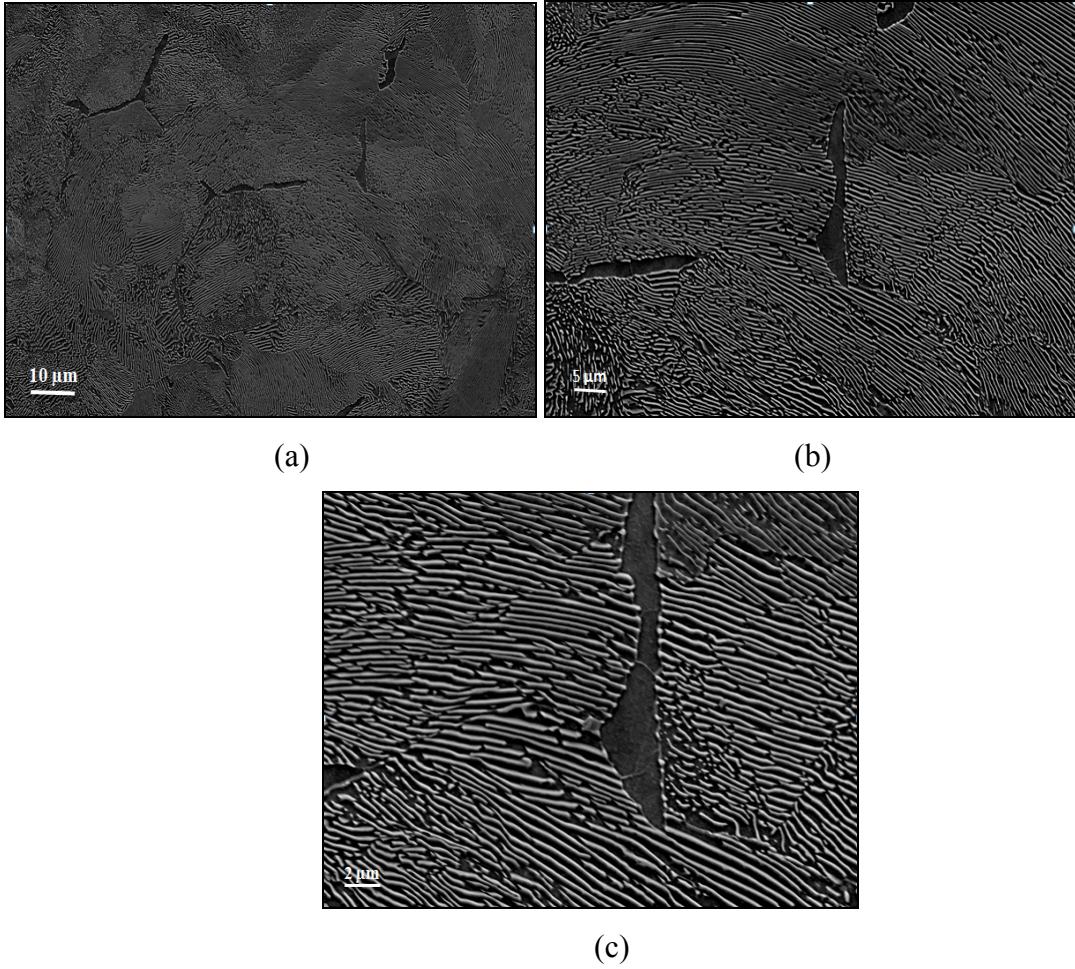
Şekil 5.11. En yüksek kalıntı gerilme değerine sahip raya ait mikroyapı görüntüleri (500X).

Şekil 5.9’da en düşük, Şekil 5.10’da ortanca ve Şekil 5.11’de en yüksek kalıntı gerilme değerine sahip raya ait mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Sertlik dağılımlarının yapıldığı bölgelerde LOM ile mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Yapılan incelemede ve sertlik sonuçlarına göre Rs bölgesinin diğer bölgelere göre daha sert olduğu görülmektedir. Rs noktasındaki mikroyapı görüntüsüne bakıldığında perlitik yapının daha etkin olduğu soğuma hızına bağlı olarak tane yapılarının daha belirgin olduğu aşıkardır. İç kısımlarda kalan mikro yapı görüntülerine bakıldığında ferrit yapının daha etkin olduğu ve sertliğinde dış bölgelere göre daha az olduğu değerlerden ve mikroyapı görüntülerinden anlaşılmaktadır. Bu durum soğuma hızına bağlı olarak sertliğin mantar kısmında merkezden kenar taraflarına doğru açıldıkça arttığı görülmektedir.

5.4. SEM KARAKTERİZASYONU

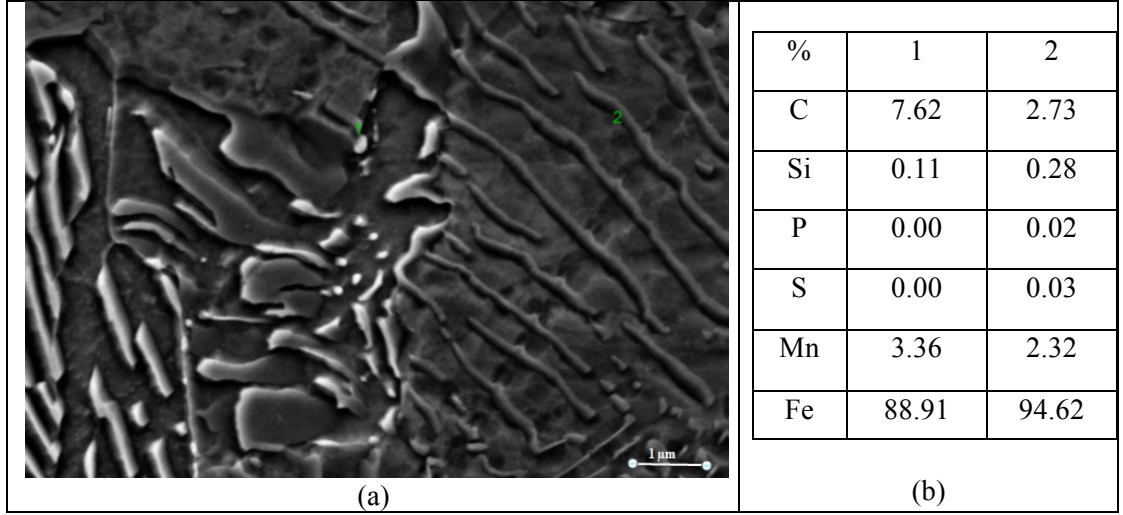
SEM Karakterizasyonu için birinci, ikinci ve dördüncü raylara analiz yapılmıştır. Kalıntı gerilmelerin en çok olduğu bölgeler olan rayların RS kısımlarından uygun ölçülerde numuneler çıkartılarak gerekli parlatma ve dağlama prosedürleri uygulandıktan sonra farklı büyütme hızlarında görüntüler incelenmiştir. 0.8 C’lu bu numunelerin mikroyapı görüntüleri değerlendirildiğinde perlitik yapı sergiledikleri net bir şekilde görülmüştür. Optik mikroskop görüntülerine göre perlitik yapıların ve lamellerin görüntüleri daha belirgindir. Bu numunelere ek olarak EDS analizleride yapılmıştır.

Aynı kompozisyona sahip ve herhangi bir ilave işlem görmemiş olan bu ray numuneleri benzer mikroyapı görüntülerine sahiptir. Numunelerin hepsinde hemen hemen yüzde yüz perlitik yapı görülmektedir. Şekil 5.12’ de en düşük kalıntı gerilme değerine sahip raya ait yine aynı büyütmelerde mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Sertlik değerlerinde birlikte ele alındığında, sonuçlar birbirlerine yakındır dolayısıyla lamellerin diziliminde ve birbirlerine olan mesafelerinde önemli bir değişiklik görülememektedir.

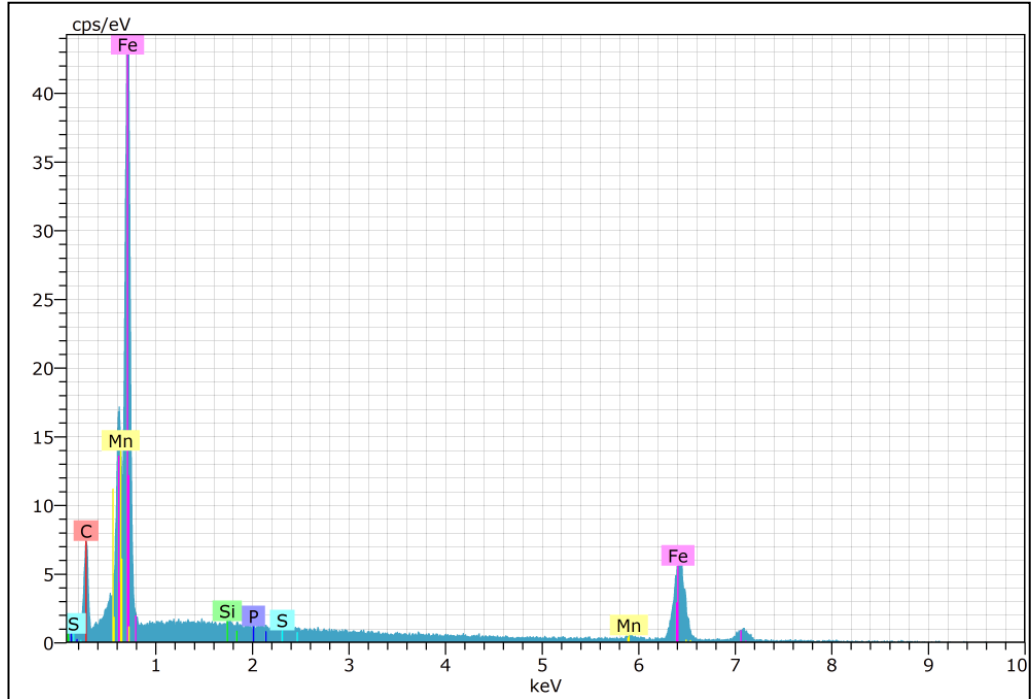


Şekil 5.12. En düşük kalıntı gerilme değerine sahip raya ait SEM görüntüleri a) 2000X b) 5000X c) 10000X.

Şekil 5.13'da en düşük kalıntı gerilme değerine sahip raya ait SEM görüntüsü ve EDS analiz sonucu verilmiştir. Bir numaralı bölgede karbürlerin olduğu aşıkardır. EDS analiz sonucuna göre bu bölgede Karbon ve Mangan miktarında önemli bir artış vardır. Aynı şekilde Şekil 5.14'de verilen EDS piklerinde de Karbon ve Mangan miktarındaki artış daha iyi görülmektedir.

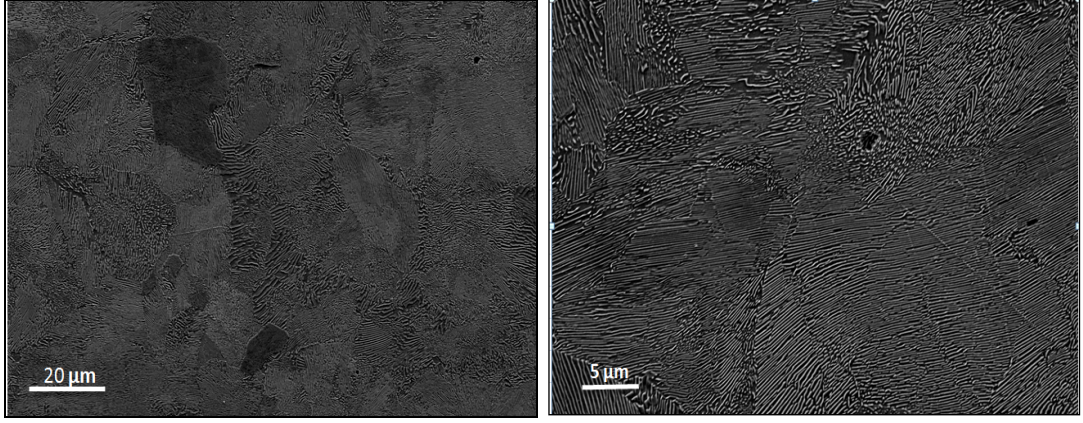


Şekil 5.13. En düşük kalıntı gerilme değerine sahip ray a) SEM görüntüsü b) EDS analizi.



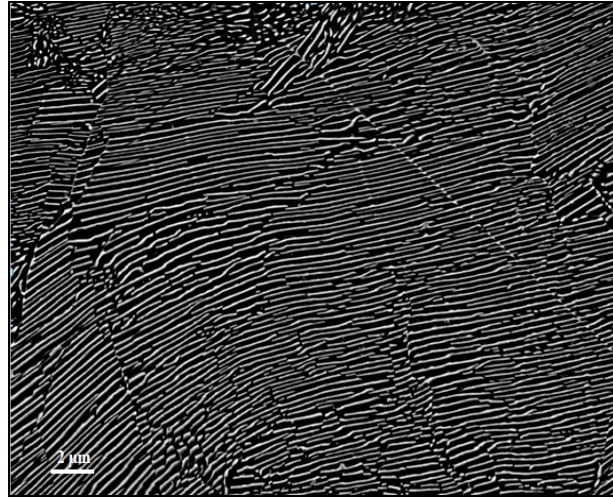
Şekil 5.14. En düşük kalıntı gerilme değerine sahip raya ait EDS pikleri.

Şekil 5.15'de ortanca raya ait, 2000X, 5000X ve 10000X büyütmelerindeki SEM görüntüleri verilmiştir. 10000X büyütmede perlitik yapının varlığı daha net bir şekilde görülmektedir.



(a)

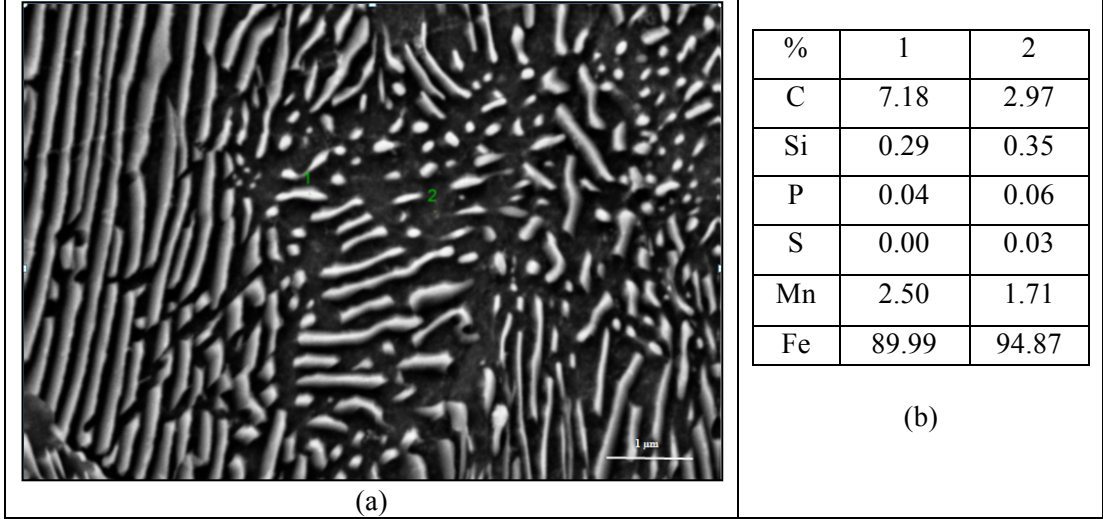
(b)



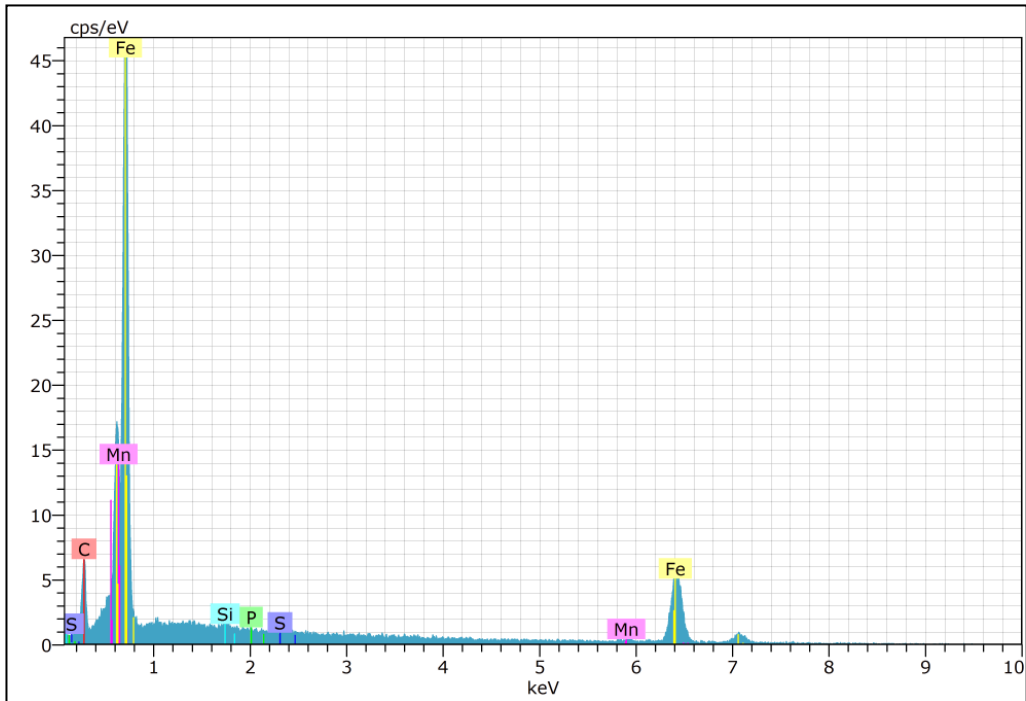
(c)

Şekil 5.15. Ortanca raya ait SEM görüntüleri a) 2000X b) 5000X c) 10000X.

Şekil 5.16’da ortanca raya ait EDS analiz sonucu ve SEM görüntüsü verilmiştir. Bir ve iki numaralı bölgeler incelendiğinde karbon miktarında ve Mangan miktarında artış olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.17’de ortanca raya ait EDS pikleride bu durumu desteklemektedir.

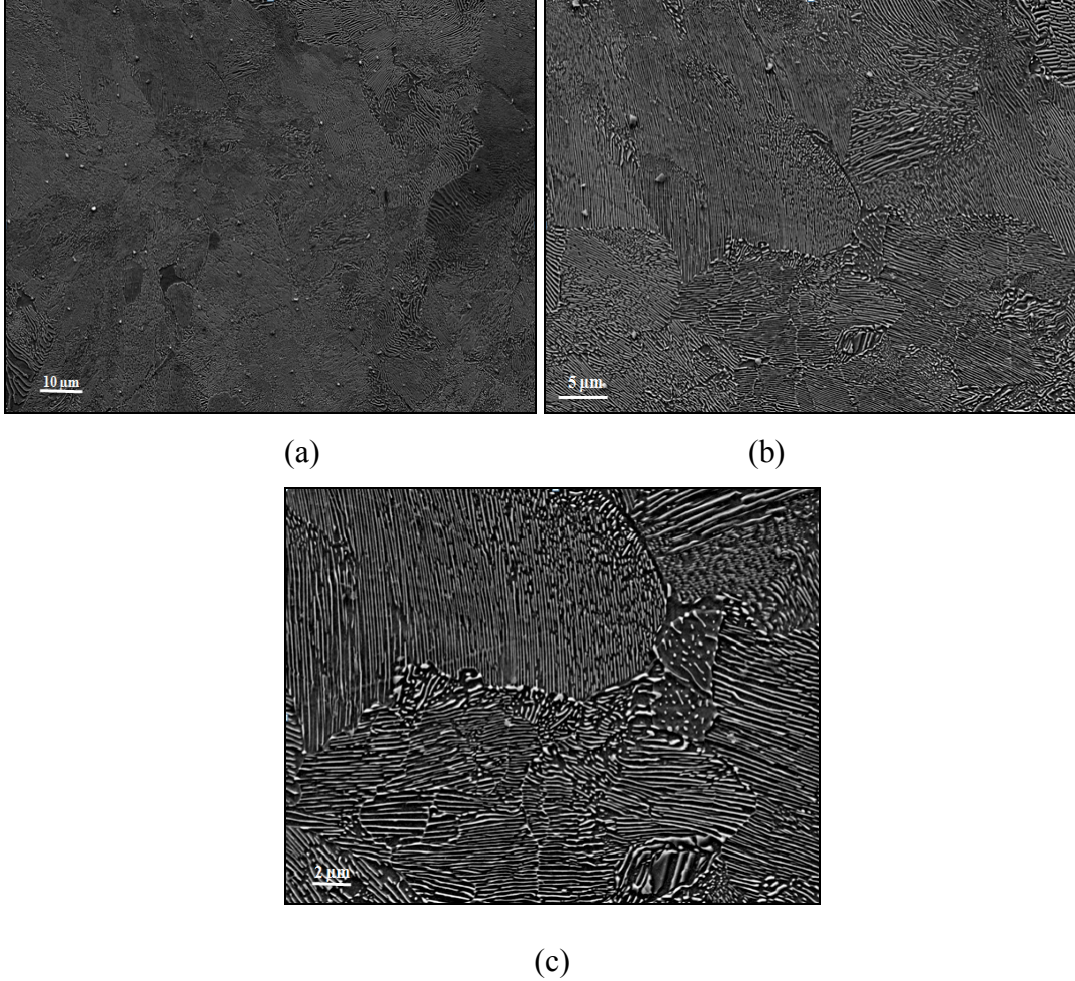


Şekil 5.16. Ortanca ray a) SEM görüntüsü b) EDS analizi.



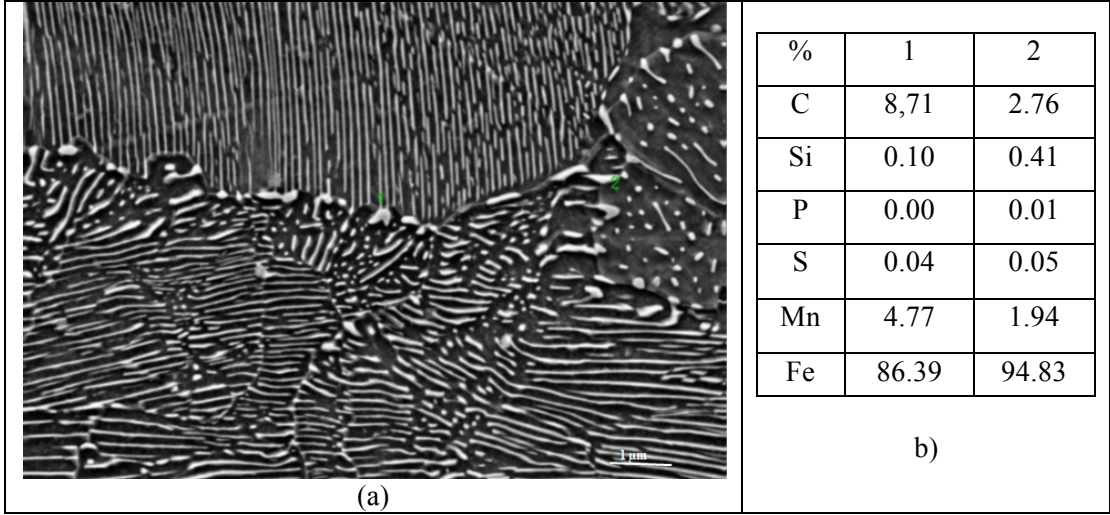
Şekil 5.17. Ortanca raya ait EDS pikleri.

Şekil 5.18'te kalıntı gerilme değeri en yüksek olan raya ait 2000X, 5000X ve 10000X büyütmelerinde SEM görüntüleri verilmiştir. Diğer numuneler gibi perlitik yapıya sahip olan bu rayda tane sınırlarında karbür çökeltilerinin oluştuğu da görülmektedir.

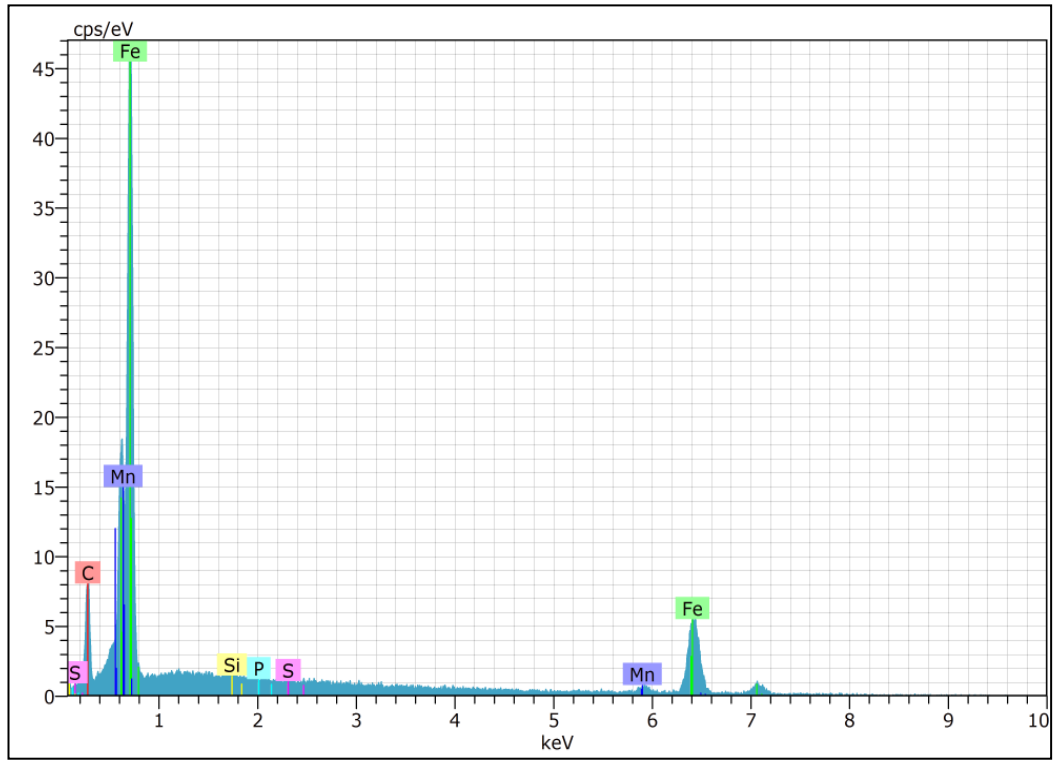


Şekil 5.18. En yüksek kalıntı gerilme değerine sahip raya ait SEM görüntüleri a) 2000X b) 5000X c) 10000X.

Şekil 5.19'da en yüksek kalıntı gerilme değerine sahip raya ait SEM görüntüsü ve EDS analiz sonucu verilmiştir. Tane sınırlarında karbür çökeltilerinin oluştuğu görülmektedir. Bu çökeltilerin üzerinden yapılan nokta EDS analizinden de anlaşılacağı gibi karbürlerin karbon oranı normal oranın üzerinde tespit edilmiştir. Ayrıca bu karbürlerin Mn oranı oldukça yüksek çıkmış ve bu durum Şekil 5.20'de verilen numuneye ait EDS piklerinden de net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.19. En yüksek kalıntı gerilme değerine sahip ray a) SEM görüntüsü b) EDS analizi.



Şekil 5.20. En yüksek kalıntı gerilme değerine sahip raya ait EDS pikleri.

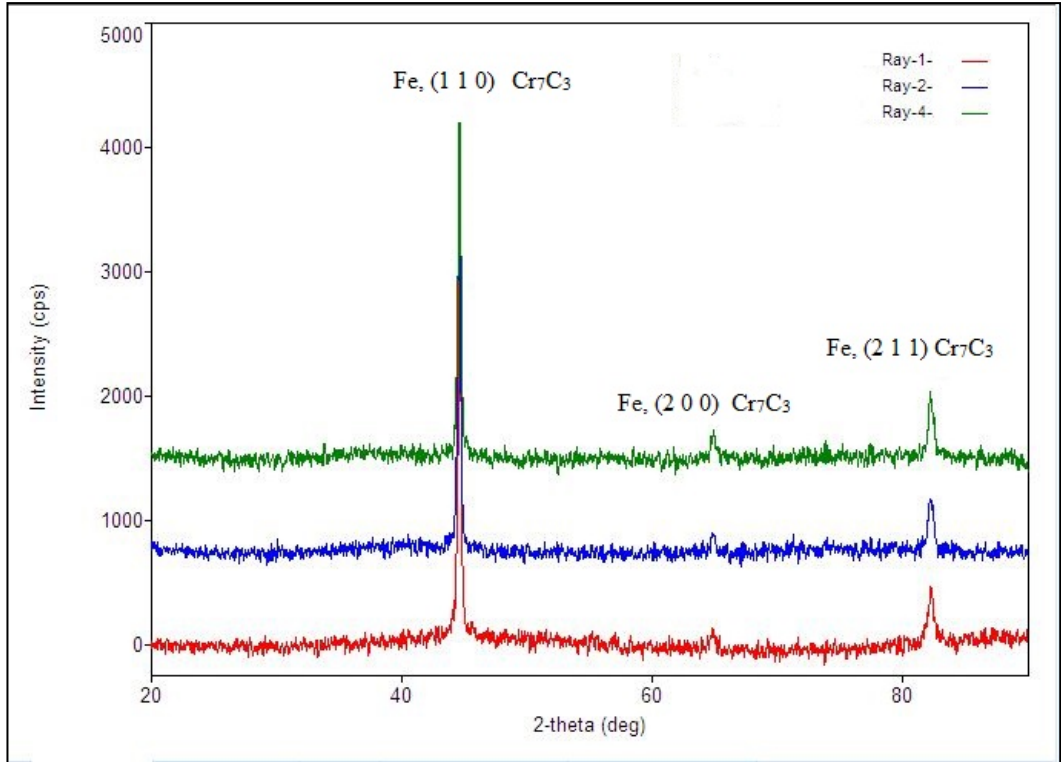
5.5. XRD KARAKTERİZASYONU

XRD Karakterizasyonu kalıntı gerilme değerlerinde farklılık gösteren birinci, ikinci ve dördüncü raylar için yapılmış, çıkan fazlar toplu olarak Çizelge 5.5’ te verilmiştir.

Çizelge 5.5. Numunelere yapılan X-ışını çekimleri sonucu elde edilen fazlar.

Numuneler	44°	63°	83°
En düşük kalıntı gerilme değerine sahip ray	Ferrit, Cr ₇ C ₃ ,	Ferrit, Cr ₇ C ₃ ,	Ferrit, Cr ₇ C ₃
Ortanca Ray	Ferrit, Cr ₇ C ₃ ,	Ferrit, Cr ₇ C ₃ ,	Ferrit, Cr ₇ C ₃
En yüksek kalıntı gerilme değerine sahip ray	Ferrit, Cr ₇ C ₃ ,	Ferrit, Cr ₇ C ₃ ,	Ferrit, Cr ₇ C ₃

Üç numuneye ait faz analizleri Şekil 5.21’de birlikte verilmiştir.



Şekil 5.21. Rayların faz analizleri.

Şekil 5.21 ve Çizelge 5.5'te görüldüğü üzere, bütün ray numunelerinden 44, 63, 83 20 açılarında aynı pikler elde edilmiş ve şiddetleri de birbirlerine yakınlık göstermektedir. Tüm numunelerden elde edilen fazlar, ferrit ve Cr₇C₃ fazlarıdır.

5.6. ÇEKME TEST SONUÇLARI

Kalıntı gerilme değeri en düşük olan, ortalama değerde olan ve en yüksek olan 3 adet ray numunesine yapılan çekme testi sonucunda elde edilen akma, çekme mukavemeti ve % uzama değerleri Çizelge 5.6' da verilmiştir.

Çizelge 5.6. Raylara ait çekme test sonuçları.

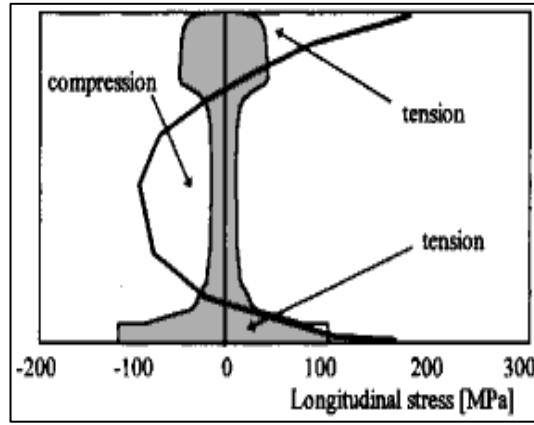
Numune	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	% uzama
En düşük kalıntı gerilme değerine sahip ray	609	956	7,6
Ortanca Ray	616	967	7,3
En yüksek kalıntı gerilme değerine sahip ray	621	972	7,1

Kalıntı gerilme değeri en yüksek olan rayın akma ve çekme mukavemeti en yüksek, yüzde uzaması ise en düşüktür. En düşük kalıntı gerilme değerine sahip olan rayın akma ve çekme mukavemeti değerleri en düşüktür. Bunun yanında %7.6 ile en fazla uzama değeri bu raya aittir.

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLARIN İRDELENMESİ

Raylarda kalıntı gerilme genellikle haddelemeden sonra orantısız soğuma ve doğrultma işleminin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Raylardaki kalıntı gerilme bölgeleri Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



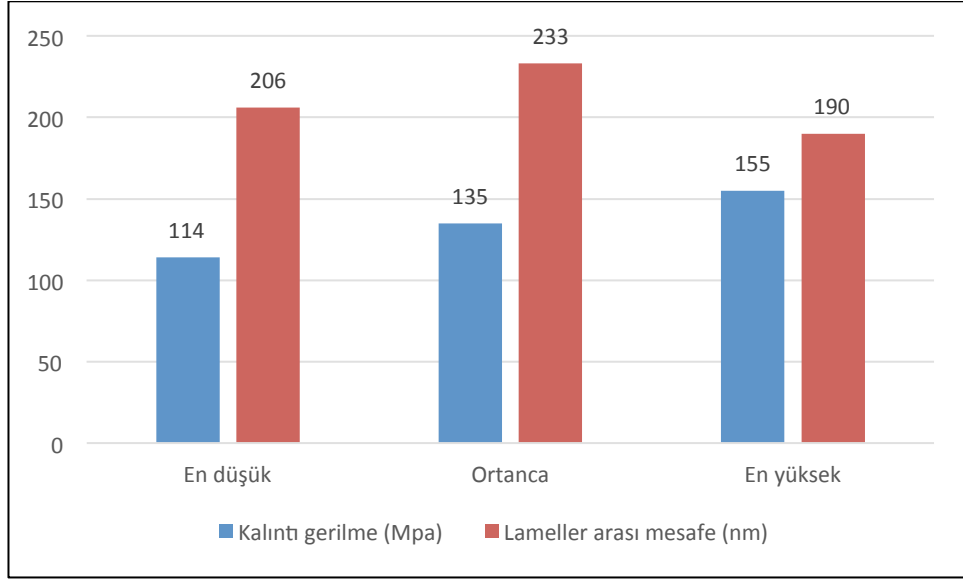
Şekil 6.1. Raylarda oluşan basma ve çekme kalıntı gerilme bölgeleri.

Raylardaki kalıntı gerilme değerlerine bakıldığında mantar ve taban kısmında çekme kalıntı gerilmeleri, web kısmında basma kalıntı gerilmeleri görülmektedir.

6.1. KALINTI GERİLME SERTLİK İLİŞKİSİ

Maksimum kalıntı gerilme 155 MPa olan ray maksimum 291 HB sertliğe sahip minimum 267 HB sertliğe sahiptir. 135 MPa kalıntı gerilmesine sahip olan rayın maksimum sertliği 282 HB minimum sertliğin ise 270 HB olduğu görülmektedir. 114 MPa kalıntı gerilmeye sahip olan rayın maksimum sertliği 285 HB, minimum sertliği 270 HB olduğu görülmektedir.

Kalıntı gerilme ve sertlik arasındaki ilişki Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Kalıntı gerilme sertlik ilişkisi.

6.2. KALINTI GERİLME MİKROYAPI İLİŞKİSİ

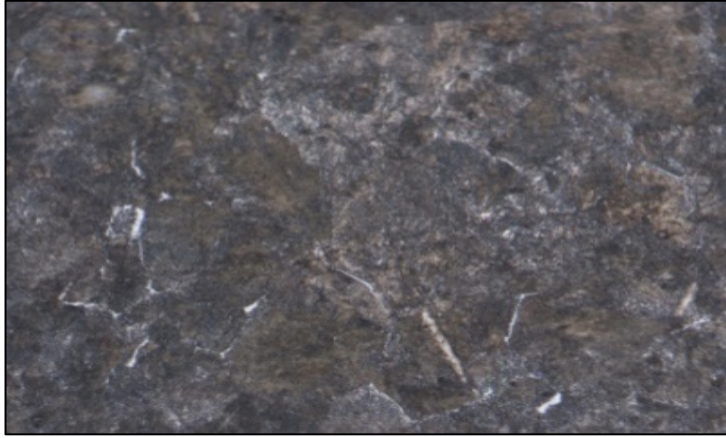
Şekil 6.3’ de üç farklı rayın RS noktalarının mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde ortanca ve en düşük kalıntı gerilme değerine sahip rayın, en yüksek kalıntı gerilme değerine sahip raya göre perlit yapının yanı sıra ferrit yapının da oluştuğu görülmektedir. Bu durum sertlik sonuçlarından da görülmektedir. Orta rayın RS noktasında 282 HB, en düşük kalıntı gerilme değerine sahip rayın RS noktasında 285 HB, en yüksek kalıntı gerilme değerine sahip rayın RS noktasında ise 291 HB olarak ölçülmüştür. Bu, kalıntı gerilme değeri en yüksek olan rayın daha hızlı soğuduğunu göstermektedir. Soğuma hızının değişmesi ray mantar kısmında merkezi ile yüzey arasındaki sertlik farkını değiştirdiğinden dolayı malzemedeki kalıntı gerilmeyi de değiştirdiği düşünülmektedir.



(a)



(b)



(c)

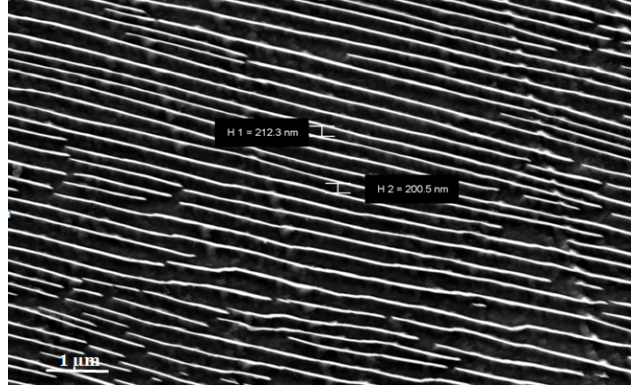
Şekil 6.3. Ray yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri a) Kalıntı gerilme değeri en düşük b) Orta c) Kalıntı gerilme değeri en yüksek.

6.3. KALINTI GERİLME LAMELLER ARASI MESAFE İLİŞKİSİ

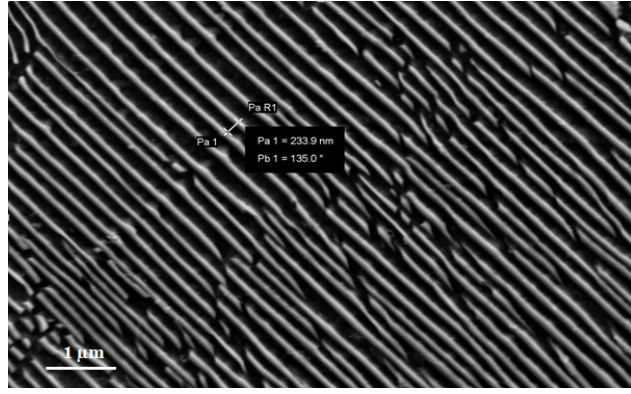
Sertliğin değişmesine bağlı olarak raylarda lameller arası mesafede değişmiştir. Şekil 6.4'te en düşük, ortanca ve en yüksek kalıntı gerilmeye sahip raylara ait SEM görüntüleri verilmiş ve lameller arası mesafe değerleri ölçülmüştür. Ortanca rayın ortalama lameller arası mesafe değeri 233.9 nm. çıkmıştır. En düşük kalıntı gerilme değerine sahip ray için ortalama lameller arası mesafe 206 nm.'dir. Bu rayın lameller arası mesafe değeri ortanca raydan daha azdır. Bu da sertliğinin daha fazla olduğunu göstermektedir.

Kalıntı gerilme değeri en yüksek olan ray için SEM görüntüsü ve lameller arası mesafe değerine bakıldığında, lameller arası mesafe değerinin en küçük olduğu numune bu numunedir. Dolayısıyla sertliği en fazla olan ray bu numunedir. Sertlik ölçüm sonuçları da bu durumu çok açık bir şekilde desteklemektedir.

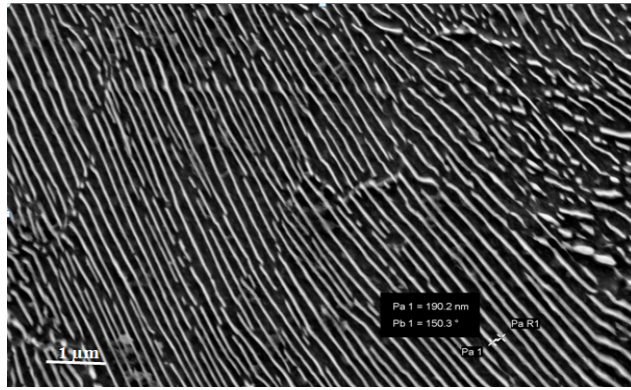
Sertlik ve beraberinde kalıntı gerilme değerleri lameller arası mesafeyle birlikte değişim göstermektedir. Kalıntı gerilme değeri en düşük olan, ortalama değerde olan ve kalıntı gerilme değeri en yüksek olan raylara yapılan SEM analizlerinden sonra lameller arası mesafelerde farklılık olduğu görülmüştür. Çizelge 6.1'de kalıntı gerilme ve lameller arası mesafe değerleri tablo halinde verilmiştir.



(a)



(b)

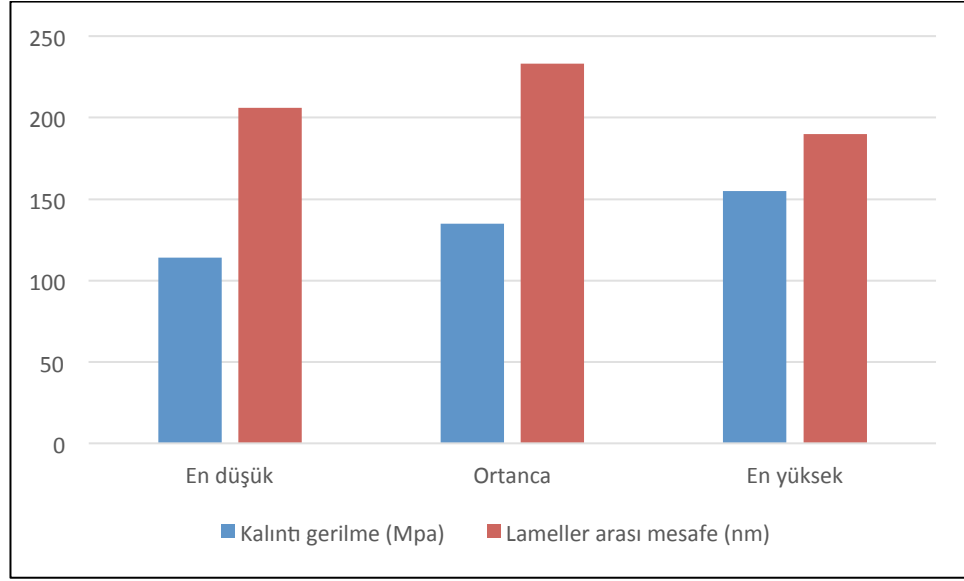


(c)

Şekil 6.4. Ray yüzeylerinin lameller arası mesafe değerleriyle birlikte SEM görüntüleri a) En düşük kalıntı gerilme değerine sahip ray b) Ortanca ray c) En yüksek kalıntı gerilme değerine sahip ray.

Çizelge 6.1. Kalıntı gerilme lameller arası mesafe ilişkisi.

Numune	Kalıntı Gerilme değeri (MPa)	Lameller arası mesafe (nm)
Ray-1	135	233,9
Ray-2	114	206
Ray-4	155	190



Şekil 6.5. Kalıntı gerilme ve lameller arası mesafe ilişkisi.

Şekil 6.5’ de kalıntı gerilme ve lameller arası mesafe ilişkisi verilmiştir. En yüksek kalıntı gerilme değerine sahip olan rayın lamelleri arasındaki mesafe değeri en küçük çıkmıştır. Lameller arası mesafe değeri en küçük olan ray ise ortanca raya aittir. Kalıntı gerilme malzemelerin mekanik özelliklerini doğrudan etkilediği için dolaylı olarak malzemelerin mikroyapısını da ve lamellerin dizilimini, bu lameller arasındaki mesafeyide etkilemektedir.

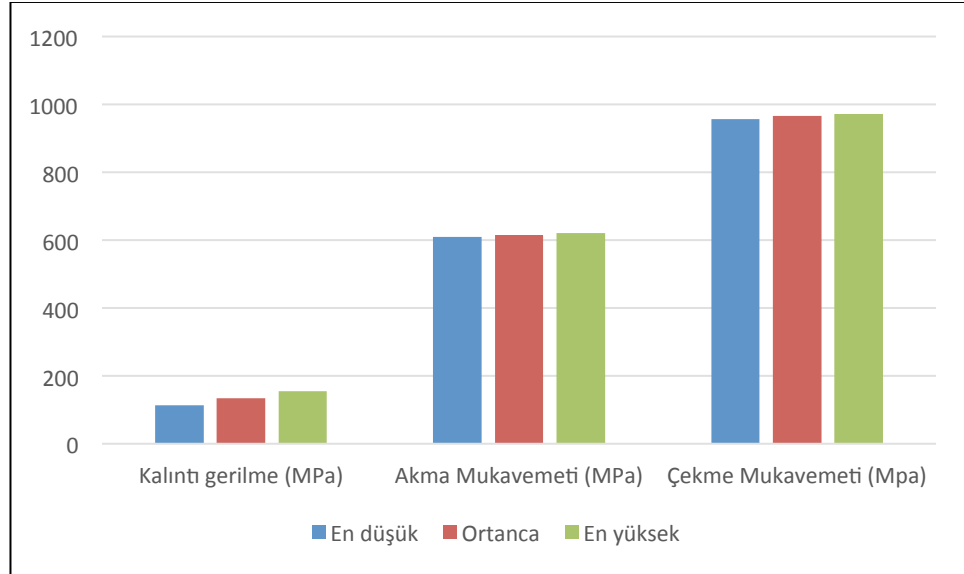
6.4. KALINTI GERİLME AKMA VE ÇEKME MUKAVEMETİ İLİŞKİSİ

Çizelge 6.2’ de raylara ait kalıntı gerilme değeriyle çekme testleri neticesinde elde edilen akma ve çekme mukavemeti değerleri verilmiştir. Kalıntı gerilme değeri yüksek olan rayın akma mukavemeti ve çekme mukavemeti daha yüksek çıkmıştır.

Çizelge 6.2. Kalıntı gerilme akma ve çekme mukavemeti ilişkisi.

Ray	Kalıntı gerilme (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
En düşük kalıntı gerilme değerine sahip ray	114	609	956
Ortanca	135	616	967
En yüksek kalıntı gerilme değerine sahip ray	155	621	972

Şekil 6.6’da kalıntı gerilme ve akma çekme mukavemet ilişkisi belirgin bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 6.6. Kalıntı gerilme akma çekme mukavemeti ilişkisi.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR

Bu çalışmada demir yollarında kullanılan R260 kalite raylara kalıntı gerilme ölçümü yapılmış ve mekanik özelliklerle ilişki kurulmuştur. Öncelikle altı adet raya kesme yöntemiyle kalıntı gerilme ölçümü yapılmıştır. Ölçümü tamamlanan raylara sertlik dağılımı yapılarak kalıntı gerilme ve sertlik arasında ilişki kurulmuştur. Yapılan mikroyapı karakterizasyonları, SEM, XRD ve Optik Mikroskoptur. Sertlik ve mikroyapı incelemelerinin ardından çekme testleri yapılarak akma, çekme mukavemetleri ve yüzde uzamalarıyla ilgili bilgi edinilmiştir. Ayrıca tahribatlı yöntemle kalıntı gerilme ölçümüne ek olarak tahribatsız yöntemlerden X ışını kırınımı yöntemi kullanılarak kalıntı gerilme ölçümü yapılmıştır.

- Kesme yöntemiyle yapılan kalıntı gerilme ölçümleri sonucunda en yüksek kalıntı gerilme değeri 155 MPa ile dördüncü ray, en düşük kalıntı gerilme değeri ise 114 MPa ile ikinci raya aittir. Ortalama kalıntı gerilme değeri ise 135 MPa civarındadır.
- Özellikle ray mantarının RS bölgesi incelendiğinde yapılan sertlik ölçümlerinin sonunda en yüksek sertlik değeri 291 MPa ile dördüncü raya en düşük sertlik değeri ise 282 MPa ile birinci raya aittir.
- Tahribatsız X ışını kırınımı yöntemiyle yapılan kalıntı gerilme ölçümü sonucunda en yüksek değer 350 MPa ile dördüncü raya, en düşük değer ise 207 MPa ile ikinci raya aittir.
- XRD ve EDS analizlerinde tane sınırlarında karbürlerin olduğu görülmektedir.

- Kalıntı gerilme değeri en yüksek olan rayın lameller arası mesafe değeri 190 nm.'dir. Kalıntı gerilme değeri en düşük olan rayın lameller arası mesafe değeri 234 nm. kalıntı gerilme değeri ortalamalarda olan diğer rayın ise 206 nm. ıkmıştır.
- Çekme testi sonuçlarına göre kalıntı gerilme değeri arttıķa akma ve çekme mukavemetinde artış görülmektedir. Malzemedeki yüzde uzama miktarı ise ters orantılı olarak değişmektedir.

KAYNAKLAR

1. Bhadeshia, H., “Steel for rails”, *Encyclopedia of Materials Science and Technology*, Elsevier, (2002).
2. Tulumtaş, “H. Ray Üretim Teknolojisindeki Gelişmeler ve Türkiye’de Üretim İmkanları”, <http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/12073.pdf> (2013).
3. Kardemir A. Ş., “Ray Üretimi”, Stajyer Öğrenci Eğitim Notları, *Kardemir A. Ş.*, 4: 12-36 (2008).
4. TCDD, “Ray Alım Teknik Şartnamesi”, *TCDD 1. Bölge Müdürlüğü*, İstanbul. (2012).
5. Haddehaneler Müdürlüğü, “Hizmetiçi Eğitim Notları”, *Kardemir A.Ş.*, Yayın No: 33, Karabük. (2000).
6. Kamlesh, K. J., and Murthy, R., “Improvements in rail steel metallurgy for 32.5T Axle Load”, *N.E. Railway Southern Railway Publish*, No: 712: 1-27 (2002).
7. Koymatçık, H., “R260 kalite rayların optimum mantar sertleştirme parametrelerinin belirlenmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 1-28 (2012).
8. Torun, A., “Ray haddeleri gelişim süreci ve teknolojisi araştırma raporu”, *Kardemir A.Ş.*, Karabük, (2003).
9. Onat, Ö., “Mantarı sertleştirilmiş raylarda aşınma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 25-35 (2012).
10. Yiğit, O., Dilmeç, M., ve Halkacı, S., “Tabaka kaldırma yöntemiyle kalıntı gerilmelerin ölçülmesi ve diğer yöntemlerle karşılaştırılması” *Mühendis ve Makine Dergisi*, 49 (579): 1-8 (2008)
11. Ortadoğu Rulman Sanayi ve Ticaret A. Ş., “Ors rulmanları ve makaralarının yorulma ömrünün artırılması için kalıcı gerilmelerin iyileştirilmesi”, *ORS Bülteni*, Sayı 5 (2004).
12. Fetullayev, E. K., “Talaş kaldırma yöntemi ile üretilen vidalı elemanlara yüzey katında oluşan artık gerilmelerin vida elemanlarına etkisi”, *Uluslararası Makine Tasarımı ve İmalat Kongresi*, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara (1998).

13. Totten, G., Howes, M., and Inoue, T., “Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel”, *Materials Park*, Ohio, 424-436 (2002).
14. Kafkas, F., Karatas, Ç., Sozen, A., Arcaklioglu, E., and Saritas, S., “Determination of residual stresses based on heat treatment conditions and densities on a hybrid (In2-4405) powder metallurgy steel using artificial neural network”, *Materials and Design*, 28: 2431–2442 (2007).
15. Honner, M., Litos, P., and Svantner, M., “Thermography analyses of the hole-drilling residual stress measuring technique”, *Infrared Physics & Technology*, 45: 131-142 (2004).
16. Price, J. W. H, Paradowska, A. Z., Joshi, S., Finlayson, T., Semelay, C. and Nied, H., “Comparison of experimental and theoretical residual stresses in welds: The issue of gauge volume”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 50: 513-521 (2008).
17. Winholtz, R. A., and Cohen, J. B., “Changes in the macrostresses and microstresses in the steel with fatigue”, *Materials Science and Engineering A*, 154 (2): 155-163 (1992).
18. Withers P. J. and Bhadeshia H. K. D. H., “Residual stress, part 1- measurement techniques”, *Materials Science and Technology*, 17 (A): 355-365 (2001).
19. Schajer, G. S., “Residual stresses: measurement by destructive testing”, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Elsevier, 8152-8158 (2001).
20. Ekmekci, B., “Theoretical and experimental investigation of residual stresses in electric discharge machining”, Ph. D. Thesis, *The Middle East Technical University*, Ankara (2004).
21. Stablein, F., “Spannungsmessungen in eiseiting abgeloschten Knüppeln” *Kruppsche Monatshefte*, Jarhgang, 93-99 (1931).
22. Dronavalli, S. B., “Residual stress measurements and analysis by destructive and non-destructive techniques”, *University of Nevada*, Las Vegas, 15-23 (2004).
23. Zhang, Y., Pratihari, S., Fitzpatrick, M. E. and Edwards, L., “Residual stress mapping in welds using the contour methods”, *Material Science Forum*, 490-491: 294-299 (2005).
24. Prime, M. B., “Residual stress measurement by successive extension of a slot: the crack compliance method”, *Applied Mechanics Reviews*, 52: 75-96 (1999).
25. Andrew L., Gyekenyesi, G. And Baaklini, Y., “Thermoelastic stress analysis: the mean stress effects in metallic alloys”, *NASA/TM*, US (1999).

26. Prev y, P. S., “X-ray diffraction residual stress techniques”, *Metals Handbook, 10. Metals Park: American Society for Metals*, 380-392 (1986).
27. Yelbay, İ. H., “Tahribatsız y ntemlerle kalinti gerilim  l m ndeki gelişmeler”, *3rd International Non-Destructive Testing Symposium and Exhibition*, İstanbul, 1-3 (2008).

ÖZGEÇMİŞ

Muhammet Emre TURAN, 1989 yılında Erzurum’da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Tuzla Behiye Dr. Nevhiz Işıl Anadolu Lisesi’nden 2007 yılında mezun oldu. 2008 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimine başlayıp 2013 yılında iyi derece ile mezun oldu. 2013 yılının Temmuz ayında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi’nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2013 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başlamış olduğu yüksek lisans öğrenimine halen devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi
Demir Çelik Enstitüsü
Balıklarkayası Mevkii / 78050 KARABÜK
Tel : (507) 1169234
E-posta : memreturan@karabuk.edu.tr