

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

**MANTARI SERTLEŞTİRİLMİŞ RAYLARDA YORULMA DAVRANIŞI
İNCELENMESİ**

SAİT ÖZÇELİK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MALZEME MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. ERGÜN KELEŞOĞLU**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANTARI SERTLEŞTİRİLMİŞ RAYLARDA YORULMA
DAVRANIŞI İNCELENMESİ

Sait ÖZÇELİK tarafından hazırlanan tez çalışması 15/01/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Ergün KELEŞOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Eş Danışman

Doç. Dr. Hayrettin AHLATÇI
Karabük Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ergün KELEŞOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hayrettin AHLATÇI
Karabük Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet KARAARSLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Yavuz SUN
Karabük Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu çalışma Yıldız Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Mühendisliği Programı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Tez konumun belirlenmesinde ve çalışmaların tamamlanmasında bana yol gösterdikleri için danışman hocalarım Yıldız Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Ergün KELEŞOĞLU ve Karabük Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Hayrettin AHLATÇI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmada tecrübelerini benimle paylaşan ve yardımlarını esirgemeyen Yard. Doç. Dr. Naci KURGAN ve Arş. Gör. Harun ÇUĞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarımın tüm aşamalarında desteklerini esirgemeyen Kardemir A.Ş. Haddehaneler Müdürü İbrahim TOZLU, Haddehane İşletme Mühendisi Tahir GÜLEGEN, Kalite Kontrol Başmühendisi Figen DİKİLİTAŞ, Kalite Kontrol Mühendisi Hüseyin KOYMATÇIK'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar kapsamında kıymetli yardımlarından ötürü İdris KÜÇÜK, Bilal HÜSEM, Zülfi YILMAZ, Emre KÜÇÜK, İbrahim GÖÇ, Zafer MUTLU, Ümit FARAŞ, Kerem Ali BAKACAK ve Muammer TÜFEKÇİ'ye teşekkür ederim.

Bu yorucu süreçte bana destek olan ve anlayış gösteren aileme, özellikle akademisyenliği seçmeme sebep olan kardeşime ve son olarak da müstakbel eşime sonsuz şükranlarımı sunarım.

Aralık, 2013

Sait ÖZÇELİK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	ix
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiiv
ABSTRACT.....	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	3
BÖLÜM 2	
DEMİRYOLLARINDA KULLANILAN RAYLAR.....	4
BÖLÜM 3	
DEMİR YOLU RAYLARI ÜRETİMİ	7
3.1 Yüksek Fırın Prosesi	7
3.2 Çelikhane Prosesleri	8
3.2.1 Bazik Oksijen Konverteri.....	8
3.2.2 Pota Fırını ve Vakum Altında Gaz Giderme	10
3.2.2.1 Yapıdaki Elementlerinin Ray Çeliğine Etkileri.....	10
3.2.2.1.1 Karbon (C).....	10
3.2.2.1.2 Mangan (Mn).....	11
3.2.2.1.3 Silisyum (Si)	11
3.2.2.1.4 Fosfor (P)	11
3.2.2.1.5 Kükürt (S).....	11
3.2.2.1.6 Krom (Cr)	11
3.2.2.1.7 Nikel (Ni).....	12
3.2.2.1.8 Molibden (Mo)	12
3.2.2.1.9 Vanadyum (V).....	12

3.2.2.1.10 Niyobyum (Nb)	12
3.2.2.1.11 Bakır (Cu)	12
3.2.2.1.12 Alüminyum (Al).....	13
3.2.2.1.13 Oksijen (O).....	13
3.2.2.1.14 Azot (N).....	13
3.2.2.1.15 Hidrojen (H)	13
3.2.3 Sürekli Döküm	14
3.3 Haddehane Prosesleri	15
3.3.1 Ray Çeliğinin Tavlanması	15
3.3.2 Ray Çeliğinin Haddelenmesi	16
3.4 Özelliklerine Göre Ray Sınıfları	17
3.4.1 Doğal Olarak Sert Raylar.....	17
3.4.2 Termal Olarak İşlem Gören Raylar	18
3.4.3 Yüksek Alaşımli Raylar	19
3.4.4 Beynitik Raylar	19
3.4.5 Korozyona Dirençli Raylar	20

BÖLÜM 4

MANTAR SERTLEŞTİRME PROSESİ.....	21
4.1 Mantar Sertleştirme Prosesinin Gerekliliği	21
4.2 Rayların Isıl İşlemi	24
4.2.1 Raylarda Su Verme İşlemi ve Sonuçları	25
4.2.2 Raylar İçin Su Verme Sistemleri.....	28
4.2.3 Su verme İşleminin Sonuçları	30

BÖLÜM 5

YORULMA	32
5.1 Yorulma Kavramının Tanımı ve Önemi.....	32
5.2 Yorulma Olayında Çevrimli Yükleme ve Terminoloji	33
5.3 Yorulma Kopması ve Yorulma Sınırı	35
5.3.1 Yorulma Kopması.....	35
5.3.2 Yorulma Sınırı	40
5.4 Wöhler Eğrileri (S-N Eğrileri)	41
5.4.1 Wöhler Eğrilerinin Oluşturulması.....	41
5.4.2 Wöhler Eğrilerinin İncelenmesi	43
5.5 Smith Diyagramları (Yorulma Dayanım Diyagramları)	44
5.6 Yorulmaya Etki Eden Faktörler	46
5.6.1 Malzemenin Çekme Mukavemeti	46
5.6.2 Çentik Etkisi	47
5.6.3 Korozyon Etkisi	48
5.6.4 Yükleme Şeklinin Etkisi	49
5.6.5 Frekans Etkisi.....	49
5.6.6 Boyut Etkisi	49
5.6.7 Sıcaklık Etkisi.....	50
5.6.8 Gerilme Genliğinin Etkisi	50
5.6.9 Yüzey İşlemlerinin Etkisi	51

5.7 Yorulma Testi için Kullanılan Makineler	51
5.7.1 Döner Eğmeli Yorulma Düzeneği.....	51
5.7.2 Tekrarlanan Eğilme Deney Düzeneği.....	53
5.7.3 Dört Noktadan Eğilmeli Yorulma Deney Düzeneği.....	53
5.7.4 Mekanik Osilatör	54
BÖLÜM 6	
TREN RAYLARINDA YORULMA	55
BÖLÜM 7	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	58
7.1 Raylara Uygulanan Isıl İşlemler	58
7.2 Sertlik Ölçümleri	59
7.3 Mikroyapı İncelemeleri.....	60
7.4 Çekme Deneyleri	61
7.5 Yorulma Deneyleri	62
BÖLÜM 8	
DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME.....	64
8.1 Isıl İşlemlerin Sıcaklık-Zaman-Dönüşüm (TTT) Diyagramında İncelenmesi	64
8.2 Mantar Kesitlerinde Yapılan Sertlik Ölçümleri	66
8.3 Mikroyapı Çalışmaları.....	68
8.4 Çekme Deneyi.....	73
8.5 Yorulma Deneyi	74
BÖLÜM 9	
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	80
KAYNAKLAR	82
ÖZGEÇMİŞ	86

SİMGE LİSTESİ

R_m	Çekme mukavemeti
R_a	Akma mukavemeti
K_{1c}	Kırılma tokluğu
S	Stress
N	Çevrim sayısı
σ	Gerilme
σ_{alt}	Alt gerilme
$\sigma_{üst}$	Üst gerilme
σ_{ort}	Ortalama gerilme
σ_y	Yorulma dayanımı
σ_G	Gerilme genliği
N_{ζ}	Çekirdeklenme evresi
N_i	İlerleme evresi
$B_{\zeta en}$	Çentik faktörü
Hz	Hertz
D	Çap
kN	Kilonewton
MPa	Megapascal

KISALTMA LİSTESİ

ASTM	American Society For Testing and Materials
BOF	Basic Oxygen Furnace
EN	European Norm
HB	Hardness of Brinnell
HH	Head Hardened
HT	Heat Treatment
HV	Hardness of Vickers
ISO	International Organization Of Standardization
LD	Linz-Donawiz
LDAC	Argon yöntemli konverter tipi
LHT	Low Heat Treatment
OBM	Oxygen and Lime Bottom Blowing Process
R	Rail
RS	Rail Surface
PPM	Part Per Million
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
TTT	Time Temperature Transformation
UIC	International Union Of Railway

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1	R260, R260Mn, R350HT ve R350LHT sınıfı raylarda tane sınırlarında izin verilen ferrit miktarı için (a)500X büyütmede referans mikroyapı fotoğrafı ve (b) diyagramı	5
Şekil 3. 1	Yüksek fırın tepkimeleri	8
Şekil 3. 2	Bazık Oksijen Fırını ve Ekipmanları	9
Şekil 3. 3	Sürekli döküm şeması	15
Şekil 3. 4	Ray haddehanesi merdane pasoları	16
Şekil 3. 5	Ray doğrultma ünitesi	17
Şekil 3. 6	Doğal sertlikteki ve ısıtılma işlemle sertleştirilmiş rayların çekme diyagramları	18
Şekil 4. 1	Sertlik aşınma mukayese.....	23
Şekil 4. 2	Farklı kalitedeki rayların aşınma davranışları.....	24
Şekil 4. 3	% 0,75 C + % 1 Mn içeren ray çeliğinin sürekli soğuma dönüşüm diyagramı	26
Şekil 4. 4	Perlitik yapıda lameller arası mesafe – akma mukavemeti ilişkisi.....	26
Şekil 4. 5	Dönüşüm sıcaklığı-mekanik özellik ilişkisi.....	27
Şekil 4. 6	“In-line” tipi su verme sistemi	28
Şekil 4. 7	“Off-line” tipi su verme sistemi.....	28
Şekil 4. 8	“Daldırma” yöntemiyle su verme sistemi	29
Şekil 4. 9	“Sprey” yöntemiyle su verme sistemi.....	29
Şekil 4. 10	R350HT kalite raylar için EN 13674-1 standardındaki sertlik dağılımı.....	30
Şekil 4. 11	Mantar sertleştirme işlemi öncesi ve sonrasında çekme diyagramları.....	30
Şekil 5. 1	Dinamik yüklemede zamana göre yükün değişimi.....	34
Şekil 5. 2	Yorulma kopmasına uğramış kesitin şeması.....	36
Şekil 5. 3	Yorulma çatlağı teşekkülü ve ilerlemesi.....	37
Şekil 5. 4	Yorulma hasarının safhaları.....	38
Şekil 5. 5	Millerde yorulma hasarı sonucu kırılma yüzeyleri	39
Şekil 5. 6	Wöhler eğrisi.....	42
Şekil 5. 7	Çelik ve demir dışı malzemeler için şematik Wöhler eğrileri	43
Şekil 5. 8	Wöhler eğrisinin fazları	43
Şekil 5. 9	Tipik bir Smith diyagramı.....	45
Şekil 5. 10	Farklı yorulma ömürleri için Smith diyagramları.....	46
Şekil 5. 11	Muhtelif malzemelerin Wöhler eğrileri	47
Şekil 5. 12	Döner Eğmeli Yorulma Cihazı Şematik Gösterimi	52
Şekil 5. 13	Dönel eğmeli yorulma numunesinde moment diyagramı.....	52

Şekil 5. 14	Tekrarlanan Eğilme Deney Düzenekinin Şematik Gösterimi.....	53
Şekil 5. 15	Dört noktadan eğilmeli yorulma deneyinin şematik gösterimi.....	53
Şekil 5. 16	Düzlemsel egme gerilmesi uygulayan “Sonntag” modeli yorulma deneyi cihazı seması	54
Şekil 6. 1	Ray mantarı kesitinde gerilme dağılımı	56
Şekil 6. 2	Ray mantarında yorulma hasarı	56
Şekil 6. 3	Ray mantarında sertliğin yuvarlanma temas yorulmasının başlangıcına etkisi	57
Şekil 7. 1	Optimal marka ısıtma işlem fırını	59
Şekil 7. 2	Su verme düzenekleri	59
Şekil 7. 3	TS EN 13 674 standardına göre sertlik değerlerinin alınacağı bölgeler	60
Şekil 7. 4	Sertlik ölçümlerinin yapıldığı Zwick/Roell marka universal sertlik cihazı	60
Şekil 7. 5	Görülen Struers TegraPol 21 Tegraforce 5 marka otomatik parlatma cihazı	61
Şekil 7. 6	Nikon Eclipse MA 200 model optik mikroskop	61
Şekil 7. 7	TS EN 13674 standardına göre çekme testi için numune alınacak bölgeler	61
Şekil 7. 8	Çekme testi hazırlanan numunelerin teknik resmi	62
Şekil 7. 9	TS EN 13674 standardına göre yorulma numuneleri çıkarılacak bölgeler	62
Şekil 7. 10	ISO 1143 standardına göre yorulma numunesi teknik resmi	62
Şekil 7. 11	Dönel eğmeli yorulma cihazı	63
Şekil 8. 1	Mantar sertleştirme işlemi yapılan raylarda 20 saniye ve 40 saniye su verme süreleri için TTT diyagramı üzerinde verilen ortalama soğuma eğrileri	66
Şekil 8. 2	EN 13674 standardına göre ray mantarında sertlik ölçümü yapılacak bölgeler	67
Şekil 8. 3	(a) 20 saniye, (b) 40 saniye hava+su karışımı ile soğutularak elde edilen ray numunesinin bölgelere göre sertlik değerleri	68
Şekil 8. 4	R260 kalite ray çeliğine ait RS bölgesinden 500X büyütmede mikroyapı resmi	68
Şekil 8. 5	Mikroyapı resmi alınan bölgelerin mantar kesitindeki yerleri	69
Şekil 8. 6	20 saniye süreyle soğutulan ray numunesinin mantar kesitinde mikroyapı dağılımı	70
Şekil 8. 7	(a) A üst, (b) A orta, (c) WEB orta bölgelerine ait 500 X büyütmede alınmış mikroyapı resimleri	70
Şekil 8. 8	20 saniye süre ile soğutulmuş ray numunesinin mantar kesitinden SEM görünüşü	71
Şekil 8. 9	40 saniye süreyle soğutulan ray numunesinin mantar kesitinde mikroyapı dağılımı	72
Şekil 8. 10	40 saniye süre ile soğutulmuş ray numunesinin mantar kesitinden SEM görünüşü	72
Şekil 8. 11	(a) 20 saniye, (b) 40 saniye süreyle mantar sertleştirme işlemi yapılmış malzemelerin çekme testi grafikleri	73
Şekil 8. 12	20 saniye süre ile soğutulmuş raylara ait Wöhler eğrisi	75
Şekil 8. 13	40 saniye süre ile soğutulmuş raylara ait Wöhler eğrisi	76
Şekil 8. 14	Isıtma işlem yapılmayan raylara ait Wöhler eğrisi	77
Şekil 8. 15	Yorulma testlerinde kullanılan raylara ait Wöhler eğrileri	78
Şekil 8. 16	1050 (a) 950 (b) MPa yüke maruz kalarak kırılan yorulma numunelerinin kırık yüzeyleri	79

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1. 1 TCDD hatlarında virajların eğrilik yarıçapları, uzunlukları ve tüm hatlar içerisindeki oranları.....	2
Çizelge 1. 2 Muhtelif Avrupa demiryolları idareleri tarafından önerilen kurp çapına göre ray kaliteleri	2
Çizelge 2. 1 Ray sınıflarının serlik değerleri ve tanımları	5
Çizelge 2. 2 Ray çeşitlerinin kimyasal kompozisyonları	6
Çizelge 3. 1 TCDD için ray çeliğinin kimyasal kompozisyonları	10
Çizelge 3. 2 Alaşım elementlerinin çeliğe etkileri	14
Çizelge 3. 3 Farklı kalite rayların kimyasal bileşimleri ve çekme mukavemetleri	18
Çizelge 3. 4 Beynitik rayların mekanik özellikleri.....	19
Çizelge 4. 1 TCDD hatlarındaki kurp dağılımı	22
Çizelge 4. 2 Perlitik ve beynitik rayların mekanik özellikleri.....	23
Çizelge 4. 3 Soğuma hızının ray çeliğinin mikroyapısına etkisi	25
Çizelge 4. 4 Farklı ray tiplerinin karşılaştırılması	27
Çizelge 5. 1 Genel olarak çeliklerde çekme mukavemeti-yorulma sınırı kıyası	40
Çizelge 5. 2 Çentik boyutu ve şeklinin yorulma dayanımına etkisi	48
Çizelge 5. 3 Eğme ve burulma zorlamaları için boyut faktörü	49
Çizelge 8. 1 Deneylerde kullanılan R260 kalite ray numunelerine ait kimyasal kompozisyon	64
Çizelge 8. 2 20 saniye su verme işlemi uygulanan ray numunelerine ait sıcaklık değişimleri.....	65
Çizelge 8. 3 40 saniye su verme işlemi uygulanan ray numunelerine ait sıcaklık değişimleri.....	65
Çizelge 8. 4 EN 13674 standardına göre farklı ray tiplerinin sağlaması gereken sertlik değerleri ve bölgeleri.....	67
Çizelge 8. 5 Ray numunelerinin çekme testi sonuçları	74
Çizelge 8. 6 20 saniye süreyle soğutulan raylara ait yorulma testi sonucunda yüklemelere göre çevrim sayıları	75
Çizelge 8. 7 40 saniye süreyle soğutulan raylara ait yorulma testi sonucunda yüklemelere göre çevrim sayıları	75
Çizelge 8. 8 Isıl işlem yapılmayan raylara ait yorulma testi sonucunda yüklemelere göre çevrim sayıları.....	76

**MANTARI SERTLEŞTİRİLMİŞ RAYLARDA YORULMA
DAVRANIŞI İNCELENMESİ**

Sait ÖZÇELİK

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ergun KELEŞOĞLU
Eş Danışman: Doç. Dr. Hayrettin AHLATÇI

Ülkemizde demiryollarındaki gelişmelerle beraber ortaya çıkan daha kaliteli malzeme ihtiyaçları ve bu malzemelerin maliyetleri ihtiyacın yerli kaynaklarla karşılanması fikrini ortaya çıkarmaktadır. Bu bağlamda mantarı sertleştirilmiş rayların da yerli kaynaklarla üretilmesi için birçok proje üzerinde çalışılmaktadır. Raylarda temas yorulması, hasara sebep olan önemli etkenlerdendir. Yorulma çatlağı gelişimi ve ilerlemesi ile malzeme mukavemeti arasında bir ters orantı olduğu bilinmektedir. Rayların kırılma nedenleri arasında en önemli etken rayın içyapısı, yüzey aşınması ve kalıcı bozulma-ezilmelerdir. Bu hasarların önüne geçmek için mantar sertleştirme prosesi uygulanmaktadır. İnce perlitli içyapı oluşturarak, geleneksel raylara göre daha sert ve daha yüksek aşınma ve yorulma dirençli ray üretiminde, hadde çıkışı hızlı soğutma uygulaması 20 yılı aşkın süredir uygulanmaktadır. Hasarlar en çok mantar üzerinde olduğundan ray mantarlarının sertleştirilmesine önem verilmiştir.

R350 HT kalite mantarı sertleştirilmiş rayların yüzeyinde R260 kalite raylara göre daha az yorulma çatlağı olduğu saptanmıştır. Bu çalışma farklı sprej sürelerinin rayların mikroyapılarına ve başta yorulma davranışı olmak üzere mekanik özelliklerine etkisini ve ısı işlemsiz raylarla mukayeselerini içermektedir.

Anahtar Kelimeler: Demiryolu, Ray, Mantar Sertleştirme, Yorulma

ABSTRACT

RESEARCH ON FATIGUE BEHAVIOUR OF HEAD HARDENED RAILS

Sait ÖZÇELİK

Department of Metallurgical and Materials Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Ergün KELEŞOĞLU

Co-Adviser: Assoc. Prof. Dr. Hayrettin AHLATÇI

In our country, new higher quality materials have needed with the developments of railway transportation. However the import cost of these materials play a major role to supply these ones in the local production. There are many studies for local production of head hardening rail. Rolling contact fatigue of rails is the biggest effect for damage. The cause of rail fractures depend on its microstructure, surface wear resistance and permanent deformation. For this reason, head hardening techniques are tested for obtain fine perlite microstructure with the high cooling rate. With the head hardening process technology can greatly improve the mechanical properties such as hardness, wear and fatigue values. After cooling, the results show that, R350 HT quality head hardened steel has lesser wear crack than R260 rail steel. In this project, we investigated the effect of different spraying parameters on microstructure and firstly fatigue behaviour and genel mechanic properties of rails.

Keywords: Railway, Rail, Head Hardening, Fatigue

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Gerek çevresel hassasiyetler gerekse karayolu taşımacılığının ekonomikliğini ve güvenilirliğini kaybetmeye başlaması ile devletler ulaşımda yeni stratejiler ortaya koymak zorunda kalmışlardır. Hava ve deniz yollarının da alternatif olamayacağı bölgelerde demir yolu kaçınılmaz bir ulaşım yöntemidir. Yüksek hızlı trenlerin hava ve kara yolu taşımacılığına göre %10 daha az CO₂ salınımı yaptığını bilinmektedir [1].

Ülkemizde de demiryollarındaki gelişmelerle beraber ortaya çıkan daha kaliteli malzeme ihtiyaçları ve bu malzemelerin maliyetleri ihtiyacın yerli kaynaklarla karşılanması fikrini ortaya çıkarmaktadır. Raylar demiryolları için hayli maliyetli ve bir o kadar da hayati öneme sahip elemanlardır. Raylar düz yollarda ve virajlı yollarda farklı yüklemelere maruz kalırlar. Özellikle eğrilik yarıçapı 2000 metreden düşük virajlarda rayların servis ömürleri %50 civarında düşmektedir.

Uluslararası demiryolları birliği (UIC)'nin raporuna göre eğrilik yarıçapı 400 metreden az olan ve yılda 20 milyondan fazla aks yüküne maruz kalan hatlarda mantarı sertleştirilmiş ray kullanımını zorunluluk düzeyinde tavsiye etmektedir. 400-700 metre aralığında ki eğrilik yarıçapına sahip hatlarda da tercihi olarak kullanımı önerilmektedir [3].

Türkiye'deki demir yolu hatlarında da eğrilik yarı çaplarına göre hatların dağılımı Çizelge 1.1'de verilmektedir. Bu bilgilere göre mantarı sertleştirilmiş rayları hatlarımızda yoğun olarak kullanmak zorundayız. Maliyeti yüksek olan bu malzeme grubunu kendi imkanlarımızla üretmek ve daha ileriye taşımak gerekmektedir.

Çizelge 1.1 TCDD hatlarında virajların eğrilik yarıçapları, uzunlukları ve tüm hatlar içerisindeki oranları [2].

Kurp Yarıçapı (m)	Adet	Uzunluk (km)	Tüm Hat Uzunluğuna Oranı (%)
200-500	6090	1574	18,1
501-1000	2963	1025	11,8
1001-1500	456	177	2,0
1501-2000	440	189	2,2
2000'den yüksek	342	117	1,3
Düz yol		5604	64,5

Hatlarda, uygun bölgelerde uygun malzemelerin seçimi son derece önemli bir konudur. Malzeme seçimi yaparken güvenlik ve ekonomiklik parametreleri temel teşkil eder. Bu konuda hassas davranılmazsa yüksek maliyetlerle ya da büyük kazalarla karşılaşılabilir. Avrupa'da farklı demiryolu idareleri tarafından önerilen viraj (kurp) çaplarına göre kullanılan ray çeşitleri Çizelge 1.2'de görülmektedir.

Çizelge 1.2 Muhtelif Avrupa demiryolları idareleri tarafından önerilen kurp çapına göre ray kaliteleri [4].

Kup Çapı	≤300	≤400	≤500	≤600	≤700	≤800	≤1500	≤3000	≤30000
DK	R350HT					R350HT			
UIC	R350HT		R350HT/R260			R260			
DB	R350HT(≥30000 t/d)						R260		
CH	R350LHT		R350LHT /R320Cr			R350LHT /R320Cr	R260		
AT	R350HT	R260							
SWE	R350HT	R260							
NOR	R350HT					R260			
UK	R260								

Raylarda, aşınma ve yorulma çatlakları en çok mantar üzerinde görüldüğünden raylarda mantar sertleştirme işlemleri uygulanmaktadır. Mantarı sertleştirilmiş raylar, özellikle raylarda kayma aşınması ve yuvarlanma temas yorulmasını önlemek için eğrilik yarıçapı düşük olan virajlarda (dar yarıçaplı kurplar) kullanılmaktadır. Perlitik mikroyapıya sahip olan R260 kalite raylardan mantar sertleştirme ısı işlemiyle R350HT kalite mantarı sertleştirilmiş ray üretimi uzun yollardır uygulanan bir yöntemdir [2], [4], [5].

1.2 Tezin Amacı

Yapılan bu çalışma kapsamında raylarda mantar sertleştirme işleminin ve bu işlem esnasında soğutma süresinin yorulma davranışına etkisi incelenmiştir. Bunun için R260 kalite raylara laboratuvar ortamında haddeleme sonrası sıcaklığa çıkarılarak östenitlenmiştir ve ardından 20 ve 40 saniye sürelerle hava+su karışımı uygulanarak mantar sertleştirme işlemi uygulanmıştır. Yapılan ısıt işlemler sonrasında EN 13674 standardına göre sertlik, mikroyapı ve çekme testleri yapılmıştır. Çekme testi verilerine göre yükler belirlenip ISO 1143 standardına göre dönel eğmeli yorulma testleri yapılmış ve işlem parametrelerinin mekanik özelliklere etkileri anlaşılmaya çalışılmıştır.

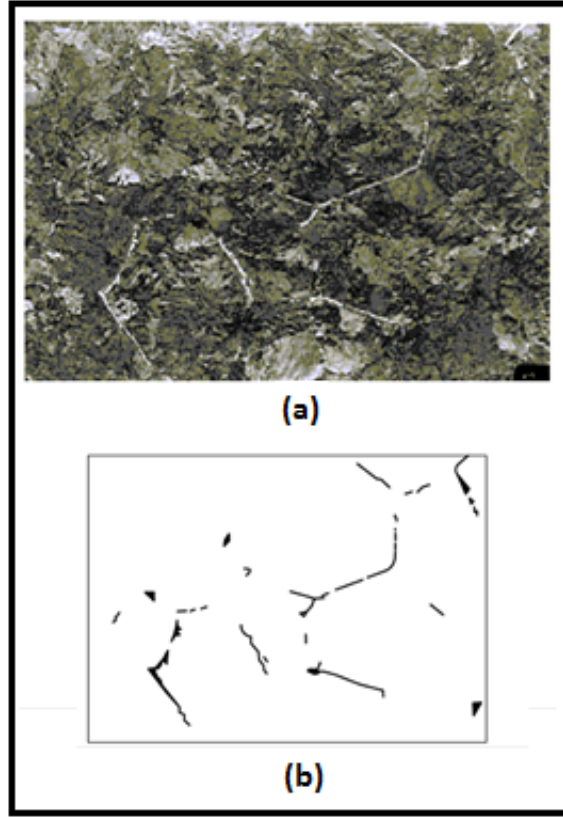
1.3 Hipotez

Tüm deneysel çalışmalar neticesinde R260 kalite raylardan elde edilen mantarı sertleştirilmiş rayların yorulma davranışlarının ne kadar iyileştiği görülmüş ve optimum soğutma süresi belirlenmiştir.

DEMİRYOLLARINDA KULLANILAN RAYLAR

Demiryolu hatlarında bulunduğu ülkenin standartlarına göre ya da hat üzerinde değişen koşullara göre farklı sınıflarda raylar kullanılmaktadır. Söz konusu seçimlerin yapılmasında korozyon, aşırı sıcak ya da soğuk gibi çevresel etmenler, hat üzerinde bulunan virajların eğrilik yarıçapı (kurp çapı), hattın eğimi ya da üzerinde çalışan trenlerin niteliği gibi demiryolu hattının doğasından kaynaklanan etmenler ve ekonomik etmenler rol sahibidir. Demiryolu hatlarında kullanılan rayların sınıfları şu şekildedir;

- R200, R220 sınıfı raylar; tane sınırlarında ferrit olan perlitik mikroyapıdaki raylardır, martenzit, beynit ya da tane sınırlarında sementite müsaade edilmez.
- R260, R260Mn sınıfı raylar; perlitik mikroyapıya sahiptirler, tane sınırlarında izin verilen ferrit miktarı Şekil 2.1’de görülmektedir, martenzit, beynit ya da tane sınırlarında sementite müsaade edilmez.
- R320Cr sınıfı raylar; tamamen perlitik mikroyapıya sahip raylardır.
- R350HT, R350LHT sınıfı raylar; perlitik mikroyapıya sahip raylardır, tane sınırlarında izin verilen ferrit miktarı Şekil 2.1’de görülmektedir, martenzit, beynit ya da tane sınırlarında sementite müsaade edilmez [8].



Şekil 2.1 R260, R260Mn, R350HT ve R350LHT sınıfı raylarda tane sınırlarında izin verilen ferrit miktarı için (a)500X büyütmede referans mikroyapı fotoğrafı ve (b) diyagramı [8].

Rayların sınıflarına göre kimyasal kompozisyonları mantar üstü sertlikleri, mantar kesitindeki sertlik aralıkları ve haliyle diğer tüm mekanik özellikleri değişiklik göstermektedir. Çizelge 2.1’de de rayların kodlarına göre sağlamaları gereken sertlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.1 Ray sınıflarının sertlik değerleri ve tanımları [8].

Ray Sınıfı	Sertlik Değeri (HB)	Rayın Tanımı
R200	200-240	C-Mn/Isıl işlemsiz
R220	220-260	C-Mn/Isıl işlemsiz
R260	260-300	C-Mn/Isıl işlemsiz
R260Mn	260-300	C-Mn/Isıl işlemsiz
R320Cr	320-360	Alaşımlı (%1 Cr)/ Isıl işlemsiz
R350HT	359-390	C-Mn/Isıl işlemli
R350LHT	350-390	Düşük alaşımlı/ Isıl işlemli

R350HT ve R350LHT dışındaki rayların sadece mantar üstü sertlik değerlerini yakalamaları yeterlidir. Çünkü R350HT ve R350LHT kalite raylar ısıtılarak elde edilen raylardır. Bu rayların kesitinde yapılan ısıtılma göre değişiklikler görülebilir. Bu sebeple detaylı incelemek gerekir. Bu iki grup haricindeki raylar haddelendikten sonra herhangi bir işleme tabi tutulmazlar. Bu sebeple mantar üstü sertlik değeri yeterli sonuç vermektedir [8].

Rayların sertlik değişimleri doğal olarak çekme mukavemetlerini de etkilemektedir. Bu değişimlerin bazıları kimyasal kompozisyonla bazıları da gördüğü ısıtılmalardan kaynaklanır. Çizelge 2.2’de ray tiplerinin kimyasal kompozisyonları ve çekme mukavemetleri verilmiştir.

Çizelge 2.2 Ray çeşitlerinin kimyasal kompozisyonları [8].

Ray Sınıfı	%							Ppm		R _m (MPa)
	C	Si	Mn	P (max)	Cr	Al Max.	V Max.	O	H	
R200	0,38-0,62	0,13-0,60	0,65-1,25	0,040	0,15 max.	0,004	0,030	20	3,0	680
R220	0,50-0,60	0,20-0,60	1,0-1,25	0,025	0,15 max.	0,004	0,030	20	3,0	770
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
R260Mn	0,53-0,77	0,13-0,62	1,25-1,75	0,030	0,15	0,004	0,030	20	2,5	880
R320Cr	0,58-0,82	0,48-1,12	0,75-1,25	0,025	0,75-1,25	0,004	0,20	20	2,5	1080
R350HT	0,70-0,80	0,13-0,60	0,65-1,25	0,025	0,15 max.	0,004	0,030	20	2,5	1175
R350LHT	0,70-0,82	0,13-0,60	0,65-1,25	0,025	0,30 max.	0,004	0,030	20	2,5	1175

DEMİR YOLU RAYLARI ÜRETİMİ

II. Dünya Savaşı'na değin ray çeliği üretiminde bazik Bessemer, asidik Bessemer, elektrik fırını ve Siemens-Martin fırınları kullanılmaktaydı. 1950-1960 yılları arasında oksijen üflemeli üretim kullanılmaya başlandı. 1967 yılında ise OBM metodu kullanılmaya başlandı. Bu metod sıcak metal banyosuna oksijen üflenerek uygulanan bir çalışma şeklidir. OBM metodunda da, LD ve LDAC gibi saf oksijen kullanılır. Bu uygulamada oksijenin verildiği nozullarda alev oluşuyorsa soğutma çok önemlidir [9].

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

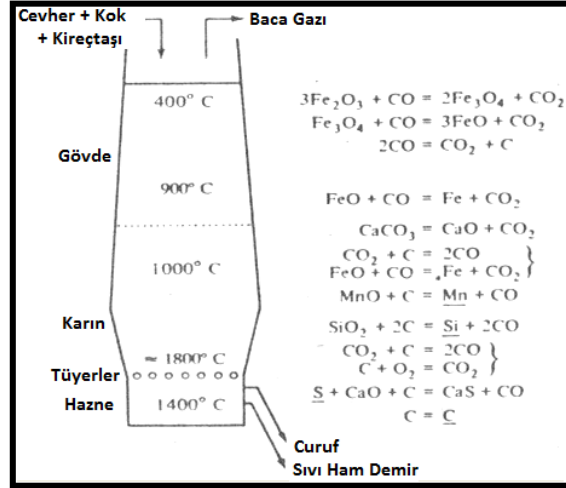
- Yüksek Fırın Prosesi
- Çelikhane Prosesleri
- Haddehane Prosesleri

3.1 Yüksek Fırın Prosesi

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 yakıttır. Demir cevheri, sinter ya da pelet olarak yüksek fırına şarj edilen demirce zengin hammaddedir. Curuf yapıcı olarak genelde kireç taşı kullanılır. Şarj içerisindeki kirletici maddeleri curuf fazından toplaması için fırın içerisine şarj edilir [10].

Sekil 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 [11].



Şekil 3.1 Yüksek fırın tepkimeleri [11].

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, hammaddeler yüklenir ve hazne kısmında biriken sıvı ham demir ve curuf alınır [10].

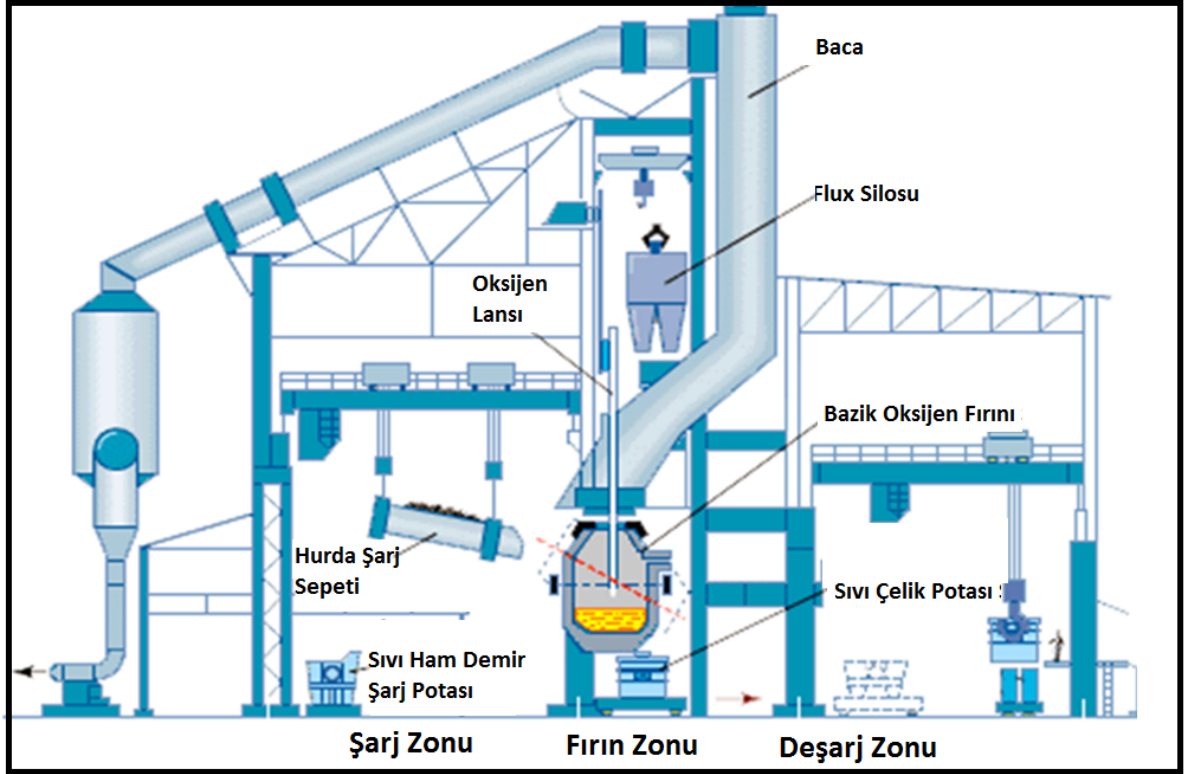
3.2 Çelikhane Prosesleri

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.

3.2.1 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 [10].



Şekil 3.2 Bazık Oksijen Fırını ve Ekipmanları [10].

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 [10].

3.2.2 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 [10].

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. TCDD'nin ray satın alma şartnamesine göre rayların kimyasal kompozisyonları [10].

Çizelge 3.1 TCDD için ray çeliğinin kimyasal kompozisyonları [12].

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
R350HT	0,70-0,82	0,13-0,60	0,65-1,25	0,025	0,008-0,030

3.2.2.1 Yapıdaki Elementlerinin Ray Çeliğine Etkileri

3.2.2.1.1 Karbon (C)

Karbon çeliklerin temel alaşım elementidir ve üretim esnasında çelik içinde yerini alır. Karbon miktarı mekanik özellikler üzerinde en çok etkisi olan faktördür. Karbon miktarı arttıkça akma çekme mukavemetleri, aşınma direnci artarken yüzde uzama ve şekillendirilebilirlik kabiliyeti azalır [14]. Ayrıca östenite dönüşme sıcaklığını 910⁰C'den 723⁰C'ye çeker ve elektrik direncini yükseltir [13].

3.2.2.1.2 Mangan (Mn)

Mangan, karbon gibi dayanımı artırıcı etki gösterirken sertleşebilme ve kaynak kabiliyetini artırıcı etkileri de vardır. Östenit kararlaştırıcı bir elementtir. Manganın en önemli özelliği ise kükürdü MnS olarak bağlamasıdır [13].

Bu sayede sıcak kırılganlığa sebep olan FeS bileşiğinin oluşumu önlenmiş olur. Oksijen alıcı özelliği de vardır. Tren raylarında %0,65-1,25 oranında Mn bulunur [14].

3.2.2.1.3 Silisyum (Si)

Akma çekme mukavemetini ve elastikiyetini artırıcı etkisi vardır. Bununla beraber tufal oluşumunu azaltıcı etkisi de vardır. Genellikle elastikiyeti yüksek olması istenen yay çeliklerinde kullanılır. Elektriksel akım kaybını da önleyicidir. Silisyum deoksidan olarak kullanılan bir elementtir. Tren rayı üretim metodu ve kullanılan ülkelere göre % 0,15-0,6 aralığında değişebilir [14].

3.2.2.1.4 Fosfor (P)

Çelikte akma ve çekme özelliklerini artırır fakat yüzde uzama ve eğilme özelliklerini kötü etkiler. Soğuk kırılganlığa sebep olur. Talaşlı şekillendirme kabiliyetini artırır. Fosfor ray çeliği içerisinde istenmeyen bir elementtir, üretim kademelerinden gelmektedir ve olabildiğince arındırılması gerekir. Tren rayı ve tekerlekleri içi müsaade edilen maksimum değerler % 0,025 ve % 0,035'dir [14].

3.2.2.1.5 Kükürt (S)

Kükürt, demir ile birleşerek FeS bileşiğini oluşturmaktadır. Düşük ergime sıcaklığına sahip olan bu faz haddeleme sıcaklığında eriyerek sıcak kırılganlığa sebep olur. Çeliğin işlenebilme özelliğinin artırılması söz konusu değilse, fosfor gibi, istenmeyen bir elementtir. %0,06'ya kadar bulunabilir [15].

3.2.2.1.6 Krom (Cr)

Çeliğin mukavemetini artırırken esnekliğini azaltan bir alaşım elementidir. Sıcaklığa karşı dayanım sağlar ve tufal oluşumun önler. Krom, çabuk bozolmayan karbürü meydana getirir.

Çelik içerisinde %12'den fazla bulunması halinde paslanmaz çelik haline gelir. Çelikte her %1 Cr artışı, çekme dayanımında yaklaşık 8-10 kg/mm²'lik bir artış sağlar [16].

3.2.2.1.7 Nikel (Ni)

Darbe tokluğunu artırıcı bir etkisi vardır. Çeliğin dayanımını mangan ve silisyuma göre daha az artırır. Özellikle krom ile birlikte bulunduğu zaman sertliğin derinlere iletilmesini sağlar ve östenit bölgesini genişletir [14].

3.2.2.1.8 Molibden (Mo)

Molibden, çelikte her zaman krom ve nikel ile birlikte bulunur, akma ve çekme mukavemetini artırıcı etkisi vardır. Gevrekliği ortadan kaldırması sebebiyle darbeli çalışma şartlarından tercih edilir. Bunlarla birlikte sürünme ve aşınma direncini artırır [17].

3.2.2.1.9 Vanadyum (V)

Tane küçültücü etkisiyle akma ve çekme mukavemetlerini oldukça artırır. Bununla birlikte sertleştirme, menevişleme gibi işlemlere de olumlu etkileri vardır. Vanadyum, tane küçültücü ve karbür yapıcı etkisiyle, mikro alaşımlı çeliklerde niyobyum ve titanyum ile birlikte kullanılan bir mikro alaşım elementidir. Çeliğin sıcaklığa karşı dayanımını artırır [16].

3.2.2.1.10 Niyobyum (Nb)

Tane küçültücü etkisi yüksek bir mikro alaşım elementidir. Östenit sahasını küçültücü etkisi vardır [18].

3.2.2.1.11 Bakır (Cu)

Akma ve çekme mukavemetini artırırken yüzde uzama ve şekillendirilebilirliği olumsuz etkiler. Korozyon direnci artırıcı etkisi vardır. Ray çeliklerinde % 0,15 civarında bulunur [13].

3.2.2.1.12 Alüminyum (Al)

Çelik üzerinde silisyuma benzer etkileri vardır. Deoksidan olarak kullanımı yaygındır. Çeliğin tanelerinde irileşmeye sebep olur. Yüksek sıcaklıkta oksitlenmeyi engeller. % 5 oranında alüminyum çeliklerde gaz giderici etkiye sahiptir [13].

3.2.2.1.13 Oksijen (O)

Oksijen, her ne kadar çelik için Zararlı olarak bilinse de üretim esnasından kullanılmaktadır. Çekme mukavemetine bir etkisi yoktur ancak sertliği bir miktar artırır ve darbe direncini azaltır. Oksijen içeren düşük karbonlu çelikler yaşlanma sertleşmesine duyarlıdır. Ray çelikleri için müsaade edilen en yüksek değer ise 20 ppm mertebesidir [20].

3.2.2.1.14 Azot (N)

Çelik içerisinde nitrit (Fe_4N) olarak bulunan azot, çeliği yaşlanma sertleşmesine hassas hale getirir. Aynı kalitedeki çeliklerde azot miktarının fazla oluşu aşınma direncinde artışa sebep olmaktadır. Fakat kırılabilirliği artırdığı ve eğme mukavemetini düşürdüğü için istenmeyen bir elementtir. Atom çapının küçük olması sebebiyle de yapıdan uzaklaştırmak hayli zordur. Sadece kübik yüzey merkezli yapıda yüksek çözünürlüğe sahiptir, dolayısıyla östenit sahasını genişletici etkisi vardır [18]. % 0,007-0,009 oranındaki azot miktarı rayın soğuğa karşı mukavemetini artırır. Kuznetsky çelik fabrikasında yapılan bir denemede, çelik içerisindeki azot miktarının % 0,003'ten % 0,008'e çıkarılması -60°C 'deki darbe dayanımını 2,5 kat artırmıştır [19]. Ray içerisinde müsaade edilen üst limiti ise 1,6 ppm mertebesidir [18], [19].

3.2.2.1.15 Hidrojen (H)

Çelik içerisine ergitme ve tasfiye işlemleri esnasında karışan hidrojen, yapıda istenmeyen genellikle olumsuz etkileri olan bir elementtir. Oda sıcaklığından çelik içerisinde çözünmez ve soğuma esnasında yapıdan uzaklaşacak kadar süre tanınırsa zararı yoktur. Fakat soğuma hızlı olursa, kalın kesitli, yüksek karbonlu ve alaşımlı çeliklerde hidrojen gevrekliği ya da parçalanma çatlağı gibi iç çatlaklara sebep olur. Malzemenin elastikiyetini azaltır, azottan daha tehlikeli bir elementtir. Yapıdaki hidrojen miktarı 2,5 ppm olarak sınırlandırılmıştır [18], [21].

Çizelge 3.2 Alaşım elementlerinin çeliğe etkileri [20].

ALAŞIM ELEMENTLERİ	SERTLİK	MUKAVEMET	AKMA NOKTASI	UZAMA	KESİT BÜZÜLMESİ	DARBE DİRENCİ	ELASTİSİTE	YÜKSEK SICAKLIĞA DAYANIM	SOĞUMA HIZI	KARBÜR OLUŞUMU	AŞINMA DİRENCİ	DÖVÜLEBİLİRLİK	İŞLENEBİLİRLİK	OKSİTLENME EĞİLİMİ	KOROZYON DİRENCİ
Si	↑	↑	↑↑	↓	✱	↓	↑↑↑	↑	↓	↓	↓↓↓	↓	↓	↓	□
Mn*	↑	↑	↑	✱	✱	✱	↑	✱	↓	✱	↓↓	↑	↓	✱	□
Mn**	↓↓↓	↑	↓	↑↑↑	✱	□	□	□	↓↓	□	□	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	□
Cr	↑↑	↑↑	↑↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓↓↓	↑↑	↑	↓	□	↓↓↓	↑↑↑
Ni*	↑	↑	↑	✱	✱	✱	□	↑	↓↓	□	↓↓	↓	↓	↓	□
Ni**	↓↓	↑	↓	↑↑↑	↑↑	↑↑	□	↑↑↑	↓↓	□	□	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↑↑
Al	□	□	□	□	↓	↓	□	□	□	□	□	↓↓	□	↓↓	□
W	↑	↑	↑	↓	↓	✱	□	↑↑↑	↓↓	↑↑	↑↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	□
V	↑	↑	↑		✱	↑	↑	↑↑	↓↓	↑↑↑	↑↑	↑	□	↓	↑
Co	↑	↑	↑	↓	↓	↓	□	↑↑	↑↑	□	↑↑↑	↓	✱	↓	□
Mo	↑	↑	↑	↓	↓	↑	□	↑↑	↓↓	↑↑↑	↑↑	↓	↓	↑↑	□
S	□	□	□	↓	↓	↓	□	□	□	□	□	↓↓↓	↑↑↑	□	↓
P	↑	↑	↑	↓	↓	↓↓↓	□	□	□	□	□	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↑↑

* : Perlitik Çeliklerde

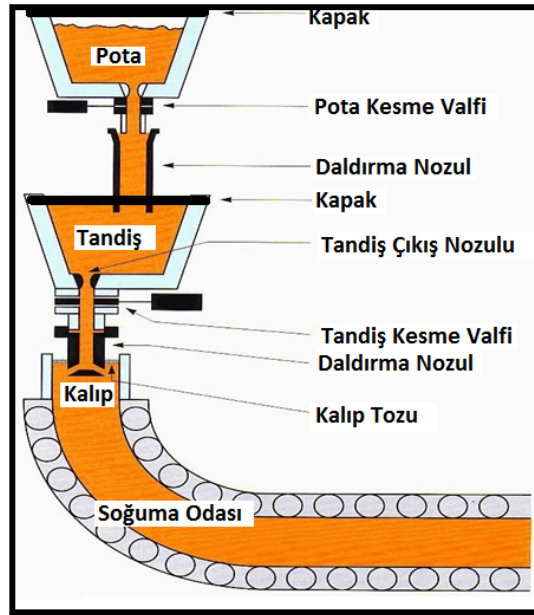
** : Östenitik Çeliklerde

3.2.3 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 [10].

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 katılaşa için elektromagnetik soğutma sistemi kullanılmaktadır [10].



Şekil 3.3 Sürekli döküm şeması [11].

3.3 Haddehane Prosesleri

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

3.3.1 Ray Çeliğinin Tavlanması

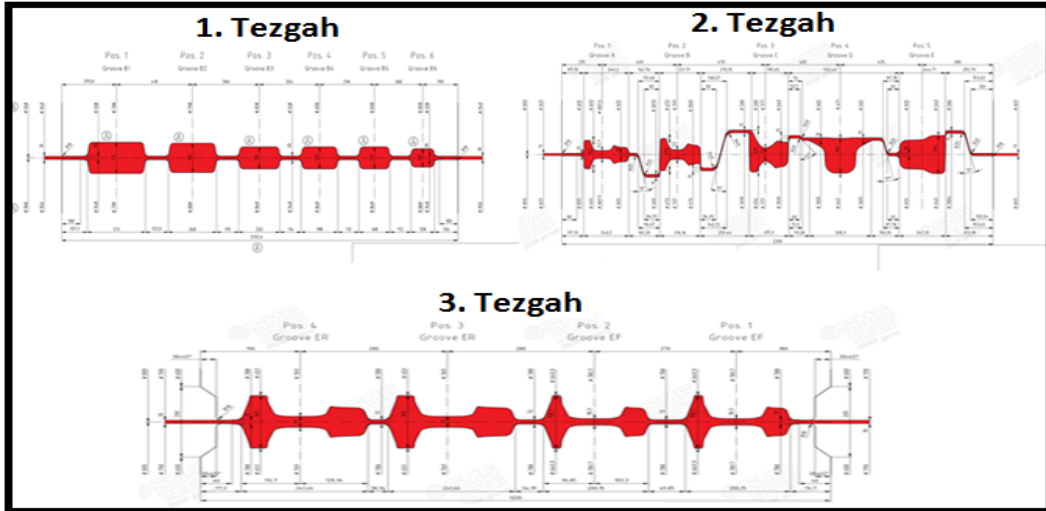
Çelikhaneden uygun kimyasal bileşimde yarı mamul olarak alınan, 260 x 360 mm kesitli, blumlar tav fırınlarında tamamı östenit bölgesine ulaşınca kadar ısıtılırlar. Blumlar tav fırınına soğuk olarak şarj edilirler ve fırın içersinde ilerledikçe 1250⁰C sıcaklığa kadar ulaşırlar [22].

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, dekarbürizasyon, aşırı ısınma ve yanma gibi muhtemel hatalardan sakınmış oluruz [23].

Çelik fırın içersinde 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 kırılgan olmasına sebep olur [23].

3.3.2 Ray Çeliğinin Haddelenmesi

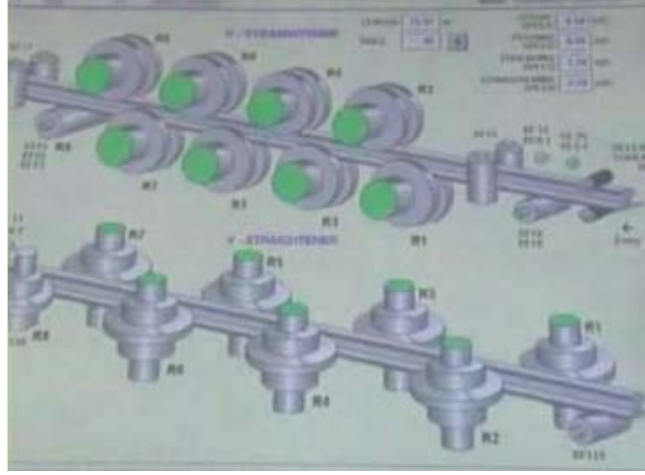
Tamamen östenitlenen yarı mamül ray çelikleri nihai şekillendirme için üç ayrı istasyonda haddelenirler. Fırından çıkan malzeme Şekil 3.4’de görüldüğü gibi, toplam 10 pasoda nihai şeklini alır. Östenitlenen blumlar hadde tezgahlarına girmeden önce yüksek basınçlı su ile temizlenir ve yüzeylerindeki tufal tabakası alınır, aksi halde yüzeydeki tufal, haddeleme sonrası, malzemede iz bırakır. Şekillendirilen malzeme soğuma ızgarasına alınır. Soğuma esnasında raylar kesit farklılıklarından dolayı çarpılmaktadır.



Şekil 3.4 Ray haddehanesi merdane pasoları [13].

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 3.5'deki gibi, formlarına uygun metal tekerleklerden geçirilerek çarpıklıkları giderilir [22].



Şekil 3.5 Ray doğrultma ünitesi [22].

3.4 Özelliklerine Göre Ray Sınıfları

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.

3.4.1 Doğal Olarak Sert Raylar

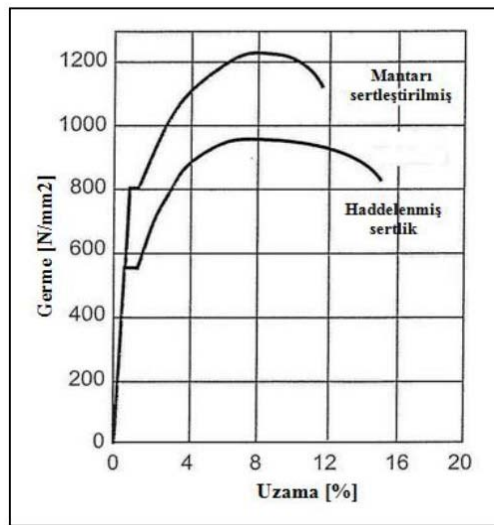
Raylar genellikle doğal sertliklerinde teslim edilir. Haddeme işlemini takiben soğutma ve doğrultma işlemleri esnasında elde ettiği mekanik değerler bu ürünün nihai özellikleridir. Bunlar kristalleşme durumuna göre adlandırılan perlitik raylardır. Örneğin R260 kalite raylar, düz yolda her 100 m'de yaklaşık 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 3.3'de incelenebilir [21].

Çizelge 3.3 Farklı kalite rayların kimyasal bileşimleri ve çekme mukavemetleri [20].

Kalite	Freze Son Katı	Gösterim	Kimyasal Bileşim (%)					R_m (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

3.4.2 Termal Olarak İşlem Gören Raylar

Doğal sertlikte üretilen perlitik rayların mekanik özelliklerinin yetersiz kaldığı yerlerde çeşitli ısı işlemler uygulanarak iyileştirmeler yapılmaktadır. Bu işlemlerin en başında mantar sertleştirme işlemi gelmektedir. Rayların tren tekerleği temas noktası olan mantar en çok zorlamaya maruz kalmaktadır. Dolayısıyla daha çabuk hasar görebilmektedir. Bunu önlemek için bu bölgedeki perlit yapısı daha sıkı bir hale getirilir ve aşınmaya yorulmaya karşı mukavim hale getirilir [20].



Şekil 3.6 Doğal sertlikteki ve ısı işlemleriyle sertleştirilmiş rayların çekme diyagramları [13].

Şekil 3.6’da da görüleceği gibi, östenit haldeki rayın soğuma şartlarında çeşitli ayarlamalar yapılarak mikroyapısında dolayısıyla mekanik özelliklerinde değişiklikler yapılabilmektedir. Yapılan ısıtma işlemi neticesinde aynı kimyasal bileşime sahip olan raylar farklı mekanik özelliklere sahip olmaktadır. Rayların mantar sertleştirme prosesi ve sonucunda kazanılan özellikler ayrı bir bölüm olarak ele alınacaktır.

3.4.3 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 [21], [24]. mobil parlak uçlu kaynak makinesi bu malzeme grubu için uygun soğuma şartlarını sağlayarak bu eksikliği tolere edebilir [13].

3.4.4 Beynitik Raylar

Beynit; karpit, martensit ya da ikinci aşama olarak tortu östenit içeren, güçlü bir şekilde gerdirilmiş firtten 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 3.4’de gösterilmiştir [24].

Çizelge 3.4 Beynitik rayların mekanik özellikleri [13].

Mikroyapı	R _m (MPa)	% A	K _{ic} (MPa m ^{1/2})	U çentikli Charpy (J, 20 ⁰ C)	Yorulma Dayancı (MPa)	Aşınma (gr/saat)
Beynitik	1400	13,5	98	39	870	0,77

3.4.5 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 [20].

MANTAR SERTLEŞTİRME PROSESİ

4.1 Mantar Sertleştirme Prosesinin Gerekliliği

Demir yolu taşımacılığında yaklaşık son 10 yıldır mantarı sertleştirilmiş raylar önemli yer tutmaktadır. Bunun nedeni, yaygın olarak kullanılan ve R260 olarak bilinen perlitik rayların aşınma ve yorulma gibi zorlamalara karşı yeterince dayanıklı olmamasıdır. R260 kalite raylar mantar üstünde yaklaşık 260 HB sertlik değerine sahiptir ve mikroyapısı da kaba perlitik yapıdır. Bu değerler, rayların hızlı tren uygulamalarında ve dar yarıçaplı kurplarda (dönemeçlerde) daha çabuk hasar görmesine neden olmaktadır . Bu problem ilk olarak 1960'lı yıllarda fark edilmiş ve konu üzerine çeşitli araştırmalar başlamıştır. Ray çeliklerinin iç yapısında yönlenmiş ve kaba taneli perlitik yapı yerine sıkı dizili perlitik iç yapı önerilmiştir. Günümüzde bu tip durumlarda R350 HT olarak adlandırılan, R260 kalite raylara ısıtıl işlem yapılarak elde edilen raylar kullanılmaktadır. Bu raylar da perlitik raylardır fakat perlit lamelleri arasındaki mesafe daraldığı ve daha sıkı olduğu için yaklaşık 350 HB mantar üstü sertliğe sahiptir [1].

Demiryollarında yarıçapı 2000 m'den az olan kurplar, dar yarıçaplı kurp olarak adlandırılır. Çizelge 4.1' de de görüleceği gibi ülkemizdeki demir yolu ağının %34,2'si dar yarıçaplı kurplardan oluşmaktadır. Bu kurplarda aşırı sürtünme etkisiyle iç taraftaki raylar daha kısa sürede aşınmakta ve kullanım ömürleri düşmektedir [4].

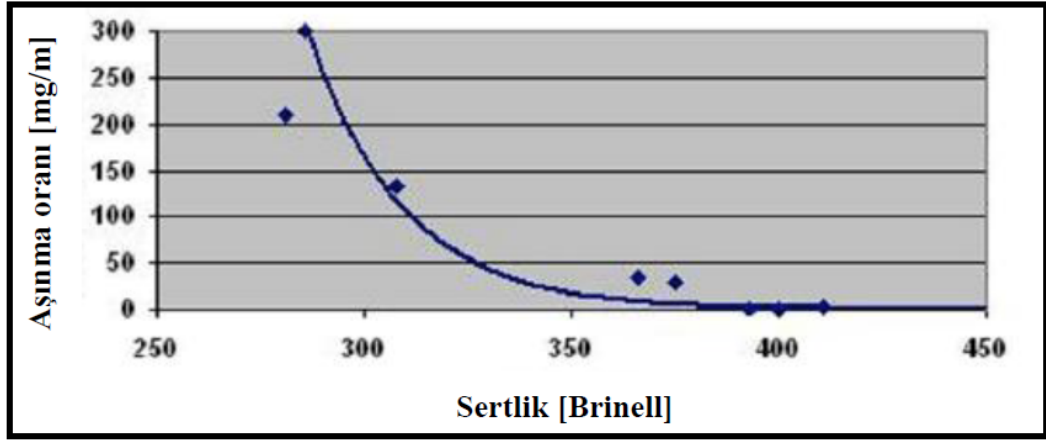
Çizelge 4.1 TCDD hatlarındaki kurp dağılımı [4].

Kurp Yarıçapı (m)	Adet	Uzunluk (km)	Tüm Hat Uzunluğuna Oranı (%)
200-500	6090	1574	18,1
501-1000	2963	1025	11,8
1001-1500	456	177	2,0
1501-2000	440	189	2,2
2000'den yüksek	342	117	1,3
Düz yol		5604	64,5
Toplam	10291	8686	100

R260 ve R350 HT kalite rayların farklı koşullardaki davranışları araştırmacılar tarafından incelenmiş ve R350 HT'nin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Örneğin; 400 metre yarıçaplı bir kurpta üzerlerinden 100 milyon yük geçirilen R260 ve R350 HT kalite rayların davranışları incelenmiştir. Bu deneyler sonucunda R350 HT kalite raylar 2,5 mm civarında aşınırken R260 kalite rayların 15 hatta 30 mm'ye kadar aşındığı görülmüştür. 1200 metre yarıçaplı kurptaki aşınma davranışlarının ise birbirine yakın olduğu saptanmıştır. Bu verilere bakılarak bile bu kurplarda R350 HT kalite rayların düşük yarıçaplı kurplarda kullanımının daha güvenilir ve karlı olacağı söylenebilir [1].

Uluslararası Demiryolları Birliği (UIC)'nin Mart 2005 tarihli talimatına göre, yarıçapı 400 metreden az olan kurplar için mantarı sertleştirilmiş ray kulamı zorunluluk düzeyindedir. 400-700 metre yarıçap aralığındaki kurplarda ise tercihi olarak kullanılması önerilmektedir [1].

Rayların kayma aşınması ve temas yorulması direnci artırmak için perlitik raylara mantar sertleştirme işlemi yanında beynitik ray üretimi de yapılmaktadır [25]. İnce perlitli yapı oluşturarak rayların mukavemetini artırmak 20 yılı aşkındır uygulanan bir yöntemdir [5]. Bununla birlikte alaşımlama yöntemiyle de benzer sonuçlar alınmaya çalışılmıştır [13]. Beynitik raylar üzerine en kapsamlı araştırmalar Bhadesia tarafından yapılmıştır [6], [7], [26], [27], [29].



Şekil 4.1 Sertlik değeri ve aşınma davranışı ilişkisi[30].

Şekil 4.1’de görüleceği gibi sertlik değerlerindeki artış aşınma mukavemetine bariz olarak yansımıştır. Özellikle 270-350 HB aralığındaki sertlik artışı aşınma miktarını yaklaşık 3 kat azaltmıştır.

İçyapının rayların mukavemet değerleri üzerine etkisi irdelenmesi gereken önemli bir konudur. Rayların hasar görmesindeki en önemli etmen rayın içyapısıdır. Çizelge 4.2’de perlitik ve beynitik rayların mekanik özellikleri mukayese edilmiştir

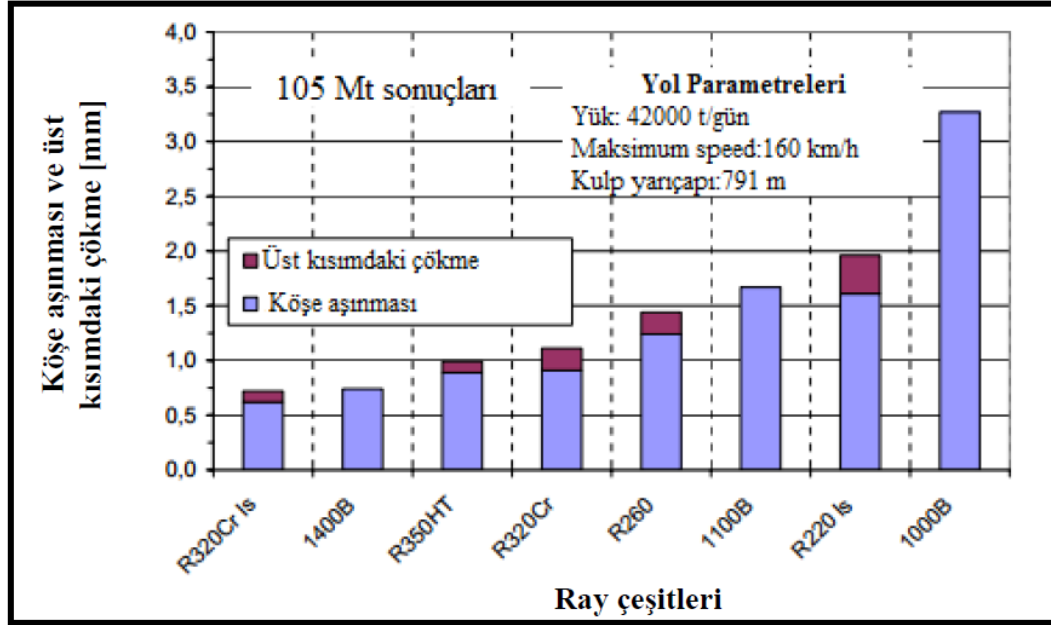
Çizelge 4.2 Perlitik ve beynitik rayların mekanik özellikleri [20].

Rayın İçyapısı	R _m (MPa)	A (%)	K _{ic} (Mpa m ^{1/2})	U Çentikli Charpy (J, 20 ⁰ C)	Yorulma Dayancı (MPa)	Aşınma (gr/saat)
Perlitik	1300	13,5	43	20	750	0,76
Beynitik	1400	13,5	98	39	870	0,77

Görüldüğü gibi iki farklı yapı arasında, aşınma özellikleri bakımından, neredeyse fark yok. Tokluk ve yorulma direnci noktasında beynitik rayların daha mukavim olduğu görülmektedir. Ancak, beynitik yapıyı elde etmek çok daha masraflıdır [13].

Rayların servis ömürlerini belirleyen en önemli parametrelerden birisi köşe aşınmalarıdır. Ancak rayın üst bölgelerindeki aşınmalar da önemsiz değildir. Bu kısımlarda da uygulanan yüke göre çökmeler meydana gelmektedir. Şekil 4.2’de görüleceği gibi farklı kalitedeki rayların 42000 ton/gün (toplam 105 000 000 ton) yük altında 791 metre yarıçaplı kurptaki köşe aşınmaları ve üst bölgelerdeki çökme miktarları gösterilmiştir. R260 kalite rayın köşe aşınma miktarı 1,5 mm’ye ve üst bölgelerdeki çökme miktarı 0,3 mm’ye yaklaşmıştır.

R350 HT kalite rayın ise köşe aşınma miktarları 1 mm'ye ve üst bölgelerdeki aşınma miktarı 0,1 mm'ye yaklaşmıştır [33].



Şekil 4.2 Farklı kalitedeki rayların aşınma davranışları [13].

TCDD özellikle hızlı tren uygulamalarında, ivmelenme bölgelerinde, makas civarlarında ve dar yarıçaplı kurplarda mantarı sertleştirilmiş raylara ihtiyaç duymaktadır. Kullanımı zorunluluk haline gelen bu malzeme halen yurtdışından yüksek fiyatlarla ithal edilmektedir. Bu ihtiyacın yerli imkanlarla giderilmesi, teknolojisinin geliştirilmesi gerek ülkemiz ekonomisi gerekse TCDD'nin prestiji için son derece önemlidir [1].

4.2 Rayların Isıl İşlemi

Raylara uygulanan ısı işlemlerin en temel amacı, yüzey sertliğini iyileştirmektir. Bu sayede rayların aşınmaya ve temas yorulmasına karşı direnci artırılmış olur. Ray mantarını sertleştirmek için en çok kullanılan metot östenit haldeki rayın ince perlit oluşturacak şekilde soğutulmasıdır. Yüzeyde çok sık kullanılmayan metotlar ise lazerle sertleştirme, plazma kaplama, lazer kaplamadır [13].

Lazer sertleştirme; yüksek performanslı lazer yardımıyla rayın yüzeyi sıvılaştırılarak yapılır. Ardından yüzey hemen katılaşır ve sert bir tabaka oluşur. Bu işlem tekerlek ve ray arasındaki sürtünmeyi %40 azaltır. Plazma kaplama için rayı koruyucu tabakayla kaplayan tozla birlikte iyonize gaz doldurulur. Bu kaplama da düşük yağlama sıklığı

sağlayarak sürtünme katsayısını düşürür. Bu konuda İsveç'te DurocRail tarafından "InfraStar" adlı bir yöntem geliştirilmiştir. Sert bir tabaka yüksek performanslı bir lazer kullanılarak, alaşım içerikleri ve seramik katkıları eklenerek raya uygulanır [13].

"Duroc 222" adlı 24 mm geniş tabaka uygulandığında saha testlerine tabi tutulan ürünlerde çatlama karşı yüksek direnç, düşük sürtünme katsayısı ve mükemmel bir aşınma direnci gözlenmiştir. Test edilen ürünlerde 7 milyon ton çalışma yükünden sonra tabaka sertliği 390 HV'den 540 HV'ye çıkmıştır. Yaklaşık 18 milyon ton yol yükünden sonra bile ray yüzeyinde bir çatlama görülmemiştir [13].

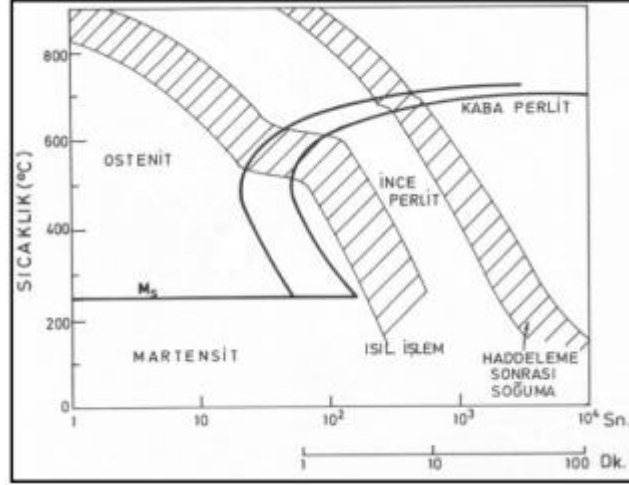
4.2.1 Raylarda Su Verme İşlemi ve Sonuçları

Çeliğin termik mekanik işleminde su verme işleminin çok önemli rolü vardır. Bunu daha iyi anlamak ray çeliği olarak kullanılan bileşimi ele alalım. Bahsettiğimiz malzeme % 0,77 C, & 0,95 Mn, % 0,1 Cr içeren bir çelik türüdür. Bu çelik için, istenilen mikroyapı ve gerekli soğuma hızları Çizelge 4.3'de verilmiştir [34].

Çizelge 4.3 Soğuma hızının ray çeliğinin mikroyapısına etkisi [35].

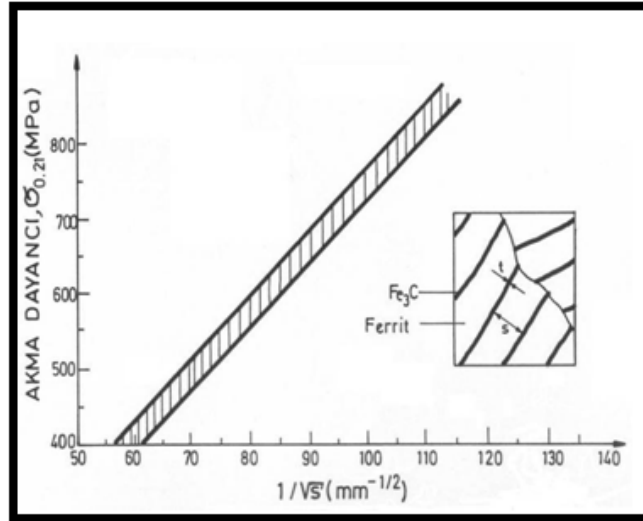
Soğuma Hızı	Faz
<240 °C/dk	Perlit
250 °C/dk	Perlit+Beynit
400 °C/dk	Perlit+Beynit+Martenzit
>643 °C/dk	Martenzit
Kesintili soğutma	İnce Perlit

Çizelgedeki değerlerin nasıl yakalanacağı konusunda bir örnek de Şekil 4.3'deki % 0,75 C + % 1 Mn içerikli ray çeliğinin sürekli soğuma dönüşüm diyagramında mevcuttur. Mantar sertleştirme işleminde hedeflenen sıkı dizilmiş ince perlit yapısını oluşturmak için soğuma hızını yükseltmek gerekmektedir [13].



Şekil 4.3 % 0,75 C + % 1 Mn içeren ray çeliğinin sürekli soğuma dönüşüm diyagramı [35].

Şekil 4.4'e bakıldığında ise % 0,8 C + % 0,75 Mn içeren ray çeliğine % 0,74 Cr + % 0,18 Mo ilavesiyle eş ısı dönüşüm eğrilerinin konumunun nasıl değiştiği görülebilir. Buradan hareketle alaşımlı ray çeliklerinin havada soğutma gibi yavaş soğuma koşullarında bile ince perlitli mikroyapıya ulaşabileceklerini söyleyebiliriz. Şekil 4.5'de görüldü gibi Belirli bir % C oranındaki perlitik yapıda lameller arası mesafenin azalması sertliği artırmakla beraber çeliğin akma mukavemetini de artırır [13].

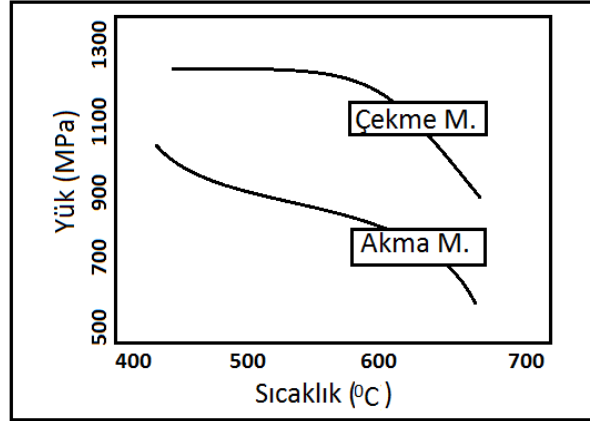


Şekil 4.4 Perlitik yapıda lameller arası mesafe – akma mukavemeti ilişkisi [13].

Östenit yapısından perlitik yapıya dönüşüm süreci difüzyon tarafından kontrol edilmektedir. Bu esnada hızı, karbonun östenit içerisindeki difüzyonu kontrol eder. Malzemenin mekanik özelliklerinin büyük bir kısmı perlit oluşumuna bağlıdır. İnce ve

% 100 perlitik bir yapı, düşük lameller arası mesafeye sahiptir. Bu sayede de akma, çekme, aşınma ve yorulma mukavemetlerinde kayda değer iyileşmeler görülür. [13].

Lameller arası mesafe, ötektoid dönüşüm sıcaklığı altındaki alt soğuma ile ters orantılıdır. Dönüşüm sıcaklığı ne kadar düşük ise lameller arası mesafe o denli incedir. Dönüşüm sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi Şekil 4.5’de görülebilir [36].



Şekil 4.5 Dönüşüm sıcaklığı-mekanik özellik ilişkisi [36].

Farklı kalitedeki rayların mikroyapıları ve çekme mukavemetleri Çizelge 4.4’de verilmiştir. Buradan hareketle perlitik yapının oranı arttıkça ve yapı inceldikçe rayların çekme mukavemetlerinin arttığı söylenebilir [37].

Çizelge 4.4 Farklı ray tiplerinin karşılaştırılması [20].

Ray Tipi	%C	%Mn	%Cr	Çekme Mukavemeti	Mikroyapı
Vinç Rayı	0,35	0,80	-	600	% 50 Perlit + % 50 Kaba Perlit
700 Kalite		1,0	-	700	% 30 Ferrit + % 70 Kaba Perlit
900 Kalite	0,5	-	-	900	% 100 Kaba Perlit
1100 Kalite	0,75	1,1	0,9	1100	% 100 Sıkı Dizili Perlit
Mantarı Sertleştirilmiş 1100 Kalite	0,75	1,0	-	1100	% 100 Sıkı Dizili Perlit

4.2.2 Raylar İçin Su Verme Sistemleri

Tren raylarında su verme işleminden kasıt, rayın mantar kısmında ince perlitik ya da istenirse beynitik bir yapı oluşturmaktır. Bu da rayların östenitik dönüşüm sıcaklığı altında kontrollü olarak soğutulması ile gerçekleşebilir. Bu soğutma sistemlerine işlemin şekline ve yapıldığı zamana göre farklı isimler verilmektedir [38].

Su verme işlemi ray çeliği haddeden çıktığı anda yapılırsa “in-line” adını alır. Eğer normal olarak üretimi tamamlanmış rayların mantar kısımları daha sonradan indüksiyon yada benzeri bir yöntemle östenit hale getirilip su verilirse yöntem “off-line “ adını alır [38].

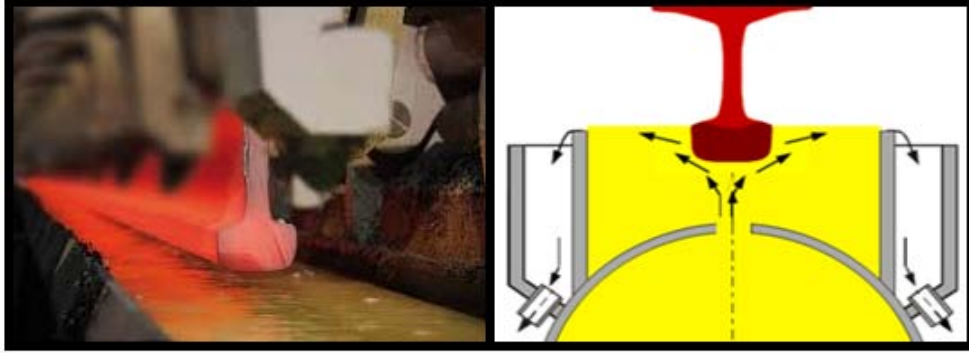


Şekil 4.6 “In-line” tipi su verme sistemi [38].

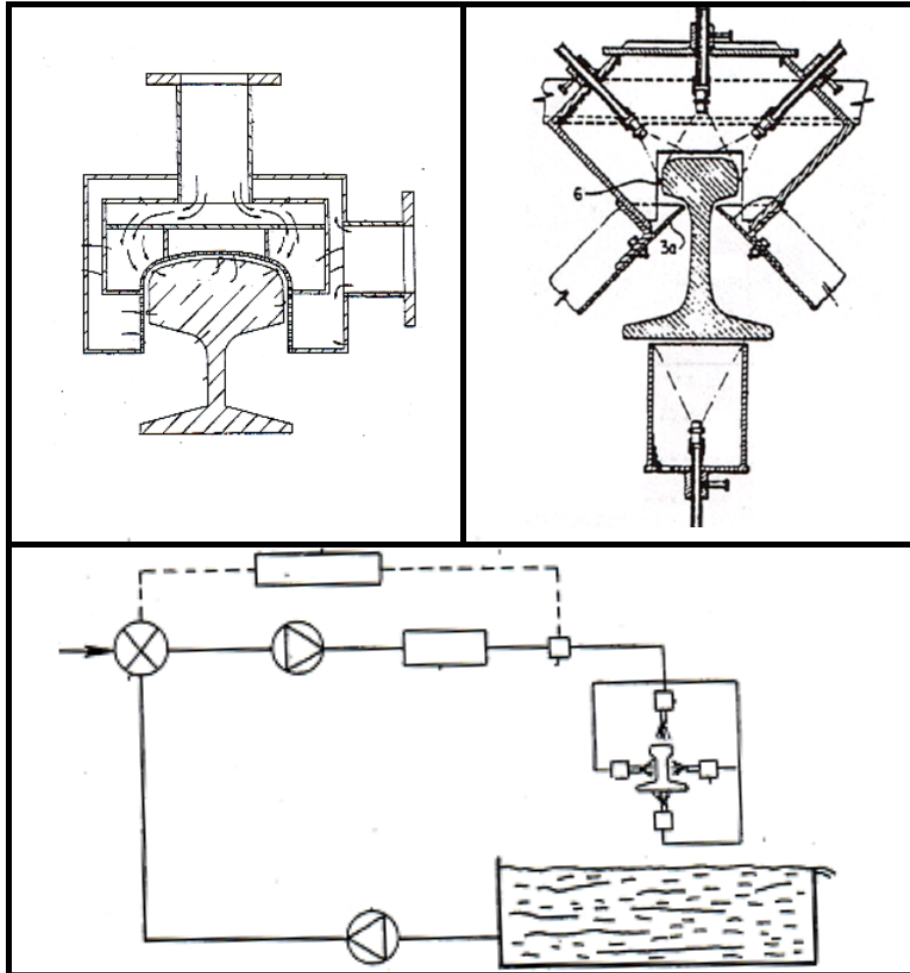


Şekil 4.7 “Off-line” tipi su verme sistemi [38].

Sitemin şekli açısından da iki uygulama mevcuttur. Birincisi ray çeliğinin mantar kısmının soğutucu ortama daldırılarak soğutulması ki, bu yöntem “daldırma” olarak bilinir. İkincisi ise ray çeliğinin mantar kısmının nozullardan püskürtülen hava+su, hava ya da su ile soğutulmasıdır, bu yöneme de “sprey” adı verilmiştir [38].



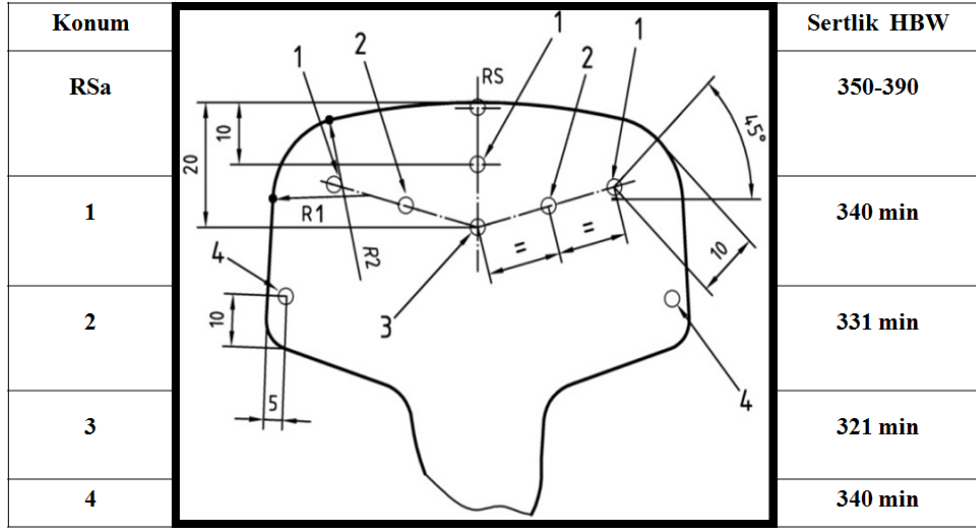
Şekil 4.8 “Daldırma” yöntemiyle su verme sistemi [38].



Şekil 4.9 “Sprey” yöntemiyle su verme sistemi [13].

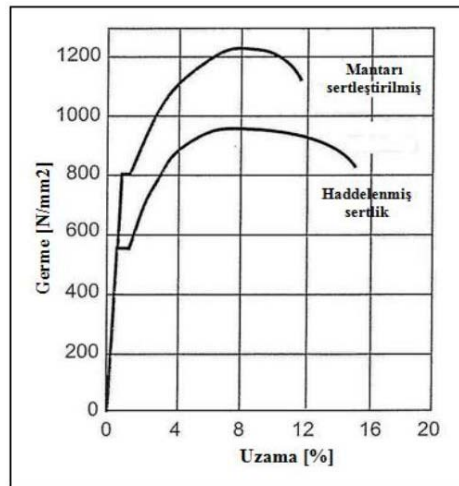
4.2.3 Su verme İşleminin Sonuçları

Bu işlemler sayesinde R260 olarak bilinen ve mantar üstü sertliği 260-290 HB aralığında değişen tren raylarının mekanik özellikleri iyileştirilmektedir. Yapılan ısıt işlem ile elde edilen ve R350HT olarak bilinen raylar elde edilir. Bu rayların mantar üstü sertlikleri, şekil..de de görüldüğü gibi, 350-390 HB aralığındadır ve mekanik özellikleri R260 kalite raylara nazaran daha iyidir [13].



Şekil 4.10 R350HT kalite raylar için EN 13674-1 standardındaki sertlik dağılımı [8].

Su verme işlemi ardından gelen mukavemet Şekil 4.10'daki çekme diyagramlarında net olarak görülmektedir. Yapılan ısıt işlem neticesinde malzemenin akma mukavemetinde % 40 civarında bir iyileşme mevcuttur. Ayrıca tokluğunun da bir miktar arttığını grafikten anlayabiliriz [8].



Şekil 4.11 Mantar sertleştirme işlemi öncesi ve sonrasında çekme diyagramları [13].

Mantar sertleştirme prosesi neticesinde tren rayları şu özellikleri sergilemektedir;

- Yüksek aşınma ve yorulma direnci
- Yüksek sıkıştırma direnci
- Yüksek akma dayanımı, çekme mukavemeti ve sertlik
- Yüksek gevrek kırılma direnci
- İyi kaynaklanabilirlik
- Yüksek saflık derecesi
- İyi yüzey kalitesi
- İmalat sonrası düşük kalıntı gerilim
- Gerekli hızda ve tasarlanan aks yükünü taşıma [1].

BÖLÜM 5

YORULMA

5.1 Yorulma Kavramının Tanımı ve Önemi

Uygulamada yani servis şartlarında malzemeler çoğunlukla statik olarak zorlanmaz. Makine ve ekipmanları genellikle büyüklüğü ve yönü düzenli ya da düzensiz olarak sürekli değişen kuvvetlere maruz kalırlar. Bu yüklemelere çevrimli yükleme adı verilir [39].

Çevrimli yüklemelere maruz kalan malzemelerde oluşan gerilmeler akma mukavemetlerinin altında olsa bile belli bir çevrim sayısını aştıktan sonra yüzeyde bir çatlak oluştururlar. Çatlağın ilerlemesi neticesinde de malzeme hasar görür. Yorulma adı verilen bu olay ilk olarak 1829 yılında W.A.S. Alber tarafından, demir zincirler üzerine tekrar eden yükler uygulanarak, incelenmiştir [40].

Servis şartlarında gözlenen ilk yorulma kırılmaları araba ve tren akslarında meydana gelmiştir. 19. Yüzyılda demiryolu sistemlerinin gelişmesiyle de akslarda meydana gelen bu kırılmaların incelenmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Akma noktasının altında fakat tekrarlı yüklemelerle çalışan bu parçaların kırılma şartları laboratuvar ortamında yeniden canlandırılmış ve sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır [40].

1852 ve 1870 yılları arasında Alman demir yolları mühendisi August Wöhler ilk sistematik yorulma incelemesini yapmıştır. Ağırlıklı olarak demiryolu aksları üzerinde çalışan Wöhler, küçük miktarda eğilme, burulma ve radyal olarak tekrarlanan yükler uygulayarak bu malzemelerin davranışlarını kaydetti. Elde ettiği veriler neticesinde ismi ile de anılan S-N (gerilme-çevrim sayısı) eğrilerini oluşturdu. Bu eğriler sayesinde ilgili

malzemenin ne kadar yük altında kaç çevrim yapabileceği yani ömrü bilinir hale gelmiştir [40].

Geçen zaman içerisinde yorulma konusu önem kazanmaya devam etmiş, gerek servis gerekse laboratuvar şartlarında yapılan incelemelerle sebep sonuç ilişkileri kurulmaya çalışılmıştır. Geliştirilen dislokasyon teorileri ile yeni yaklaşımlar ortaya çıkmıştır. Bununla beraber teknolojik ilerlemeler sayesinde inceleme ve veri toplama hassasiyeti artmış ve güvenilir sonuçlar ortaya çıkmıştır. Son olarak kırılma mekaniği fikri, farklı şartlarda çalışan malzemelerin ömürlerini hesaplamada temel olmakla beraber çatlakların oluşumu ve ilerlemesi konusunda da aydınlatıcı olmuştur [40].

Mühendislikte deformasyon sebeplerinin en yaygın olanı yorulmadır. Çekme, basma, sürünme ve kırılma testlerinde yüklemeler statik ya da sürekli artan kuvvetler şeklindedir. Yorulma yüklemeleri ise; ileri-geri kuvvet değişimi, açık-kapalı basınç değişimine benzer yüklemelerdir. Yorulmaya sadece dışarıdan etki eden kuvvetler sebep olmaz. Isıl genleşme ve büzölmeler neticesinde oluşan gerilmelerde yorulma hasarına sebep olabilir. Bu olaya da termal yorgunluk adı verilir [40].

Yorulma olayında hasar bir çatlak sonucu oluşur. Bu çatlak da yüzeydeki bir süreksizlikten kaynaklanır. Yüzeyde pürüz, çentik, çizik, kılcal çatlak ya da ani bir kesit değişimi yorulma çatlaklarının oluşumu için yeterlidir [40].

5.2 Yorulma Olayında Çevrimli Yükleme ve Terminoloji

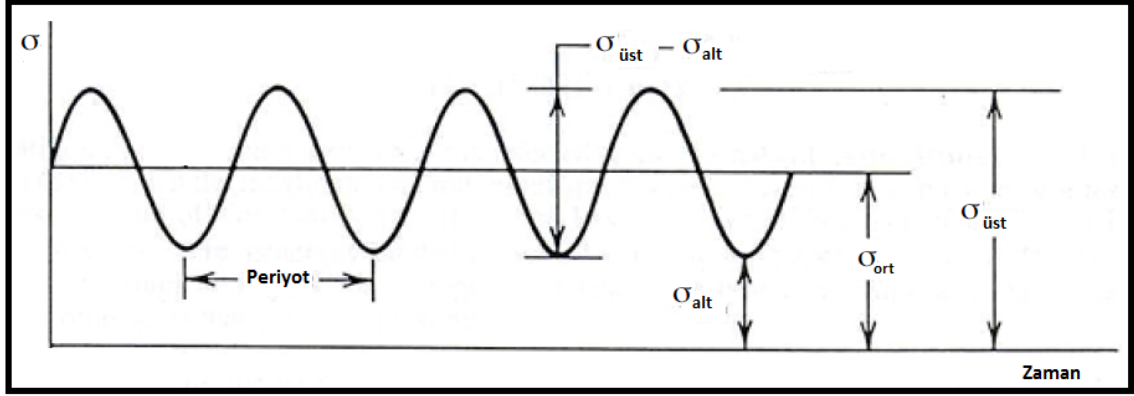
Malzemelere etkiyen yükleri zamanın fonksiyonu olarak üç grupta inceleyebiliriz. Bunlar; sürekli artan yükler, statik yükler ve dinamik yüklerdir.

Sürekli artan yükler; malzeme muayenelerinde rastlanabilecek yükleme şeklidir. Çekme veya basma deneyi sırasında numuneye sıfırdan itibaren artan bir yük uygulanır ve kopma gerçekleştiğinde yük kaldırılır.

Statik yükler; zamana göre değeri değişmeyen yüklerdir. Uygulanan yük malzemenin akma mukavemetinin altında ise hasar görmeyecektir. Üstünde ise plastik deformasyona ya da kopmaya sebep olacaktır.

Dinamik yükler; değeri zamana göre değişen yüklerdir. Yorulmaya sebep olan dinamik yükler çoğunlukla periyodiktir. Mesela; bir taşıt mili taşıtın ağırlığından dolayı eğilmeye zorlanır. Eğme zorlaması neticesinde çeki-bası gerilmeleri oluşur. Mil kendi

ekseni etrafında döndüğü için de bu çeki-bası gerilmeleri yer değiştirerek malzemede yorulma kırılmasına sebep olacaktır. Yorulmaya sebep olabilecek bir yükleme tipi Şekil 5.1’de görülmektedir [39].



Şekil 5.1 Dinamik yüklemede zamana göre yükün değişimi [40].

Yorulma konusunda karşılaştığımız terminolojiyi şu şekilde tanımlayabiliriz;

- Yorulma Dayanımı (σ_Y) : Malzemenin belli bir tekrar sayısında kırılmadan çalışabileceği maksimum yükleme değeridir. Söz konusu yük değeri için sınır çevrim sayısı çok önemlidir.
- Gerilme Tekrarı (T) : Gerilme-zaman fonksiyonunda periyodik olarak tekrar edilen en küçük kısımdır.
- Tekrar Sayısı (n) : Bir parçanın herhangi bir durumda yük tekrar sayısı.
- Yorulma Ömrü (N) : Sabit bir gerilme değerinde malzemenin dayanabileceği tekrar sayısı.
- Üst Gerilme ($\sigma_{üst}$) : Bir gerilme tekrarındaki en yüksek gerilme değeri. Çekme gerilmesi pozitif, basma gerilmesi negatif olarak kabul edilir.
- Alt Gerilme (σ_{alt}) : Bir gerilme tekrarındaki en küçük gerilme değeri. Çekme gerilmesi pozitif, basma gerilmesi negatif olarak kabul edilir.
- Gerilme Genliği (σ_G) : Mutlak değer olarak alt ve üst gerilme arasındaki fark.
- Ortalama Gerilme (σ_{ort}) : Bir gerilme tekrarında alt ve üst gerilme değerlerinin matematiksel ortalaması.

$$\frac{\sigma_{alt} + \sigma_{üst}}{2} = \sigma_{ort} \quad \frac{\sigma_{üst} - \sigma_{alt}}{2} = \sigma_G$$

Yorulma dayanımı değeri gerilme genliği değerinin mutlak değerine eşittir, $\sigma_Y = |\sigma_G|$. Başka bir açıklama yapılmadığı müddetçe yorulma zorlaması türü çekme ise “ç”, basma ise “b”, eğme ise “e” indisi ile ifade edilir. Burulmada ise “t” kayma gerilmesi sembolü kullanılır.

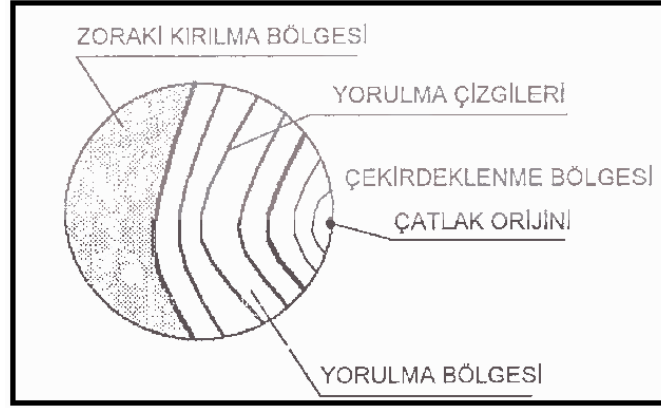
- Gerilme Oranı (R) : $\sigma_{alt}/\sigma_{üst}$ oranıdır. (işaretler dikkate alınarak)
- Gerilme – Ömür Diyagramı (S-N) : Wöhler eğrisi olarak da adlandırılır.
Malzemenin hangi yüklemeye ne kadar dayanıklı olduğunu gösterir.
- Sürekli Yorulma Dayanımı: Belli bir çevrim sayısı için verilen yorulma dayanımıdır.
Örneğin $N=10^5$ çevrim için yorulma dayanımı “ $\sigma_{Y(10^5)}$ ” şeklinde ifade edilir.
- Yorulma Ömrü : Bir malzemenin yorulma dayanımından daha yüksek gerilmelerde kırıldığı çevrim sayısı. Yorulma ömrü gösterilirken, ortalama gerilme ve gerilme genliği çevrim sayısına indis olarak eklenir. Örneğin; $N_{(+8\pm14)} = 2 \times 10^6$ gösterimi ortalama gerilmesi 8 kgf/mm² ve gerilme genliği ± 14 kgf/mm² olan bir zorlamada kırılmanın 2×10^6 çevrim sonucu gerçekleştiğini ifade eder [39].

5.3 Yorulma Kopması ve Yorulma Sınırı

5.3.1 Yorulma Kopması

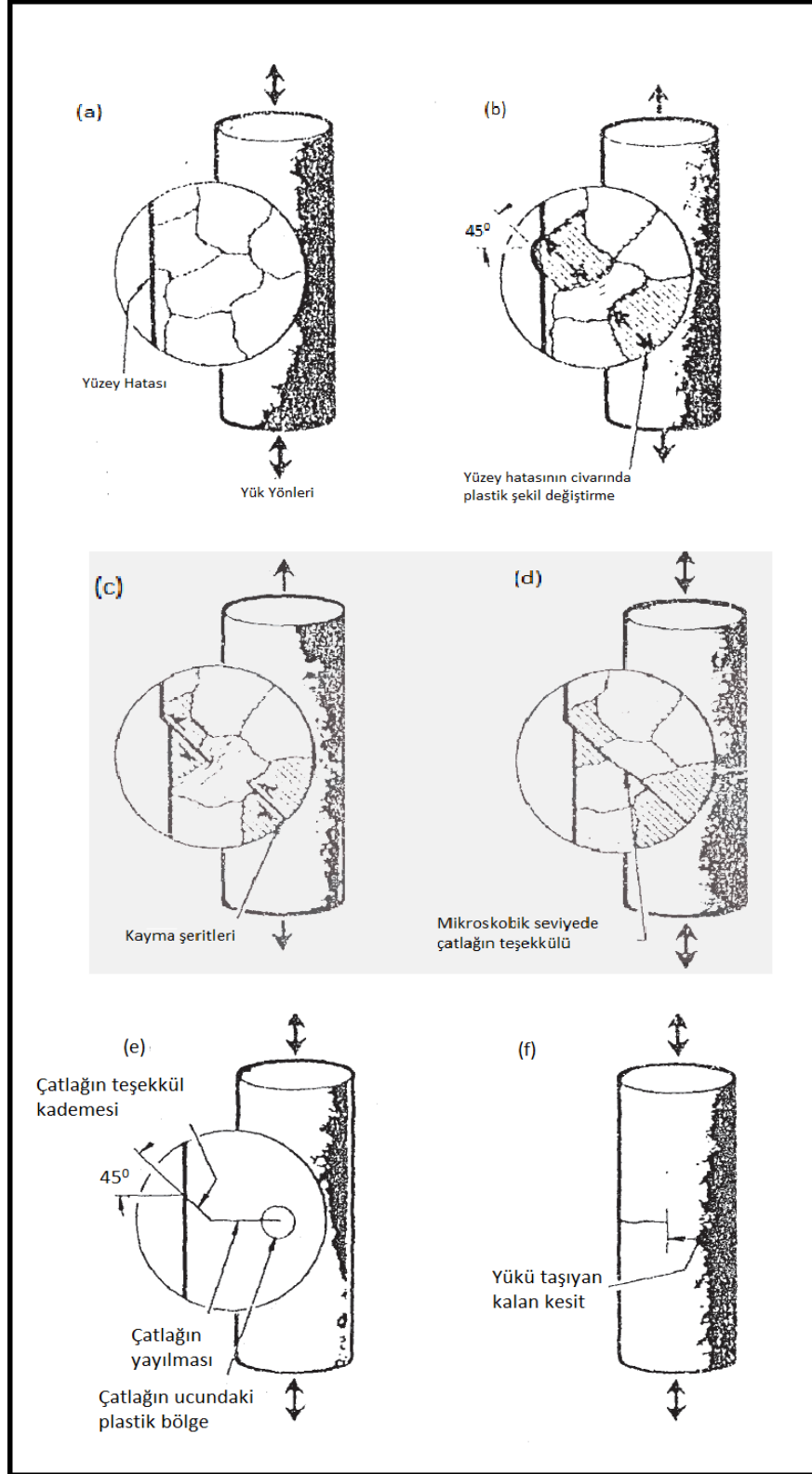
Malzeme üzerinde gerilme yığılmaları neticesinde bölgesel plastik deformasyonlar meydana gelir ve bu da gevrekliğe sebep olur. bölgesel plastik deformasyonlar sonucu kayma tabakaları kısmen dışarı çıkar ya da içeri girerler, bu da yüzeyin kabalaşmasına sebep olur. bu durum da çentik etkisini doğuracaktır. Çentik dibinde gerilmeler artacak ve çatlak yayılacaktır [40].

Şekil 5.2’de görüleceği gibi yorulma sonucu kopan malzemenin kesitinde birbirinden farklı görünen iki bölge vardır.



Şekil 5.2 Yorulma kopmasına uğramış kesitin şeması [39].

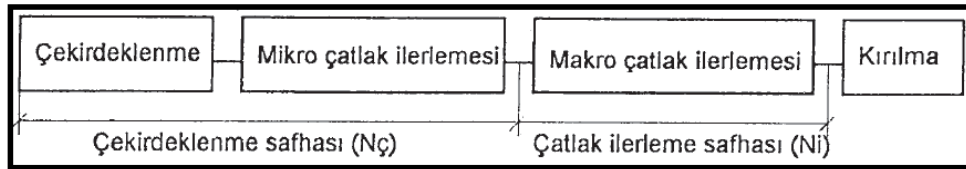
Karşılıklı olarak yüzeylerin birbirlerine periyodik olarak basınç yapmaları sonucunda parlak bir yüzey oluşur. Korozi bir ortam söz konusu ise korozyon belirtileri de görülebilir. Yorulma kopmasına uğrayan yüzey ise kesiti küçük olduğu için aniden kopar. Şekil 5.3’de yorulma çatlaklarının oluşumu ve çatlakların ilerleyişi görülmektedir [39].



Şekil 5.3 Yorulma çatlağı teşekkülü ve ilerlemesi [39].

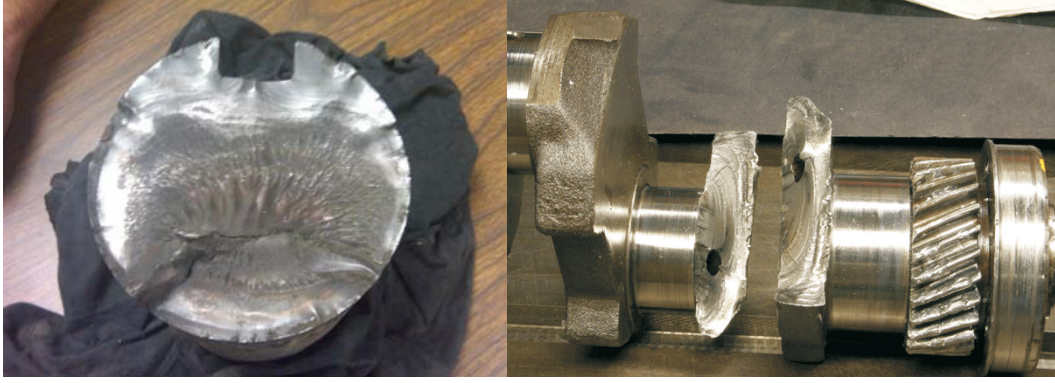
Şekil 5.4’de de görüleceği gibi yorulma hasarı dört temel safhada oluşur;

- Yorulma çatlaklarının çekirdeklenmesi: Yüzeyde bölgesel plastik deformasyonlar neticesinde girinti ve çıkıntılar oluşması.
- Çatlakların yerel plastik deformasyon (kayma) bandında ilerlemesi: Çekirdeklenen çatlakların çekme eksenine 45^0 açı yaparak , yüksek kayma gerilmelerinin mevcut olduğu kayma bandı içinde ilerlemesi.
- Çatlakların maksimum çekme gerilmesinin etki ettiği düzlemde ilerlemesi: Makro çatlak seviyesine ulaşan çatlakların maksimum çekme gerilmesine dik düzlemde ilerlemesi.
- Kırılma: Çatlak boyutunun kritik bir değere ulaşması sonucu kalan kesitin yükü taşıyamaması ve kopması [39].



Şekil 5.4 Yorulma hasarının safhaları [39].

Her bir safhaya karşılık gelen çevrim değerlerini belirlemek çok zordur. Fakat kırılma ömrün son tekrarlarında meydana gelir. Hasarın bu kısmı yorulmadan ziyade yarı statik bir zorlama neticesinde meydana gelir. Çekirdeklenmeden mikro çatlak ilerlemesine hangi çevrim sayısında geçildiğini bilmek çok zordur ve pratikte buna ihtiyaç da yoktur. Bu durumda yorulma hasarının ilk iki safhası birleştirilerek kolaylık sağlanabilir. Bu birleştirme sonucu ortaya başka bir soru çıkmaktadır. Bir mikro çatlak ne zaman makro çatlak olur? Bir çatlakların boyutları kırılma mekaniği prensipleri uygulanabilecek kadar büyükse makro çatlak olarak kabul edilir. Bu değer alüminyum alaşımları için 0.125 mm, çelikler için de 0,2 mm civarındadır [39].



Şekil 5.5 Millerde yorulma hasarı sonucu kırılma yüzeyleri [41].

Yorulma safhalarının bu kadar detaylı incelenmesinin sebebi, her uygulamada farklı bir safhanın önem kazanmasıdır. Çünkü laboratuvar ortamında test yapılırken numunelerin yüzeyleri pürüzsüz ve parlaktır yani hiçbir süreksizlik söz konusu değildir. Ancak; servis şartlarında malzemeler böyle değildir. Ayrıca sadece yorulmaya da maruz kalmazlar. Başka zorlamaların etkileri yorulma için bir başlangıç olabilir. Onun için her uygulamanın kendince önemli safhaları vardır ve bunları detaylı incelemek gerekir [40].

Örnek olarak;

- Otomobil motoru: Araçların sonsuz ömürde olması istenir, dolayısıyla çatlak ilerlemesi evresi konu dışındadır. Hedef çatlağın çekirdeklenmesini engelleyecek tasarımlar geliştirmektir.
- Nükleer basınçlı kap: Kaynakla imal edilen bu elemanda bir takım başlangıç hataları mevcuttur. Bu sebeple çatlak çekirdeklenmesi önemini kaybeder. Çatlağın çok yavaş ilerlemesi gerekmektedir.
- Uçak gövdesi: bu yapı sonlu ömre sahip olarak kabul edilmelidir. Bu sebeple hem çatlağın çekirdeklenmesi hem de çatlak ilerleme safhaları önem kazanır.

Yorulma çatlakları genellikle yüzeyde başlar. Bunun nedeni bazı yüklemelerin yüzeyde en yüksek değere ulaşması, yüzey pürüzlülüğünün çentik etkisi yapması, korozyon sonucu yüzeyde çentik etkisi yapabilecek gözenekler oluşması ya da yüzeyde düzlem gerilme halinin olması sonucu plastik şekil değişiminin daha kolay olması olabilir [39].

Çatlak ilerleme safhasının yorulma ömrü içindeki yüzdesi (N_i/N);

- Genlik gerilmesi arttıkça artar.
- Aynı ömür için malzemenin tokluğu arttıkça artar. Bu durumda tok malzemelerde çekirdeklenme kolay olup çatlak ilerleme hızı düşüktür. Gevrek malzemelerde ise çekirdeklenme zor olur ama çatlak hızlı ilerler.
- Çentiğin varlığı ve keskinleşmesi ile artar. Bu tip bir durumda çekirdeklenme evresi ihmal edilir ve yorulma ömrünün tamamen çatlak ilerlemesinde geçtiği kabul edilir [39].

5.3.2 Yorulma Sınırı

Belirli bir ortalama gerilme için sonsuz ömre tekabül eden gerilme değerine yorulma sınırı adı verilir. Pratik olarak malzemelerin yorulma sınırları döner eğmeli yorulma makinelerinde, parlatılmış yüzeyli parçalarla elde edilir. Çeliklerde 10^6 çevrim sonucunda hasar oluşturmayan gerilme değerleri yorulma sınırı olarak kabul edilir [39].

Çekme mukavemeti 1400 MPa'nın altında olan çeliklerde, döner eğmeli makinelerde ($\sigma_{ort}=0$) yorulma dayanımı σ_y , çeliğin çekme mukavemeti $\sigma_{\text{ç}}$ 'ye bağlı olarak, $\sigma_y=0.5\sigma_{\text{ç}}$ şeklinde ele alınabilir. Dökme demirlerde ise $\sigma_y=(0.35-0.5)\sigma_{\text{ç}}$. Alüminyum ve magnezyumda $\sigma_y=(0.35-0.4)\sigma_{\text{ç}}$ olarak hesaplanabilir. Demir dışı metallerde belirgin bir yorulma sınırı olmadığından 10^7 çevrime tekabül eden yorulma dayanımı esas alınır. (yorulma Vedat taşkın) Bazı çelik türlerinin çekme mukavemeti ve yorulma sınırı arasındaki ilişki Çizelge 4.1'de genel olarak verilmiştir.

Çizelge 5.1 Genel olarak çeliklerde çekme mukavemeti-yorulma sınırı kıyası [40].

Çelik Cinsi	Çekme Mukavemeti (kgf/mm^2)	Yorulma Sınırı (kgf/mm^2)	
		Düz Çubuk	Çentikli Çubuk
Yumuşak	34	19	15
Yarı yumuşak	54	27	18
Sert	85	34	23
Çok sert	100	42	27
Nikel ve Kromlu çelik	85	47	35

5.4 Wöhler Eğrileri (S-N Eğrileri)

5.4.1 Wöhler Eğrilerinin Oluşturulması

Yorulma testlerin sonuçları genelde bir grafik üzerinde gösterilir. Bu grafikler, düşey ekseninde uygulanan yükün, yatay ekseninde de çevrim sayılarının olduğu eğrilerdir. İsmi ile ilgili temel incelemeler yapan bir mühendisten alan “Wöhler” eğrileri her malzeme için özeldir. Malzemenin tane boyutu, yüzey durumu, çalıştığı ortam gibi bir çok sebep bu eğrileri değiştirebilir. Wöhler eğrilerine bakılarak malzemelerin yorulma sınırları görülebilir. Ayrıca yorulma sınırları üzerindeki yüklerde kaç çevrim yapacağı da tahmin edilebilir. Fakat kesin bir sonuç söylemek doğru olmaz. Çünkü, testlerde kullanılan numuneler yüzeyleri parlatılmış, herhangi bir çatlak barındırmayan malzemelerdir. Oysa pratikte malzemeler gerek üretim gerek çalıştıkları ortam sebebiyle yüzey pürüzlülüğüne sahiptir ve bu da yorulma hasarını kolaylaştırır [42].

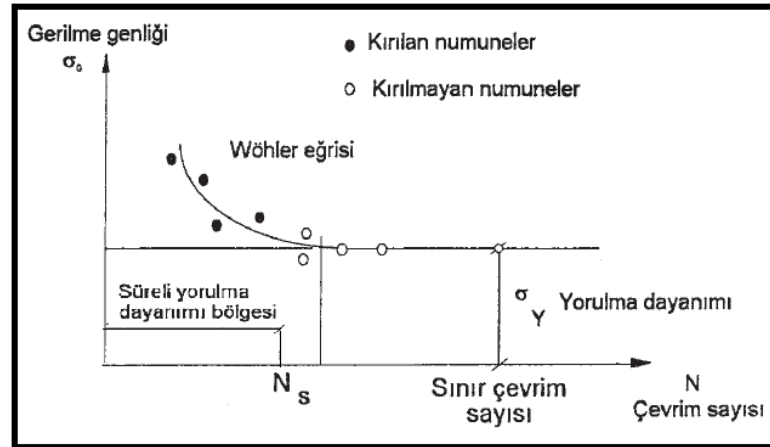
Yorulma testleri için kullanılacak numuneler eksene paralel olarak parlatılırlar. Çentik hassasiyetlerinin belirlenmesi için de çentik katsayıları belli olan çentikli numuneler kullanılır. Günümüzde çekme, çekme-basma, çevresel eğme, ileri-geri eğme ve burma zorlamaları yapmaktadırlar. Bununla birlikte bu zorlamaları bileşik olarak yapan cihazlar da mevcuttur. Söz konusu cihazlar 8-250 Hz (500-15000 d/d) aralığında hızlara sahiptirler. Bu aralık çentiksiz çelikler için bir problem değildir fakat, çentikli numuneler ve hafif metallerde yorulma davranışı frekansa göre değişebilir [39].

Malzemelerin yorulma dayanımları genellikle Wöhler yöntemi ile bulunur. Bu yöntem, birebir aynı numunelerin, aynı şartlarda sadece yük miktarlarını değiştirilerek test edilmesi esasına dayanmaktadır. Numuneler kırılana kadar ya da sonsuz ömrü tamamlayana kadar test edilirler. Sonsuz ömür yorulma sınırındaki çevrim sayısını ifade eder. Oda sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda çelikler için 10^7 , çelikler haricindeki metallerde ve çeliklerin yüksek sıcaklık uygulamalarında 10^8 çevrim olarak kabul edilir. Deney sürelerini kısaltmak için, çeliklerde 2×10^6 ve hafif metallerde 10^7 - 5×10^7 sayıları kullanılabilir. Bu durumda “ σ_Y ” sembolünün altına söz konusu sınır çevrim sayısı da indis olarak eklenir. Sınır çevrim sayısı 10^6 olması halinde yorulma sınırı “ $\sigma_{Y(10^6)}$ ” şeklinde ifade edilir. Bir deney serisinde 6-10 adet deney parçası gereklidir. Belirli bir deney parçası için başlangıçta ayarlanan yük miktarı deney esnasında değiştirilemez.

Fakat çok kademeli yorulma testi söz konusu ise zorlama sistematik olarak deney sırasında değiştirilebilir. Her bir zorlama kademe süresince yük sabit tutulur [39].

Periyodik yüklemelerde malzemelerin içyapısında meydana gelen değişiklikler çevrim sayısına (N) bağlıdır. Bu sebeple çevrim sayıları iki bölgeye ayrılır. Kesin bir sayı verilemez ama genellikle $N < 10^4$ olan çevrim sayıları düşük çevrimi (low cycle) $N > 10^4$ olan çevrim sayıları da yüksek çevrimi (high cycle) ifade eder. Düşük çevrimlerde meydana gelen kopma genelde statik kopma gibidir. Düşük yüklerde çevrim sayısı artacağından dinamik yükleme etkisi daha net görülür [42].

Şekil 5.6’da şematik bir Wöhler eğrisi görülmektedir. Gerilme genliği kesit alana düşen yükü olarak ifade edilir. Yorulma dayanımı da sınır çevrim sayısındaki yük miktarıdır. Eğri bir bant halinde değerlendirilmelidir. Kırılan ve sonsuz ömrü tamamlayan malzemelerin ortalama olarak oluşturdukları bir grafikdir. Çevrim sayısı (N) skalası genellikle logaritmik olarak verilir [40].

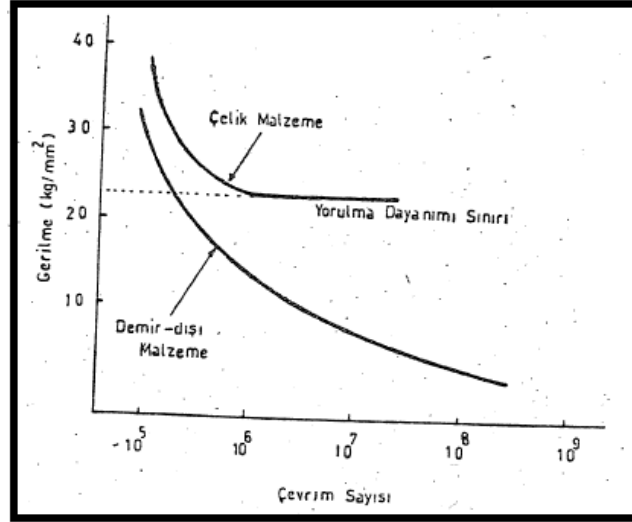


Şekil 5.6 Wöhler eğrisi [40].

Yorulma dayanımı malzemeye bağlı, teknolojik , deney tekniği ile ilgili ya da farklı bir çok sebepten etkilenebilir. Dolayısıyla Wöhler yönteminde 6-10 adet deney numunesi ile çok güvenilir bir eğri elde etmek zordur. Wöhler eğrisinin dağılma bandını güvenli bir şekilde oluşturmak için 40-200 deney numunesine ihtiyaç vardır [39].

Wöhler eğrilerinin Şekil 5.6’da verildiği gibi yatay bir doğruya asimptot olması ya da bir yorulma sınırına sahip olması, demir-çelik alaşımları, alüminyum ve magnezyum alaşımları için geçerlidir. Bunlar dışındaki bir çok metalin ve metallerin dışındaki, özellikle beton ve doğal seramiklerin, Wöhler eğrilerinde bir yatay asimptotu yoktur. Bu nedenle bu cisimlerin bir yorulma sınırları da söz konusu değildir. Mühendislik

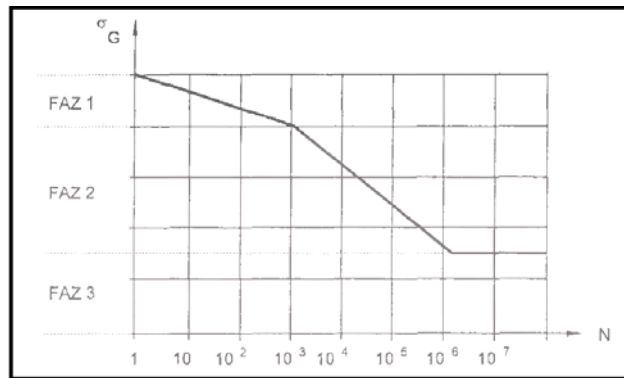
çalışmalarda da kullanılan bir çok malzeme için de yorulma sınırı kavramı söz konusu olmadığından, yükleme değerine karşılık gelen çevrim sayısını ifade eden, yorulma mukavemeti kavramını kullanmak daha isabetli olur. şekil 5.7’de demir esaslı ve demir dışı malzemelerin Wöhler eğrileri arasında ki fark açıkça görölmektedir [40].



şekil 5.7 Çelik ve demir dışı malzemeler için şematik Wöhler eğrileri [43].

5.4.2 Wöhler Eğrilerinin İncelenmesi

Farklı malzemelere ait Wöhler eğrileri incelendiğinde üç faz göze çarpacaktır. Birinci faz düşük çevrimli yorulma fazı, ikinci faz yüksek bölge yorulma fazı ve üçüncü faz ise alçak bölge yorulma fazıdır. şekil 5.8’de Wöhler eğrisi üzerinde bu fazlar görölmektedir.



şekil 5.8 Wöhler eğrisinin fazları [40].

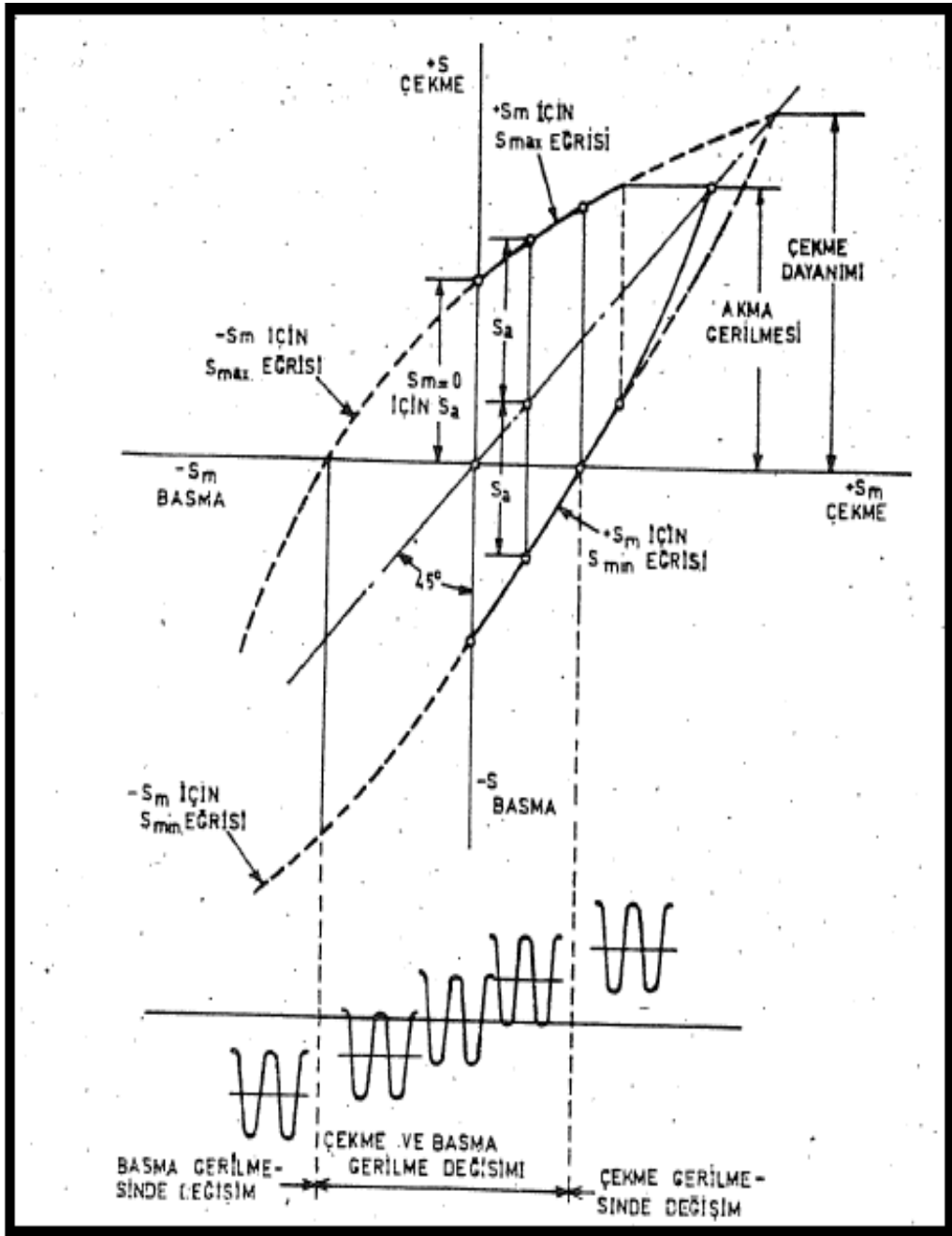
- Birinci faz: Statik ve alçak tekrarlılarda oluşan fazdır. Bu faza pratikte çok rastlanmaz. Çünkü makine parçaları genellikle statik yüklemelerde çalışmaz.

Yük değişiyorsa birkaç yüz ya da bin tekrardan sonra malzemenin iç yapısında bozulmalar olur ve parça kırılır.

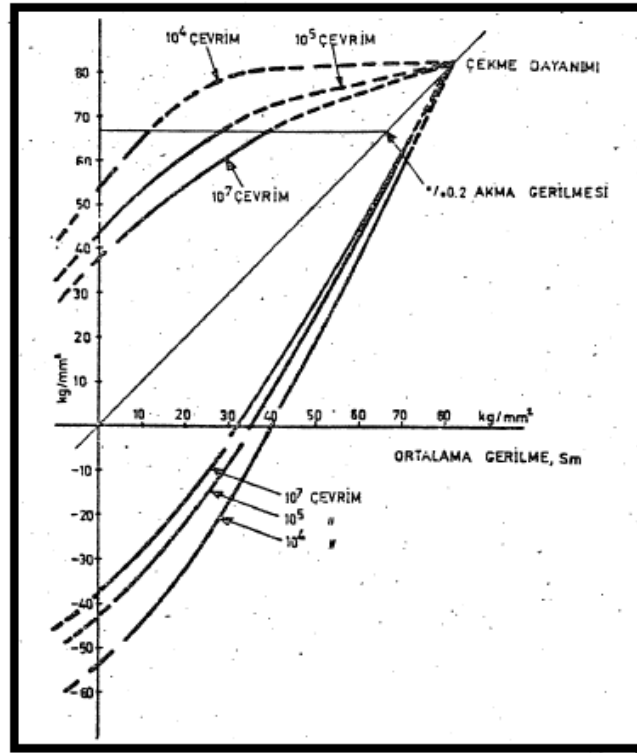
- İkinci faz: pratikte bu fazın önemi daha büyüktür. Deney numunelerinin yüzeyi yüksek büyütmelemlerde incelendiğinde numune ekseni ile belli bir açı yapan bantlar göze çarpar. Bunlar yüzeydeki kayma düzlemlerini ifade eder. Bu kaymalar sonucu mikro çatlaklar oluşur ve ilerler. Sonuçta da malzeme yükü taşıyamaz hale gelerek hasar görür.
- Üçüncü faz: eğrinin asimptot halini aldığı fazdır. Demir esaslı malzemelerde çok belirgindir. Yorulma dayanımı dediğimiz belirli bir genliğin altında parça kırılmaz olarak kabul edilir [39].

5.5 Smith Diyagramları (Yorulma Dayanım Diyagramları)

Bu diyagramda belirli bir yorulma ömrü için üst gerilme, alt gerilme veya gerilme genliğinin ortalama gerilmeye göre oranı verilmektedir. Bu diyagramlar gerilme oranının farklı olduğu Wöhler eğrilerinden faydalanılarak çizilir. Ortalama gerilme, gerilme genliği, gerilme aralığı ve gerilme oranı gibi bir çok faktörün yorulma ömrüne etkisi vardır. Bu faktörlerinin tümünün incelenemediği Smith diyagramları mühendislik uygulamalarında çok daha faydalı olmaktadır [43].



Şekil 5.9 Tipik bir Smith diyagramı [39].



Şekil 5.10 Farklı yorulma ömürleri için Smith diyagramları [39].

5.6 Yorulmaya Etki Eden Faktörler

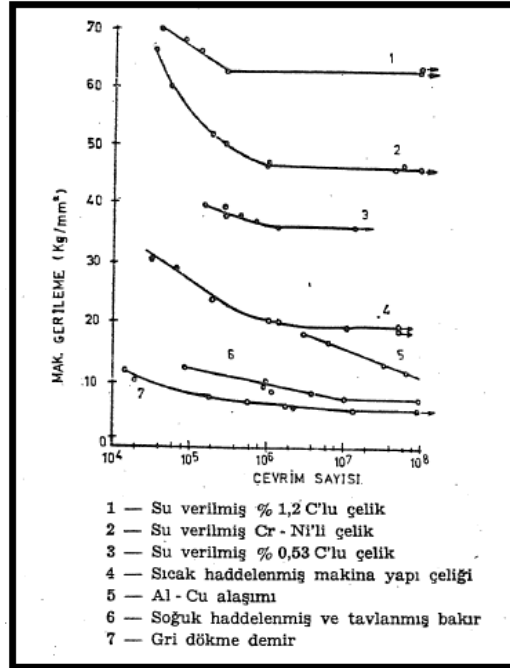
Yorulma olayının mekanizması hayli karışık olduğundan ve hala tam olarak çözülmemiş konuları olduğundan aynı gerilme genliklerinde bile farklı çevrim sayılarında kırılmalar olabilir. Buradan da görüleceği gibi, malzeme özelliklerinden çalıştığı ortama kadar, yorulma olayına etki eden bir çok faktör söz konusudur [39].

5.6.1 Malzemenin Çekme Mukavemeti

Genellikle malzemelerin çekme mukavemetleri arttıkça yorulma dayanımları da artar. Mesela demir alaşımları ve titanyum alaşımlarında arayer atomu halindeki alaşım elementleri çekme mukavemetini artırarak yorulma dayanımı da artırır. Sadece yorulma dayanımını artıran bir aşım elementi mevcut değildir [43].

Malzemelerin çekme mukavemetlerini artıran tüm işlemler aynı zamanda yorulma dayanımına da artırır. Özellikle uygun su verme ve menevişleme neticesinde sertliği ve çekme mukavemeti artan çeliklerin yorulma dayanımları da artar. Alaşım elementleri ile su alma derinlikleri artan çeliklerde de ısıtma işlemi neticesinde yorulma dayanımında artış görülmektedir. Şekil 5.11’de bazı malzemelerin Wöhler eğrileri karşılaştırılmıştır. Bu

eğrilerden de anlaşılacağı gibi statik çekme mukavemetleri yüksek olan malzemelerin yorulma dayanımları da yüksektir [43].



Şekil 5.11 Muhtelif malzemelerin Wöhler eğrileri [43].

Sünek malzemelerin son mekanik işlemleri, inklizyon, segregasyon gibi çekme mukavemetini düşüren olumsuzlukların giderilmesi de yorulma dayanımını artırır. Kısacası malzemenin mekanik mukavemet değerlerini artıran işlemlerin hemen hepsi yorulma dayanımı da artırır [43].

5.6.2 Çentik Etkisi

Yorulma kırılmaları her zaman gerilmelerin yoğun olduğu noktalardan başlar. Parça kesitinde çentik, delik, kama kanalı, ani kesit değişimleri gibi durumlar gerilme yığılmalarına sebep olduğu için yorulma dayanımını düşürür. Ayrıca malzemeler üretilirken yüzeylerinde oluşan pürüzlerde çentik etkisi oluşturabilir. Bunu önlemek için malzemeler ana çekme gerilmesi yönünde taşlanırlar. Çizikler gerilme eksenine paralel olduğunda gerilme dayanımı en yüksek değere ulaşır. Çentiklerin boyutu ve şeklinin yorulma dayanımına etkisi Çizelge 5.2'de görülmektedir [39], [43].

Çizelge 5.2 Çentik boyutu ve şeklinin yorulma dayanımına etkisi [40].

Çentik Şekli ve Boyutu	Yorulma Dayanım Sınırının Azalması (%)
250 mm yarıçaplı yiv	0
25 mm yarıçaplı yiv	5
6 mm yarıçaplı yiv	10
Küçük kavisli çıkıntı	25
90° açılı çıkıntı	50
90° açılı V çentik	65

Malzemelerde yorulma dayanımına çentiğin etkisini anlamak için çentikli ve çentiksiz numunelerin yorulma dayanımları incelenir. Çentiksiz yorulma dayanımının çentikli yorulma dayanımına oranı çentik faktörü ($\beta_{\text{çen}}$) dediğimiz kavramı ortaya çıkarır.

$$\beta_{\text{çen}} = \sigma_{Y (\text{Çentiksiz})} / \sigma_{Y (\text{Çentikli})}$$

Aynı zorlama türü için en yüksek yorulma çentik katsayısı ortalama gerilmenin sıfır olduğu, değişken yorulma dayanımı için bulunur. Yüzey dayanımını artıran sementasyon, alevle yüzey sertleştirme, indiksiyonla yüzey dertleştirme, nitrürleme, soğuk haddeleme ve bilye püskürtme gibi işlemler çentik faktörünü düşürür [39].

5.6.3 Korozyon Etkisi

Malzemenin yorulma zorlamasına moruz kalırken korozyona uğramasına “korozyonlu yorulma” adı verilir. Korozyon malzeme yüzeyinde oyuklar ya da çukurlar oluşmasına sebep olur. oluşan çukurlar da çentik etkisi oluşturarak yorulma dayanımını düşürür. Korozi ortamda yapılan yorulma deneylerinde frekans da önem kazanır. Düşük frekanslarda yapılan deneylerde süre artacağı için korozi ortam çatlak içerisinde de etki gösterir. Böylece yorulma dayanımını düşürür [43].

Vakum altında yapılan deneylerde malzemeler, normal deneylere göre daha büyük yorulma dayanımı sergiler. Korozi etki oluşturacak gazların çok küçük miktarları bile sonucu oldukça fazla etkiler. Sulu çözeltilerde yapılan deneylerde ise Wöhler eğrilerinin daha aşağıya indiği görülmüştür [39].

5.6.4 Yükleme Şeklinin Etkisi

Yorulma olayında eksenel, eğilme ve burulma olmak üzere üç temel yükleme vardır. Tam değişken eksenel yorulma ile saptanan yorulma dayanımı eğilme ile saptanan değer % 85'i kadardır. Tam değişken burulmada ise bu değer % 58'dir. Bu nedenle test edilecek parça servis şartlarında ne tür yüklemelere maruz kalacaksa ona göre yükleme biçimi seçilmelidir. Parçaların tek tip yüklemelere maruz kalmadığı da göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle ilgili parçaların servis şartlarında nasıl yüklemelere maruz kaldığı kaydedilip teknolojik yorulma cihazlarında testler yapılabilir [39].

5.6.5 Frekans Etkisi

Metallerde 10^4 tekrar/dakikaya kadar ısınma meydana gelmediğinden frekansın bir etkisi yoktur. Plastik malzemelerde ise 10 Hz civarındaki çevrimlerde bile ısınma meydana geldiğinden frekans oldukça düşük tutulmalıdır [39].

5.6.6 Boyut Etkisi

Eğilme ve burulma şeklindeki yüklemeler parça kesitinde uniform olmayan gerilemelere neden olduğundan, parça boyutunun artması yorulma dayanımını olumsuz etkiler. İnce bir telin yorulma sınırı standart bir numuneye göre daha yüksek çıkarken 50 mm çapındaki bir malzemede u değer % 75'e kadar düşebilir. Eğilme yüklemesinde boyut faktörü değerleri Çizelge 5.3'de verilmiştir. Çekme ve basma zorlamalarında yükün kesite eşit dağıldığı kabul edildiğinden bu değer 1 alınır.

Çizelge 5.3 Eğme ve burulma zorlamaları için boyut faktörü [39].

D (mm)	Faktör
D<10	1
10<D<50	0.9
50<D<230	$1-(D-7.6)/380$

Numune boyutlarının yorulma dayanımına etkisi, 10^6 çevrimle karşılaştırıldığında, 10^3 çevrime kadar ihmal edilebilir değerdedir.

5.6.7 Sıcaklık Etkisi

Oda sıcaklığının altındaki deneylerde sıcaklık düştükçe yorulma dayanımı artar. Ancak oda sıcaklığının altındaki değerlerde malzemelerin çentik hassasiyeti artmaktadır. -20°C ve -40°C aralığında yorulma dayanımında fark edilir bir artış meydana gelir [39].

200°C 'ye kadar sıcaklığın bir etkisi yoktur. Düşük karbonlu çeliklerde $200-300^{\circ}\text{C}$ aralığında yorulma dayanımında artış görülür. Bu etkinin nedeni düşük karbonlu çeliklerin bu sıcaklıklarda deformasyon yaşanmasına uğrayarak çekme mukavemetinin artmasıdır. Bunun haricindeki durumlarda yorulma dayanımı düşer [43].

Deney sıcaklığı belirli bir değerin üstüne çıktığında yorulmadan ziyade sürünme devreye girer. Kopma, yorulmadan çok sürünmeden kaynaklanır. İki olay arasındaki fark kırılma türleridir. Yorulmada kırılma tane içinde, sürünmede ise taneler arasındadır [43].

Makine elemanlarının kullanım esnasında sıcaklık değişimlerine maruz kalmaları ısısal gerilmelere yol açarak malzemede yorulmaya neden olabilir. Sıcaklıktaki değişimin malzemede yol açtığı gerilme şu şekilde ifade edilir;

$$\sigma = \alpha \times E \times \Delta T$$

α : Lineer ısı genleşme katsayısı

E: Elastisite modülü

Bir defalık ısı değişimleri bile malzemede çatlamaya yol açabilir. Buna “termal şok” adı verilir. Çatlak birkaç ısı değişim neticesinde oluşursa buna “termal yorulma” adı verilir. Isı genleşme katsayısı büyük olan malzemeler termal yorulmaya karşı son derece hassastır [43].

5.6.8 Gerilme Genliğinin Etkisi

Gerilme genliği yorulma olayında birinci derece değişkendir. Gerilme genliğindeki en ufak bir değişim yorulma ömrü üzerinde büyük değişimlere sebep olur [43].

5.6.9 Yüzey İşlemlerinin Etkisi

Yüzeyde sertleştirme işlemi uygulandığında yorulma dayanımında artış görülmektedir. Fakat bu işlem tüm yüzeye uygulanmalıdır. Aksi halde kesişim noktasından çatlak oluşabilir. Nitrasyonla yüzey sertleştirilmesi sonucunda eğme yorulması % 20-35 aralığında iyileşme görülür [39].

Yüzeyin bilyalanarak dövülmesi neticesinde oluşan artık basma gerilmeleri yorulma dayanımını % 27-33 aralığında artırır. Haddeleme ile yüzeye basınç uygulanması da yorulma dayanımına % 10-25 aralığında katkı sağlar [39].

Yüzeye yapılan krom kaplama işlemi ise aşınma ve korozyona karşı koruma sağlarken yorulmaya karşı aynı etkiyi oluşturamaz. Metal püskürtme işlemi yüzeyde küçük boşluklar ve tabakalar meydana getirdiğinden yorulma dayanımını düşürür. Mesela metal püskürtme yolu ile kaplanmış Al-Cu-Mg alaşımlarının yorulma dayanımları % 14 oranında düşmektedir [39].

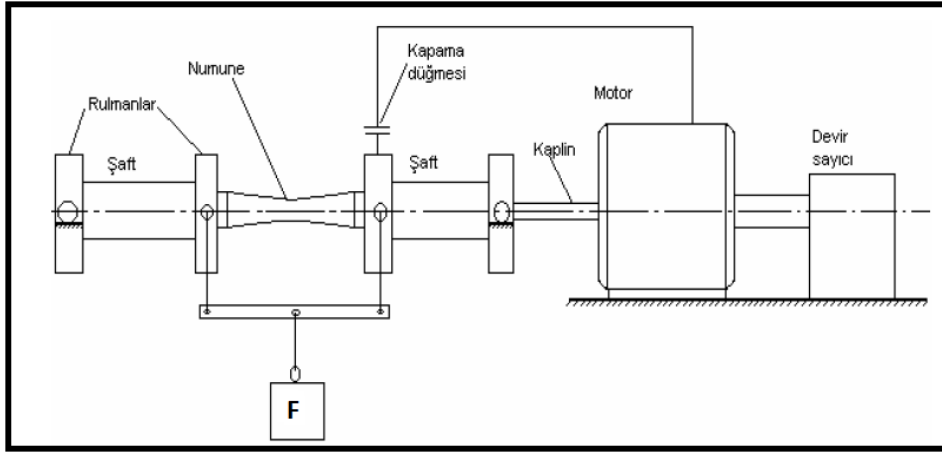
5.7 Yorulma Testi İçin Kullanılan Makineler

Yorulma makineleri ilk olarak eğme zorlamasıyla malzemeleri test etmekteydi. Fakat, malzemeler farklı tarda yüklemelere de maruz kalmaktadır. Bu sebeple günümüzde çekme-basma, çevresel eğme, ileri-geri eğme, burma ve bunların bileşimi olmak üzere çok farklı zorlamalarla yorulma testleri yapılmaktadır. Bu makinelerin frekansları uygulanan malzeme cinsi, beklenen özellikler ve makinelerin kapasitene göre 8-250 Hz (500-15000 devir/dakika) aralığında değişmektedir. Tüm uygulamalarda sorunsuzca kullanılabilecek bir yorulma test cihazı veya numunesi söz konusu değildir. Çünkü, her uygulama kendine has zorlamalara sahiptir. Bunun yanında yorulma dayanımını etkileyen faktörlerin de çokluğu göz önüne alınırsa pratikteki uygulama şekline göre testler seçilmelidir. Bu konu kapsamında bu cihazlar tanıtılacaktır [44], [47].

5.7.1 Döner Eğmeli Yorulma Düzeneği

Yorulma dayanımlarının ölçülmesi için ilk kullanılan deney düzeneğidir. Küçük numunelerin kullanıldığı yaygın bir yöntemdir. Sistemin temel mantığı, numunenin kendi eksenini etrafında dönerken art arda ve eşit genlikte çekme-basma gerilmelerine maruz kalmasıdır. Numune dönerken ortalama gerilme sıfır olmaktadır. Birbiri ile aynı özelliklere sahip ve aynı şekilde hazırlanmış numuneler farklı yüklerde test edilerek

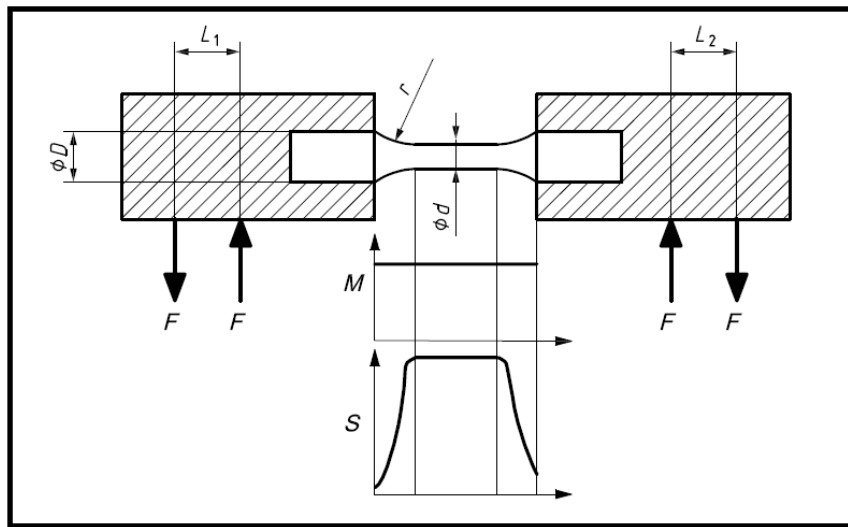
Wöhler eğrileri oluşturulmaktadır. Dakikada 1000-10000 devir aralığında çalıştırılabilirler ama literatürde 2500-3000 devir aralığında çalışıldığı görülmektedir [45].



Şekil 5.12 Döner Eğmeli Yorulma Cihazı Şematik Gösterimi.

Şekil 5.12’de görülen ve “R.R. Moore Tipi yorulma cihazı” olarak da adlandırılan bu düzenekte numuneye yük uygulanarak üst kısımda bası, alt kısımda da çeki gerilmeleri oluşturulur. Numune kendi ekseninde dönerken gerilmeye maruz kalan bölgeler değişir. Bu sayede yüzeyin her noktasında sinüzoidal değişen bir gerilme doğar. Bu şartlar altında malzemenin hangi yüklemde kaç tur attığına yani çevrim sayısına bakılarak yorulma dayanımı elde edilir [47], [46].

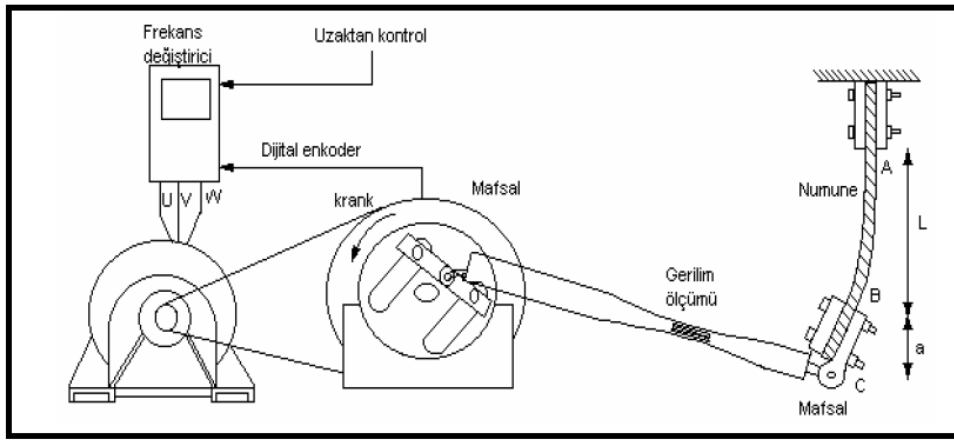
Bu cihazlarda çeneler arasındaki numune tüm uzunluğu boyunca sabit eğilme momentine maruzdur [40]. Bu durumu şekil 5.13 daha net açıklamaktadır.



Şekil 5.13 Dönel eğmeli yorulma numunesinde moment diyagramı [46].

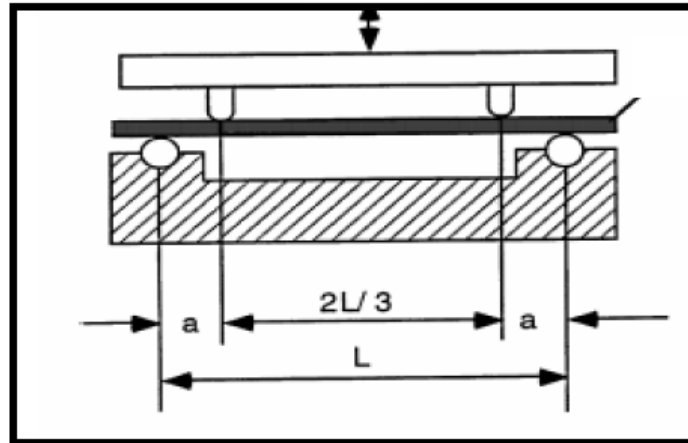
5.7.2 Tekrarlanan Eğilme Deney Düzeneği

Eğilme zorlamasıyla yapılan deneylerde daha karmaşık yükler söz konusudur bu yüzden gerçeğe daha yakın sonuçlar vermektedir. Bir çok uygulama alanı için tercih edilen bir test metodudur. Şekil 5.14’de görüleceği deney numunesinin bir ucu sabit diğer ucu ise eksantrik hareket yapan bir kola bağlanarak değişken yükleme yapılır. Bu sistemin numune yelpazesi daha geniş olduğundan döner eğmeli yorulma cihazlarına göre daha kullanışlıdır. Ayrıca numunelerde her hangi bir yüzey işlemine gerek yoktur, servis şartlarındaki halleriyle teste tabi tutulabilirler. Bu düzenekler yükten ziyade şekil değişimi prensibine göre hareket ederler [47].



Şekil 5.14 Tekrarlanan Eğilme Deney Düzeneğinin Şematik Gösterimi [48].

5.7.3 Dört Noktadan Eğilmeli Yorulma Deney Düzeneği



Şekil 5.15 Dört noktadan eğilmeli yorulma deneyinin şematik gösterimi [49].

Sabit genlikli ve bilgisayar kontrollü bir testtir. Yükleme frekansı 30 Hz ve minimum yükün maksimum yüke oranı ($R_{\text{alt}}/\sigma_{\text{üst}}$) 0,1 olarak test yapılmaktadır. Maximum gerilme numunenin alt yüzeyinde oluşur ve şu formüle göre hesaplanır;

$$\sigma_{üst} = a \times P / (b \times h^2)$$

a: Yükleme noktasının mesnetten uzaklığı,

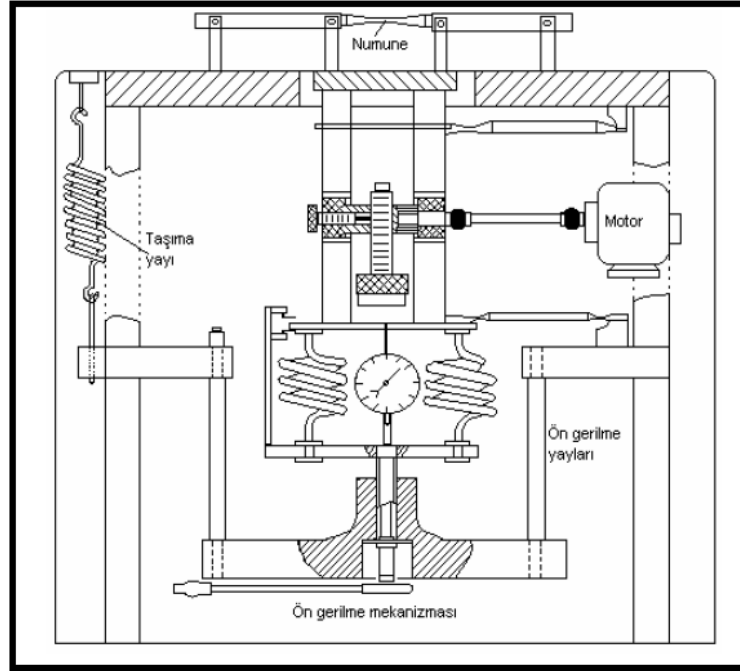
b: Numune genişliği,

h: Numune kalınlığı,

P; Uygulanan yükü ifade eder [49].

5.7.4 Mekanik Osilatör

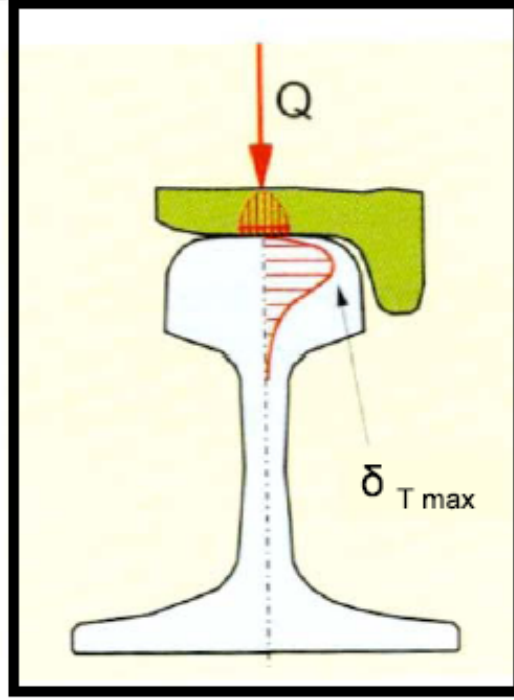
Eksantrik dönem bir kütlenin neden olduğu santirfuj kuvvetle, mekanik osilatörü taşıyan bir platform yardımıyla, yükleme yapılır. Numune sabit bir dayanağa monte edilir. Numuneye bir ön gerilme verilerek sabit ve alternatif yüklerin kombinasyonları uygulanabilir. Gerekli ekipmanlarla birlikte numuneler tekrarlı eğilme, eksenel yükleme, burulma ve bunların kombinasyonları şeklinde zorlanabilir [47].



Şekil 5.16 Düzlemsel eğme gerilmesi uygulayan “Sonntag” modeli yorulma deneyi cihazı seması [43].

TREN RAYLARINDA YORULMA

Tren raylarının en büyük düşmanları aşınma ve yuvarlanma temas yorulmasıdır. Yuvarlanma temas yorulması, tren tekerleklerinin raylarda sebep olduğu bir yorulma şeklidir. Ray üzerinde dönerek ilerleyen tren tekeri ve ray arasında, Şekil 6.1’de görüldüğü gibi, eliptik bir temas alanında yüksek yüzey gerilmelerine sebep olur. Oluşan çekme yükü, dikey gerilmelerle birlikte sırayla teker temas bölgesinin ve yürüme yüzeyinin altında lokal olarak enine gerilme de üretir. Bu gerilmeler malzemenin akma noktasını geçere doğal olarak plastik deformasyona sebep olur. ray üzerinde tekrarlanan plastik deformasyonlar sıkışmış kalıntı yüklere sebep olur. Plastik deformasyon yüzeyde deformasyon sertleşmesine ve bölgesel olarak akma mukavemetinin artmasına sebep olur. Neticede; ray kendi elastikiyeti vasıtasıyla bu gerilmeleri absorbe eder. Bu rayların temas bölgesindeki gerilmelere karşı hazırlık evresidir. Ray üzerine etkiyen söz konusu gerilmeler tekrarlı yüklerdir ve çevrim sayıları arttıkça ray yüzeyinde çatlaklar oluşmaya başlar. Bu da yorulma olayının hasar oluşturması için yeterlidir [33].



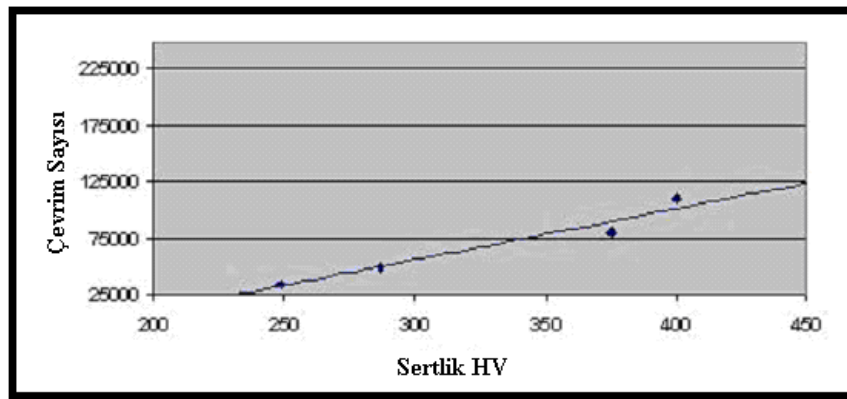
Şekil 6.1 Ray mantarı kesitinde gerilme dağılımı [50].

Ray çeliklerinin bu tip problemlerle karşılaşmaması için aşınmaya karşı dayanıklı olmaları gerekmektedir. Bunun yanında raylarda çatlak oluşumu önlenemiyorsa çatlakların yavaş ilerlemesi sağlanmalı yani yorulma direnci kazandırılmalıdır. Ekseriyetle raylarda ve tren tekerleklerinde kullanılan çelikler aşınmaya karşı mukavim olan perlitik malzemelerden seçilirler. Raylarda yuvarlanma temas yorulması sonucu hasar 6.2’de görülmektedir [33].



Şekil 6.2 Ray mantarında yorulma hasarı [51].

Raylarda yuvarlanma temas yorulmasına karşı uygulanabilecek işlemlerden biri de mantar sertleştirme prosesidir. Bu proses sayesinde raylar hem aşınmaya hem de yuvarlanma temas yorulmasına karşı direnç kazanırlar. R260 kalite olarak belirtilen ve günümüzde yaygın olarak kullanılan raylara mantar sertleştirme prosesi uygulanmasıyla R350HT olarak bilinen raylar elde edilir. Yapılan bu ısıtma işlemi sayesinde rayların aşınma miktarlarında gözle görülür bir düşüş meydana gelir. Şekil 6.3’de görüldüğü gibi ray yüzeyinde sertlik artışı aşınmanın yanda yuvarlanma temas yorulmasına karşı da mukavemet kazandırıyor. Yüzeyde artan sertlik değeri ile birlikte yuvarlanma temas yorulmasının başlaması için gereken çevrim sayısı da artıyor [20].



Şekil 6.3 Ray mantarında sertliğin yuvarlanma temas yorulmasının başlangıcına etkisi [20].

Rayların yuvarlanma temas yorulması sonucu hasar görmesine sebep olabilecek faktörler şu şekildedir;

- Viraj (kurp) yarıçapı
- Eğim
- Taşıdığı tonaj
- Sürüş dinamikleri
- Aks yükleri
- Hız
- Yağlama
- Ezme
- Sürtünme

Bunlardan virajların yarıçapını azalması, diğer faktörlerin ise artması rayların hasar görme ihtimallerini artırır [30].

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmanın amacı; R 260 kalite raylara, farklı soğutma süreleriyle, mantar sertleştirme ısıtma işlemi uygulayarak yorulma davranışlarını ve diğer mekanik özelliklerini mukayese etmektir. Deneysel çalışmalar için mantar sertleştirme düzeneği geliştirilmiştir. Bu düzeneğe sayesinde farklı sürelerde hava+su karışımı tatbik edilerek farklı mikroyapı ve mekanik özelliklerde ray numuneleri elde edilmesi hedeflenmiştir. Isıtma işlemin ardından ilgili standart uyarınca mikroyapı karakterizasyonu, sertlik taraması ve çekme testleri yapılmıştır. Çekme testinden elde edilen verilere göre yorulma testleri için yükler belirlenmiş ve yorulma testleri yapılmıştır.

7.1 Raylara Uygulanan Isıtma İşlemleri

120 mm uzunluktaki 30 adet ray numunesinden 20 tanesine ısıtma işlemi uygulanmıştır. Ray numuneleri, Şekil 7.1’de görülen ısıtma işlem fırınında, 885⁰C’de 50 dakika bekletilerek östenit sahasına çıkarılmıştır. (çeliğin ısıtma işlemi) Ardından 10 tanesi 20 saniye, 10 tanesi de 40 saniye olmak üzere, özel olarak imal edilen Şekil 7.2’deki düzeneğe, hava+su karışımı ile soğutulmuştur. Soğutma için kullanılan su şebeke hattından karşılanmıştır. Hava ise kompresör vasıtasıyla 5 bar olarak uygulanmıştır. Suyun eşit miktarda dağıtılması için 6’lı kolektör kullanılmıştır. Kolektörün her bir çıkışına hava hortumları bağlanarak hava+su karışımı oluşturulmuş ve nozullara verilmiştir. Hava+su tatbik edildiğinde her bir nozuldaki su debisi 2,3 lt/dk’dır.



Şekil 7.1 Optimal marka ısıtma fırını



Şekil 7.2 Su verme düzeneği

Isıl işlem yapılan ray numunelerinde, su verme öncesinde ve su verme sonrasında 20 dakika boyunca yüzeyden sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Bu sayede numunelerin soğuma hızları ve bu hızlara göre oluşabilecek mikroyapılar hakkında bilgi edinilmiştir.

7.2 Sertlik Ölçümleri

Isıl işlemli ve ısıtma işlemli ray numunelerinin kesitlerinden Şekil 7.3'te gösterildiği sertlik taramaları yapılmıştır. Standarda uygun olarak 15 saniye süreyle ve 1,839 kN yük altında sertlik taramalarının yapıldığı Zwick/Roell marka sertlik cihazı Şekil 7.4'te görülmektedir.



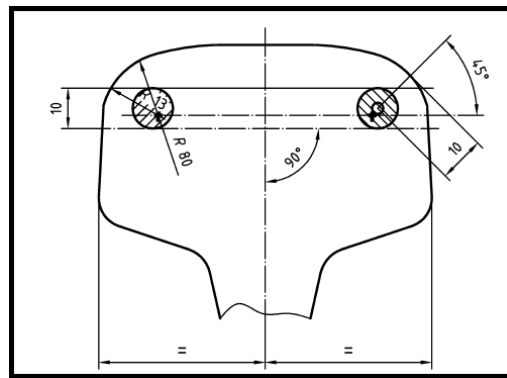
Şekil 7.5 Struers Tegrapol 21 Tegraforce 5 marka otomatik parlatma cihazı



Şekil 7.6 Nikon Eclipse MA 200 model optik mikroskop

7.4 Çekme Deneyleri

Çekme testi için kullanılacak numuneler Şekil 7.7’de görüldüğü gibi standarda uygun bölgelerden çıkartılmıştır. Şekil 7.8’deki teknik resme göre işlenen numuneler 1200 kN kapasiteli Zwick/Roell marka çekme cihazında test edilmiştir.



Şekil 7.7 TS EN 13674 standardına göre çekme testi için numune alınacak bölgeler [8].

Yorulma testleri ISO 1143 dönel eğmeli yorulma standardına göre dört noktalı yükleme (four-point bending) yöntemiyle yapılacaktır. Yorulma deneyleri için imal edilen dönel eğmeli yorulma cihazı Şekil 7.11’de görülmektedir.



Şekil 7.11 Dönel eğmeli yorulma cihazı

Yorulma deneyi sonucunda her bir numunenin hangi yükte ne kadar çevrim yaptığı kaydedilerek yorulma mukavemetleri hakkında bilgiler edilmiştir. Yapılacak yüklemelerin belirlenmesi için çekme eğrilerinden yola çıkılarak hesaplamalar yapılmıştır. Gerilmeden kuvvete geçmek için ISO 1143 standardında verilen formül kullanılmıştır [46].

$$F = (S \times \pi \times d^3) / 32 \times L$$

Bu bilgiler ışığında yapılan ısıtma işlemlerin ray numunelerinin yorulma davranışlarını nasıl etkilediği anlaşılabacaktır.

BÖLÜM 8

DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

Deneyisel çalışmalarda kullanılan ray numuneleri R260 kalite raylardan kesilmiştir. EN 13674 standardına göre R60 kalite ray çeliklerinin kimyasal kompozisyonu çizelge 8.1’de verilmiştir.

Çizelge 8.1 Deneylerde kullanılan R260 kalite ray numunelerine ait kimyasal kompozisyon [8].

%						10 ⁻⁴ ppm %	
C	Mn	Si	P	Al	N	H	O
0,60/0,82	0,65/1,25	0,13/0,60	0,030	0,004	0,010	2,5	20

8.1 Isıl İşlemlerin Sıcaklık-Zaman-Dönüşüm (TTT) Diyagramında İncelenmesi

Ray numuneleri 885⁰C’de 50 dakika bekletilip kontrollü olarak soğutulduktan sonra yüzeylerindeki sıcaklık değişimleri kaydedilmiştir. Çizelge 8.2’de 20 saniye su verme işlemi uygulanan, çizelge 8.3’te de 40 saniye su verme uygulanan rayların zamanla sıcaklık değişimleri verilmiştir.

Çizelge 8.2 20 saniye su verme işlemi uygulanan ray numunelerine ait sıcaklık değişimleri.

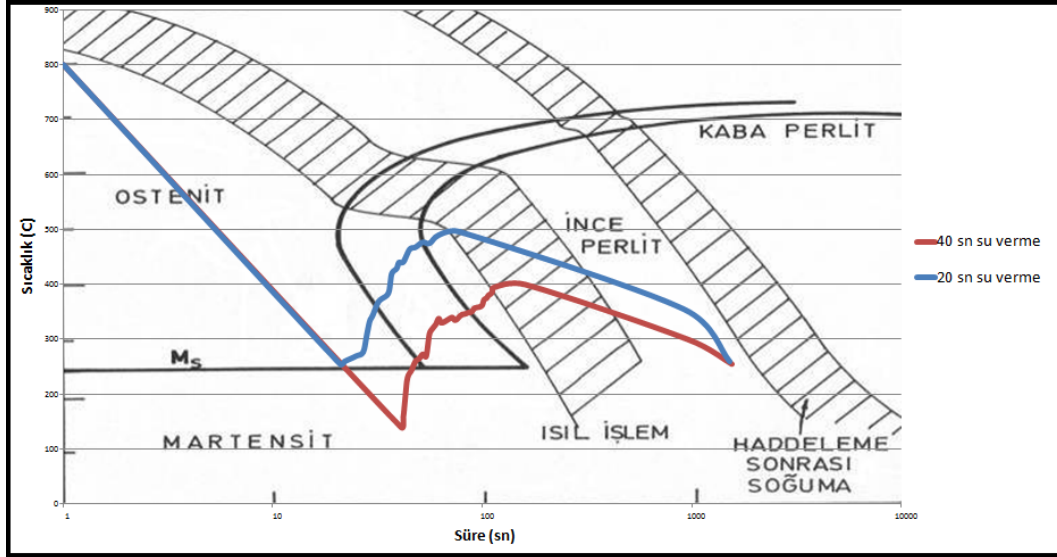
Ölçüm Zamanı (sn)	Ray Numunelerinin Yüzey Sıcaklıkları ($^{\circ}\text{C}$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	795	790	780	800	792	770	790	781	800	792
21	277	270	255	250	247	260	234	234	239	250
60	470	480	465	470	477	467	478	471	468	481
90	530	515	509	505	520	514	505	532	521	516
120	520	522	506	501	525	512	523	531	510	526
921	310	330	355	300	350	300	350	267	367	315
1521	230	230	260	260	230	250	260	220	257	248

Çizelge 8.3 40 saniye su verme işlemi uygulanan ray numunelerine ait sıcaklık değişimleri.

Ölçüm Zamanı (sn)	Ray Numunelerinin Yüzey Sıcaklıkları ($^{\circ}\text{C}$)									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	795	793	790	795	797	797	780	788	798	795
41	137	140	148	137	165	170	131	140	154	137
80	321	330	333	321	300	311	340	337	300	321
110	359	345	350	359	360	364	360	366	335	359
140	367	370	368	367	365	380	383	380	368	367
941	274	300	270	274	289	251	292	241	272	274
1541	217	255	214	217	230	200	222	194	200	217

Bu sıcaklık değişimleri sıcaklık-zaman-dönüşüm (TTT) diyagramı üzerinde incelendiğinde 20 saniye su verme uygulanan ray numunelerinde sıkı dizili perlit oluşma ihtimalinin yüksek olduğu görülmektedir. 40 saniye su verilen numunelerde ise kısmen martenzit bulunabilir.

20 saniye ve 40 saniye su verme süreleri için ortalama değerler Şekil 8.1’de görülmektedir.

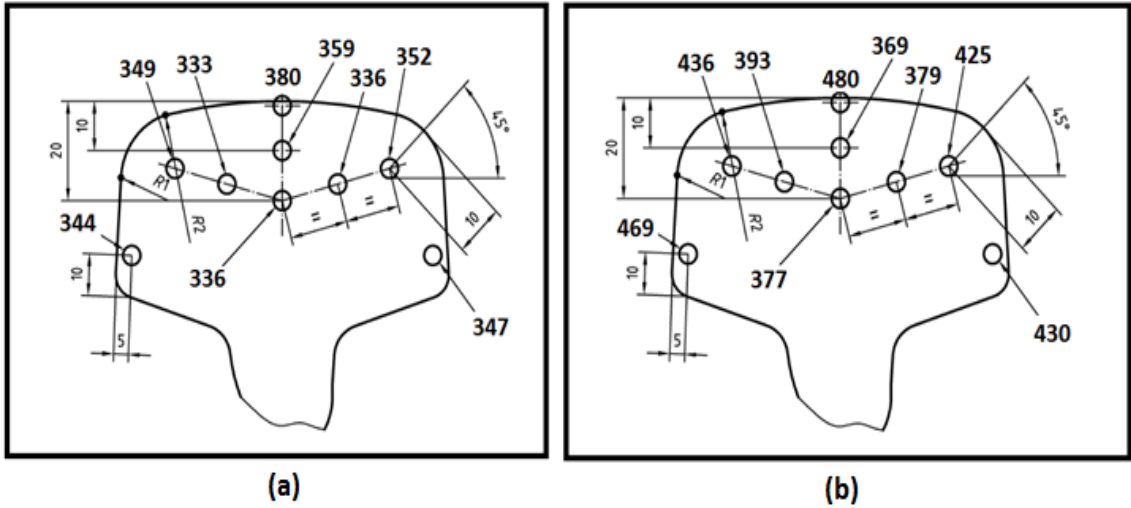


Şekil 8.1 Mantar sertleştirme işlemi yapılan raylarda 20 saniye ve 40 saniye su verme süreleri için TTT diyagramı üzerinde verilen ortalama soğuma eğrileri.

20 saniye hava+su karışımına maruz kalan numuneler martenzit bölgesine girmeden tekrar ısınmaya başlamıştır. Bu sayede yapılarında martenzit bulundurmazlar, sıkı dizili perlit yapısına kavuşurlar. 40 saniye hava+su karışımına maruz kalan ray numuneleri ise ani soğuma esnasında martenzit bölgesine girmişlerdir. Sonradan malzemenin sıcak olan kısımları sayesinde malzeme ısınmış olsa da bünyesinde martenzit bulunabilir. Soğuma eğrileri mikroyapılarla birlikte ele alındığında daha net sonuçlar verecektir.

8.2 Mantar Kesitlerinde Yapılan Sertlik Ölçümleri

Çalışmalar kapsamında kullanılan R260 kalite rayın sertlik değeri 260-290 HB aralığındadır. Ray kesitinde sertlik ölçümü yapılacak yerler ve hangi ray tipi için nerelerden ölçüm alınması gerektiği EN 13674 standardında belirtilmiştir. Rayların mantar kesitlerinde sertlik değerlerinin alınması gereken yerler Şekil 8.2’de gösterilmiştir.



Şekil 8.3 (a) 20 saniye, (b) 40 saniye hava+su karışımı ile soğutulularak elde edilen ray numunesinin bölgelere göre sertlik değerleri.

8.3 Mikroyapı Çalışmaları

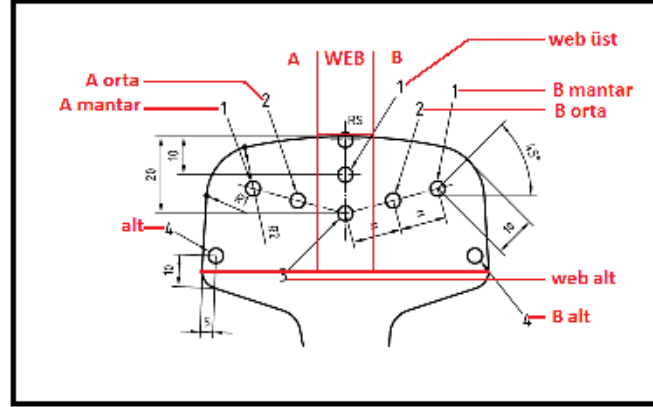
Deneysel çalışmalarda kullanılacak R260 malzemelere ait 500X büyütmedeki mikroyapı resmi Şekil 8.4’de görülmektedir. perlitik yapıda olan bu ray haddelemenin ardından normal soğuma şartlarında beklediği için kaba perlitik yapıya sahiptir. Ray üzerinde RS bölgesine yakın bir noktadan alınan mikroyapı resminde de kaba perlitik yapı gayet net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 8.4 R260 kalite ray çeliğine ait RS bölgesinden 500X büyütmede mikroyapı resmi.

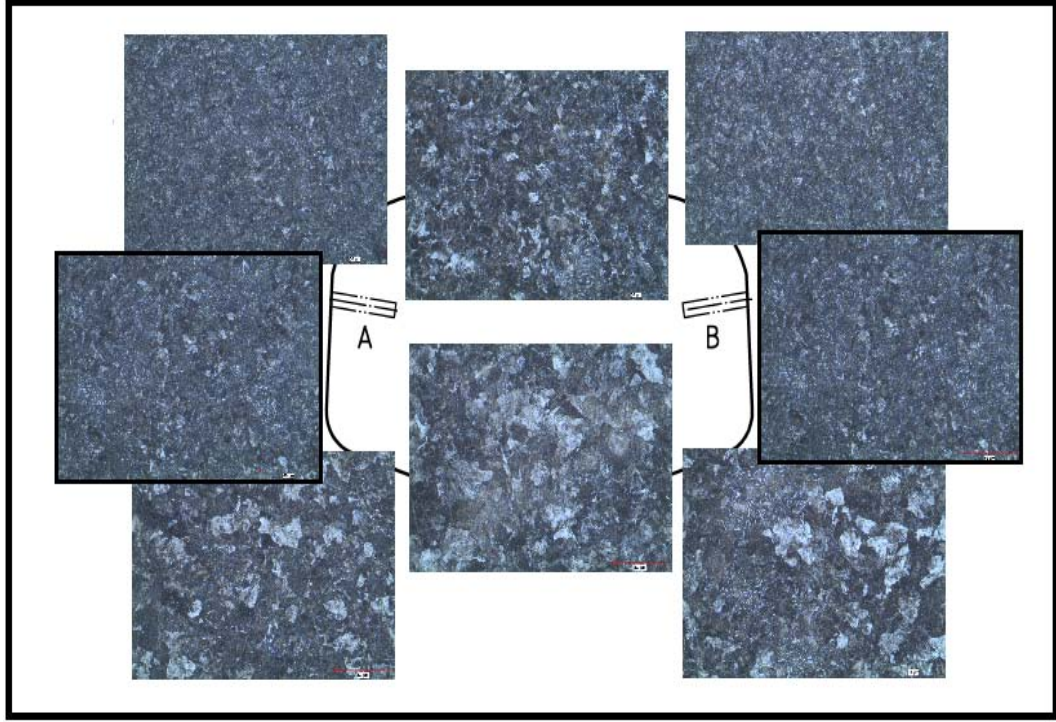
880°C’de östenitlenen raylarda yüzeyden 30-100 µm aralığında dekerbürüzyon olduğu bilinmektedir. EN 13674-1 standardına göre ray malzemesinde 250 µm’ye kadar dekerbürüzyon tabakası kabul edilmektedir [13].

Mikroyapı çalışmaları, sertlik ölçümleri yapılan bölgelere yakın yerlerde yapılmış ve sertlik değerleri ile aralarında bağlantı kurulmuştur. Şekil 8.5’da ray kesitinde mikroyapı alınan bölgelerin isimleri verilmiştir.



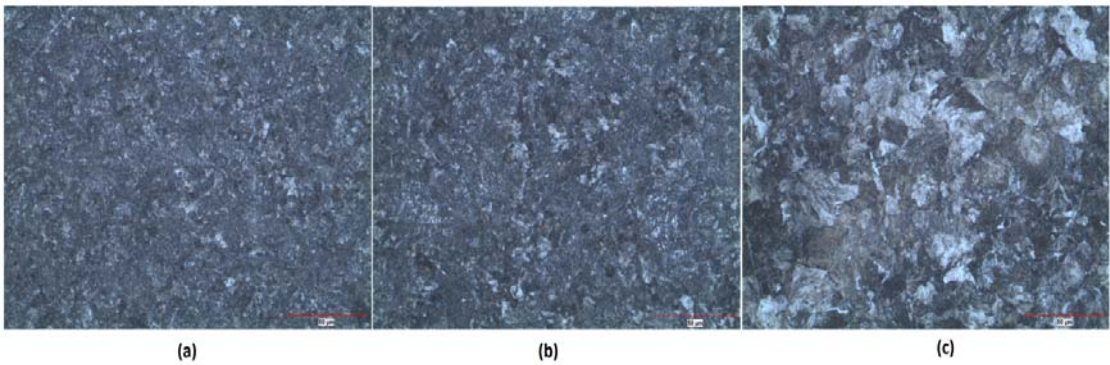
Şekil 8.5 Mikroyapı resmi alınan bölgelerin mantar kesitindeki yerleri.

20 saniye süreyle soğutularak mantar sertleştirme işlemi yapılan ray numunesine ait mikroyapı resimleri Şekil 8.7’de görülmektedir. Mantar kesiti boyunca farklı bölgelerde farklı mikroyapılar olmasının sebebi, rayın sadece mantar kısmına hava+su tatbik edilmesidir. Bu sebeple mantarın yüzeye yakın bölgeleri ve özellikle A üst, Aorta, B üst B orta bölgeleri daha ince bir yapıya sahiptir. A alt, B alt ve WEB bölgeleri ise gerek daha içerde olmaları gerekse rayın ayak ve direk kısımlarından da ısı almaları sebebiyle daha kaba bir görünüme sahiptir. Ölçülen sertlik değerleri ile de karşılaştırıldığında bu tablo gayet makuldür. Genel olarak perlitik bir yapı sergileyen ray mantarı yüzeylerde daha sıkı içeriye doğru kabalaşan bir mikroyapı dağılımı göstermiştir. Şekil 8.6’deki mikroyapı dağılım ölçülen sertlik değerleri ve elde edilen soğuma eğrileri ile birlikte değerlendirilirse; 20 saniye süreyle hava+su karışımı kullanılarak mantar sertleştirme işlemi yapılan rayların R350 HT kalite rayın özelliklerini sağladığını göstermektedir.



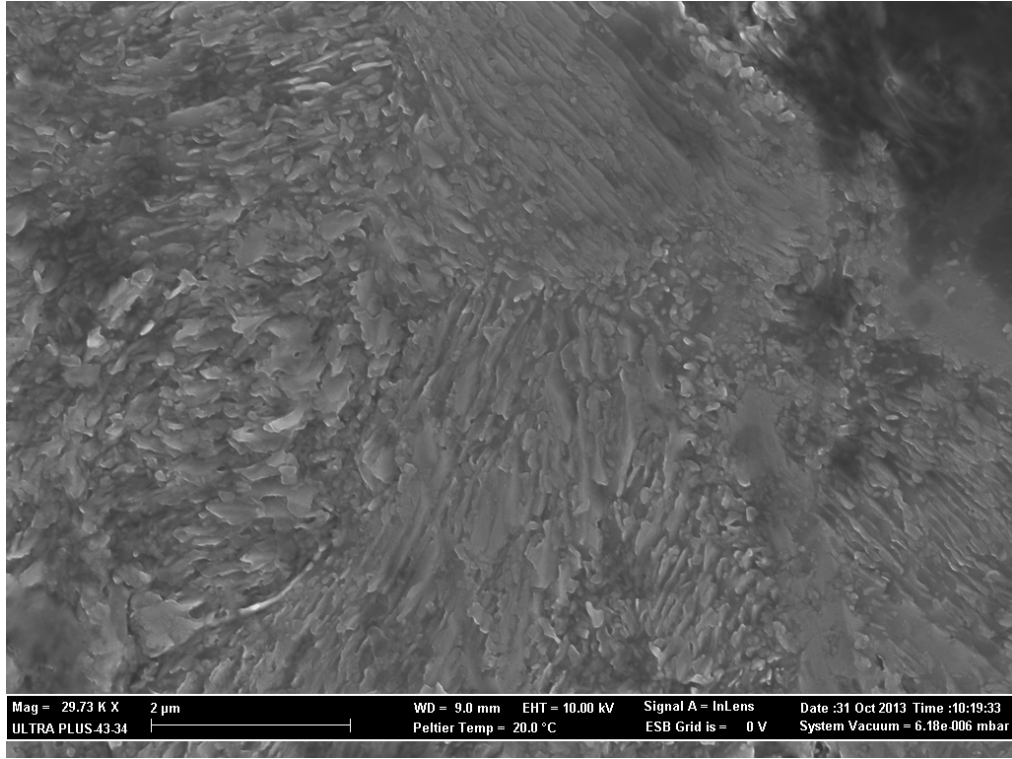
Şekil 8.6 20 saniye süreyle soğutulan ray numunesinin mantar kesitinde mikroyapı dağılımı.

Ray mantarının yüzeye yakın ve çekirdeğe yakın bölgelerdeki mikroyapı değişimini daha net görebilmek için Şekil 8.7’de bulunan mikroyapıları incelememiz gerekir. Burada WEB bölgesinin orta kısmından alınan mikroyapının en kaba mikroyapı olduğu görülmektedir. Buna sebep olarak buranın en yavaş soğuma hızına sahip olması gösterilebilir. Ray mantarının merkezi olan bu bölge ısıtılma uygulanan bölgeler arasında en yavaş soğuyan bölgedir.



Şekil 8.7 (a) A üst, (b) A orta, (c) WEB orta bölgelerine ait 500 X büyütmede alınmış mikroyapı resimleri.

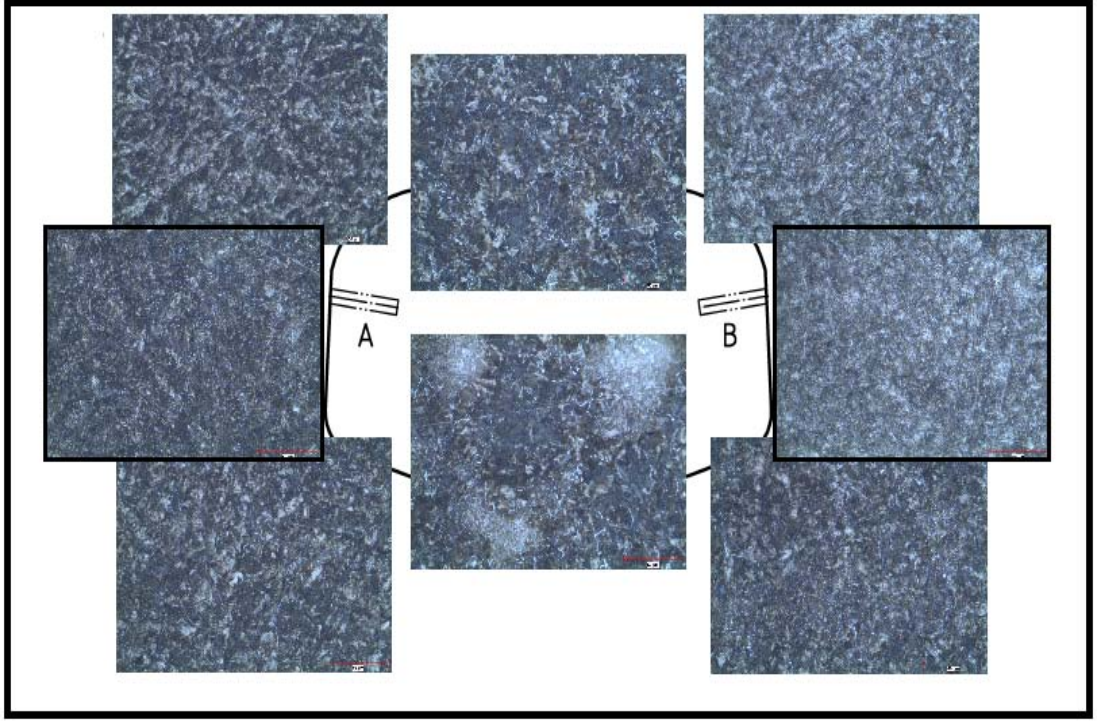
Şekil 8.8’de 20 saniye süreyle soğutulan rayın mantar kesitinde SEM görüntüsü verilmektedir. Bu görüntüden de anlaşılaçağı gibi 20 saniye soğutma süresi mantarda ince perlit adı verilen yapının oluşmasını sağlamıştır.



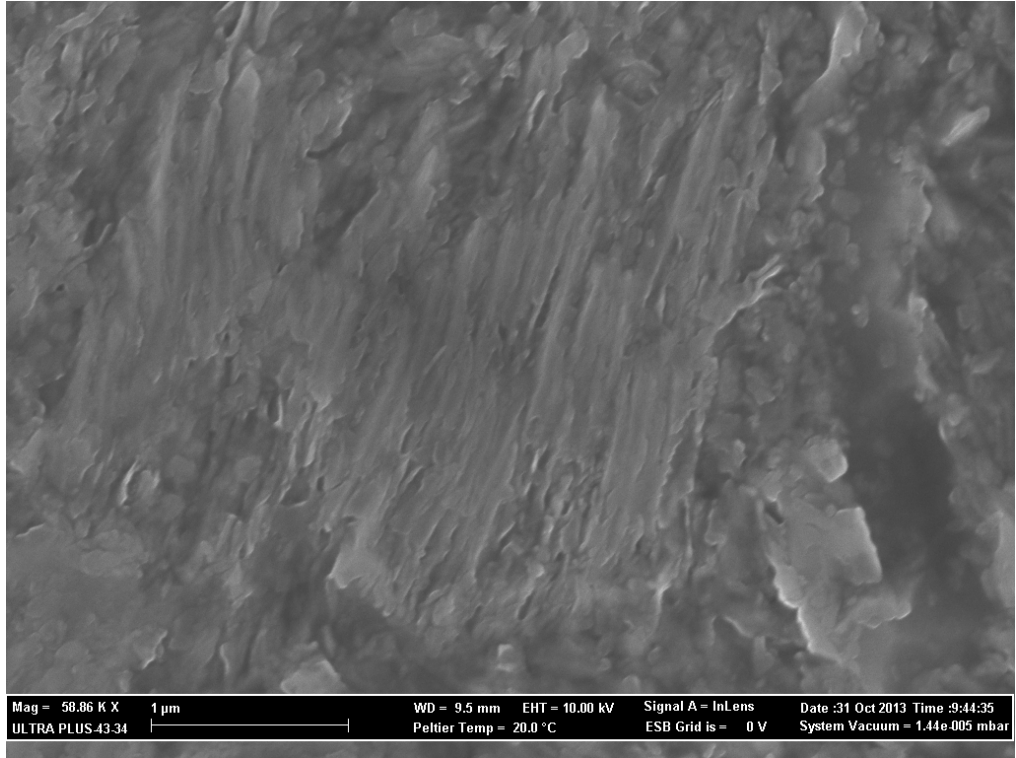
Şekil 8.8 20 saniye süreyle soğutulmuş ray numunesinin mantar kesitinden SEM görünüşü.

40 saniye süreyle soğutularak mantar sertleştirme işlemi yapılan ray numunesine ait mikroyapı resimleri Şekil 8.9’da görülmektedir. Mantar kesiti boyunca farklı tane boyutları göze çarpıyor. Fakat, 20 saniye soğutulan ray kadar belirgin değil. Buna sebep olan etken ise 40 saniye hava+su karışımına maruz kalmasıdır. Rayın tüm kesiti genel olarak ani soğuma etkisine maruz kalmış durumda. Soğuma süresinin uzun olması rayın mantar haricindeki parçalarının da sıcaklıklarının düşmesine sebep olmuştur.

Sertlik taramaları ve soğuma eğrisi de dikkate alındığında, 20 saniye süreyle soğutulan raylarda ki gibi tanelerin kabalaşmasına izin verecek bir durum olmadığı görülüyor. Bu sebeple rayın kesiti genel olarak ince taneli bir yapı görünümünde. Soğuma eğrisi de incelendiğinde mantarın ilk soğuma esnasında martenzit bölgesine girdiği görülüyor. Sonrasında meydana gelen ısı artışı da mikroyapıda çok büyük bir etki oluşturmamıştır. Dolayısıyla yapıda martenzit olması da muhtemeldir. Fakat, Şekil 8.10’da görüleceğı gibi yapının geneli beynitik bir mikroyapıya sahiptir. Sadece WEB bölgesi diğer bölgelere göre nispeten daha kaba bir yapıya sahiptir.



Şekil 8.9 40 saniye süreyle soğutulan ray numunesinin mantar kesitinde mikroyapı dağılımı.

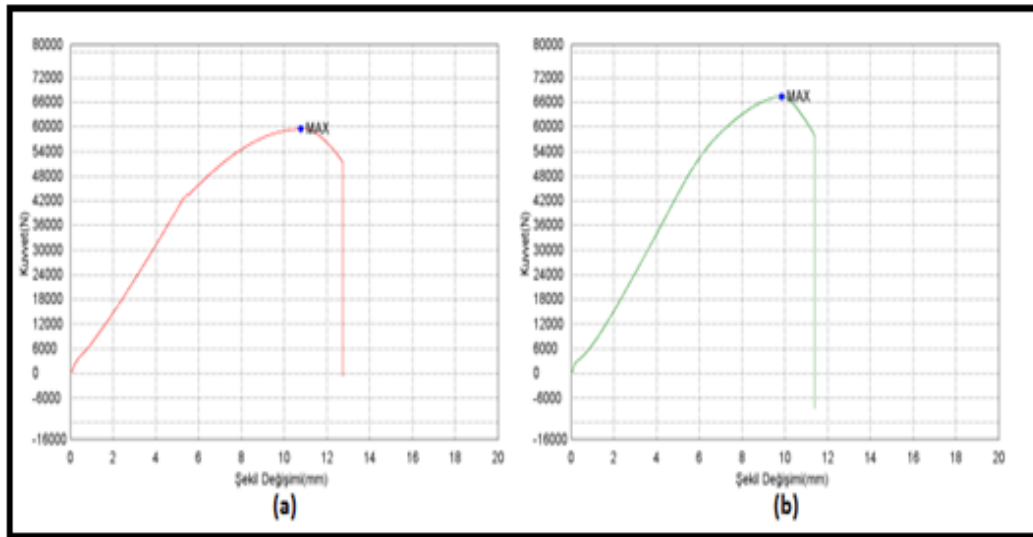


Şekil 8.10 40 saniye süreyle soğutulan ray numunesinin mantar kesitinden SEM görüntüsü.

Yapılan mikroyapı taramaları, sertlik taramalarıyla beraber değerlendirildiğinde 20 saniye süreyle hava+su karışımı (sprey) ile mantar sertleştirme işlemi yapılan rayların R350HT kalite ray çeliklerine daha yakın olduğunu gösteriyor. 40 saniye süreyle yapılan işlem sonucunda ise çok daha sert, daha ince mikroyapıya sahip ve içinde martenzit olması muhtemel bir kesit elde edilmiştir. Yüzey, 20 saniye soğutulan raylarla benzer olarak, iç kesimlere göre daha ince bir dağılım göstermiştir. Fakat, aradaki fark 20 saniye işlem gören raylar gibi bariz bir şekilde görülmemektedir.

8.4 Çekme Deneyi

En 13674 standardına göre, belirtilen yerlerden alınan numuneler çekme testine tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmalara başlangıç malzemesi olarak kullanılan R260 kalite ray çeliklerinin çekme mukavemeti 880 MPa ve kopma anındaki uzaması %10'dur. Isıl işlemleri yapılan malzemelerin çekme testi sonuçları Şekil 8.11'de görülmektedir.



Şekil 8.11 (a) 20 saniye, (b) 40 saniye süreyle mantar sertleştirme işlemi yapılmış malzemelerin çekme testi grafikleri.

Beklendiği gibi 20 saniye süreyle soğutulan ray numunesinin maksimum çekme mukavemeti 40 saniyedekine göre daha düşüktür. Fakat; daha yüksek akma ve çekme mukavemeti beraberinde daha az kopma uzaması yani nispeten gevreklik getirmiştir. Numunelerin çekme testi sonuçları çizelge 8.5'de görülmektedir.

Çizelge 8.5 Ray numunelerinin çekme testi sonuçları.

Soğutma Süresi (sn)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kopma Uzaması (%)
20	855	1189	13
40	954	1339	11

8.5 Yorulma Deneyi

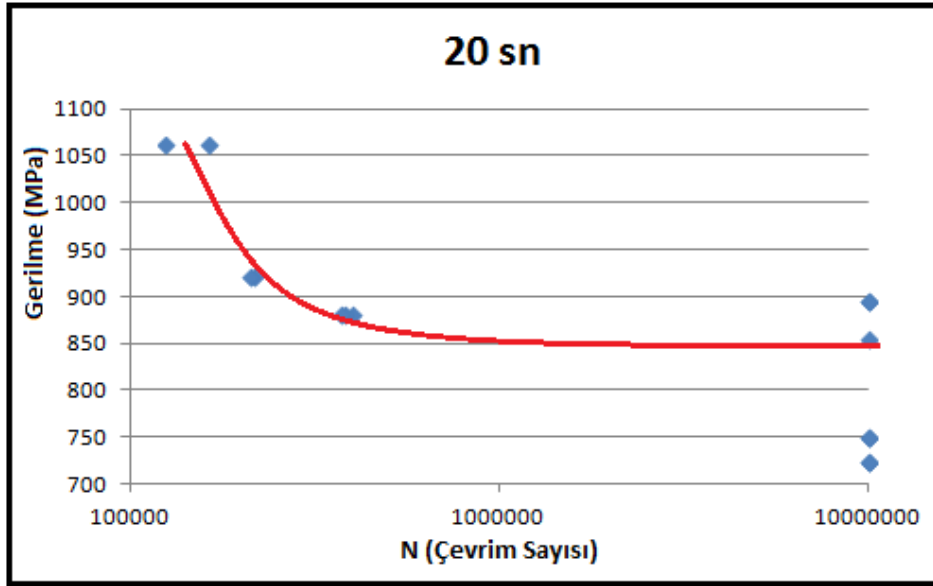
Yorulma testleri “ISO 1143 Metalic Materials – Rotating Bar Bending Fatigue Testing” standardına göre dört noktadan yükleme (four – point bending) şeklinde yapılmıştır. Test esnasında yapılan yüklemeler çekme testlerine göre belirlenmiş ve akma sınırının altında çalışılmıştır. Yorulma deneyleri üç grup olarak yapılmıştır. 20 saniye ve 40 saniye süreyle hava+su karışımı ile soğutulanlar ve orijinal numuneler olarak gruplanmıştır.

20 saniye süreyle soğutulan rayların çekme grafiklerinden alınan gerilme değerleri Newton cinsinden yük olarak hesaplanmış ve yorulma makinesine ona göre yükleme yapılmıştır. Testlerde gerilme değerlerine göre çevrim sayıları Çizelge 8.6’dadır.

Çizelge 8.6 20 saniye süreyle soğutulan raylara ait yorulma testi sonucunda yüklemelere göre çevrim sayıları.

Gerilme (MPa)	Çevrim Sayısı (N)
1062	124800
1062	163450
922	217130
922	210000
896	1000000
896	1000000
882	400000
882	380000
882	370000
856	1000000
724	1000000
724	1000000
750	1000000
750	1000000

Çizelge 8.6’da gösterilen değerler Wöhler eğrisi olarak Şekil 8.12’da gösterilmiştir. elde edilen Wöhler eğrinse göre 20 saniye süreyle soğutulan rayların yorulma dayanımı yaklaşık olarak 850 MPa civarındadır.



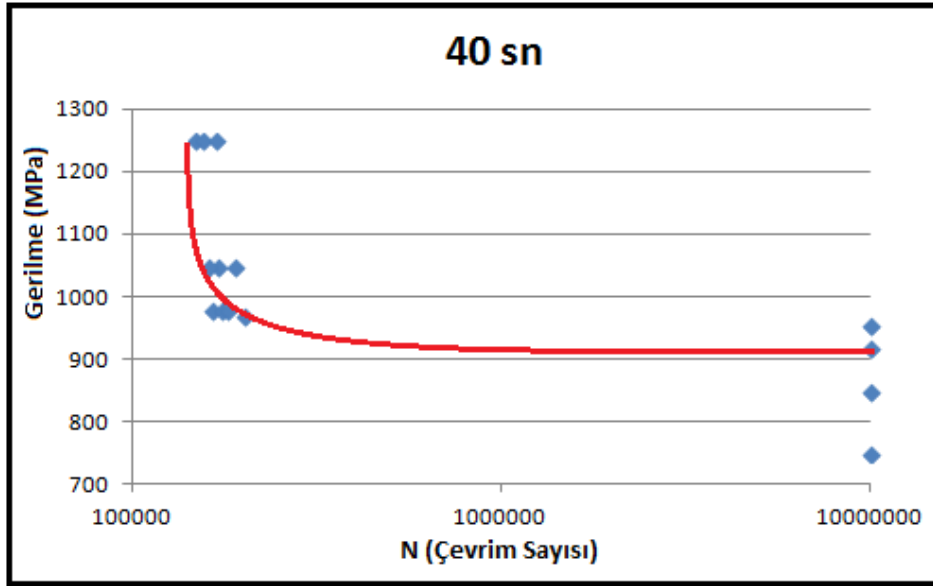
Şekil 8.12 20 saniye süreyle soğutulan raylara ait Wöhler eğrisi.

40 saniye süreyle soğutulan rayların çekme grafiklerinden alınan gerilme değerleri Newton cinsinden yük olarak hesaplanmış ve yorulma makinesine ona göre yükleme yapılmıştır. Testlerde gerilme değerlerine göre çevrim sayıları Çizelge 8.7’dir.

Çizelge 8.7 40 saniye süreyle soğutulan raylara ait yorulma testi sonucunda yüklemelere göre çevrim sayıları.

Gerilme (MPa)	Çevrim Sayısı (N)
1250	148400
1250	155000
1250	168000
1050	190000
1050	170000
1050	160000
980	165000
980	175000
980	180000
970	200000
955	10000000
920	10000000
850	10000000
750	10000000

Çizelge 8.7’da gösterilen değerler Wöhler eğrisi olarak Şekil 8.13’da gösterilmiştir. elde edilen Wöhler eğrinse göre 40 saniye süreyle soğutulan rayların yorulma dayanımı yaklaşık olarak 900 MPa civarındadır.



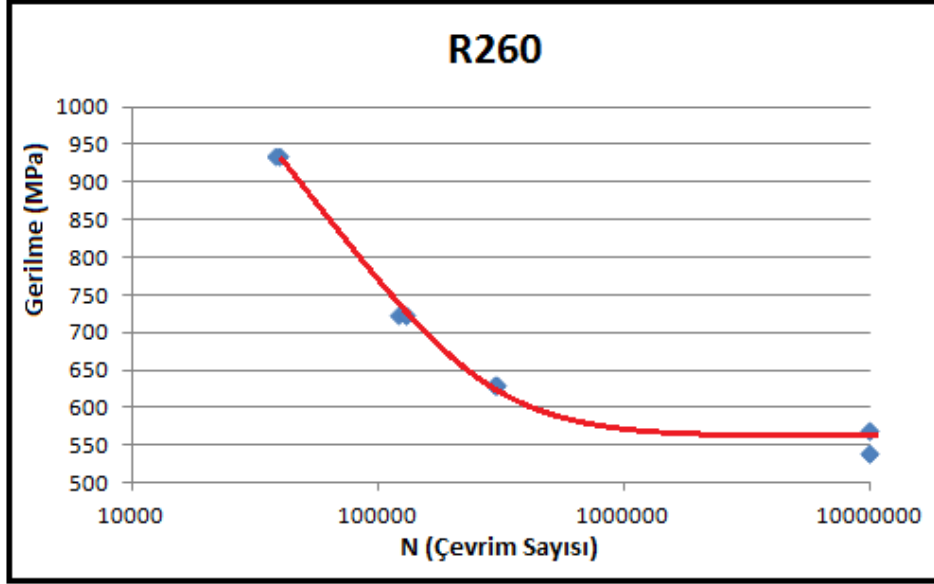
Şekil 8.13 40 saniye süreyle soğutulan raylara ait Wöhler eğrisi.

Mantar sertleştirme işlemi yapılmayan rayların çekme grafiklerinden alınan gerilme değerleri Newton cinsinden yük olarak hesaplanmış ve yorulma makinesine ona göre yükleme yapılmıştır. Testlerde gerilme değerlerine göre çevrim sayıları Çizelge 8.6'dadır.

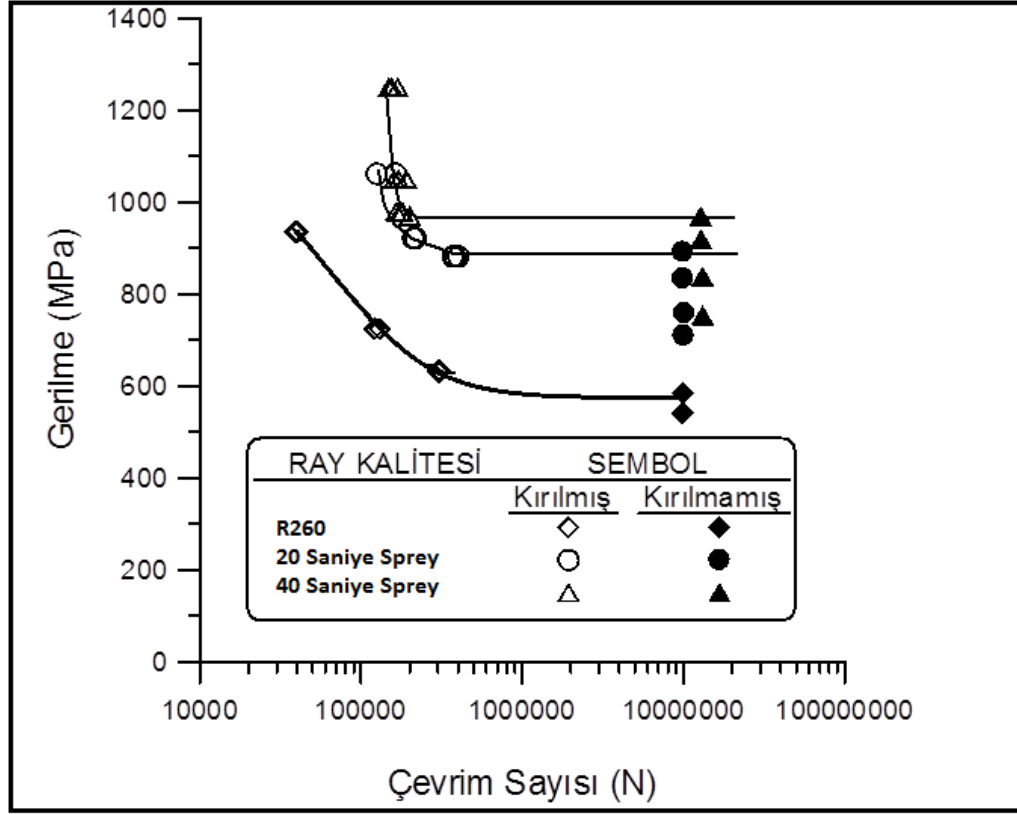
Çizelge 8.8 Isıl işlem yapılmayan raylara ait yorulma testi sonucunda yüklemelere göre çevrim sayıları.

Gerilme (MPa)	Çevrim Sayısı (N)
935	39370
935	38660
724	129900
724	121040
724	130200
632	303160
632	299030
632	306460
632	300010
570	10000000
570	10000000
540	10000000
540	10000000

Çizelge 8.8’de gösterilen değerler wöhler eğrisi olarak Şekil 8.14’de gösterilmiştir.elde edilen wöhler eğrinse göre ısıt işlem uygulanmayan (R260) rayların yorulma dayanımı yaklaşık olarak 570 MPa civarındadır.



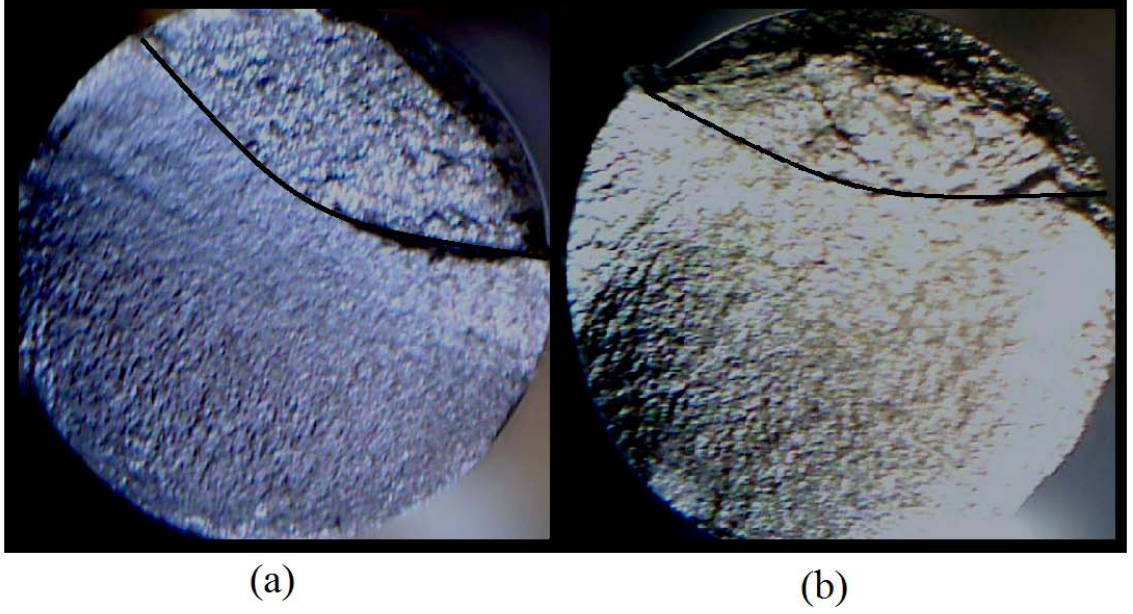
Şekil 8.14 Isıl işlem yapılmayan raylara ait Wöhler eğrisi.



Şekil 8.15 Yorulma testlerinde kullanılan raylara ait Wöhler eğrileri.

Yorulma testleri kapsamında incelenen üç farklı kalite rayın Wöhler eğrilerinin karşılaştırması Şekil 8.15’de görülmektedir. bu karşılaştırmaya göre ısıtılmış işlem görmemiş olan R260 kalite rayların yorulma dayanımları diğerlerine göre hayli düşüktür. 20 saniye su verilmiş olan raylar ve 40 saniye su verilmiş rayların yorulma dayanımları arasında yaklaşık 50 MPa’lık bir fark vardır. 40 saniye süreyle su verilen rayların yorulma dayanımları daha yüksek fakat sertlik değerleri ve mikroyapı açısından standartları sağlayamamaktadır. Sıkı dizili perlit yapısında olan 20 saniye süreyle su verilmiş rayların yorulma dayanımı, sertlik değerleri ve mikroyapıları mantarı sertleştirilmiş rayın standartlarını daha çok sağlamaktadır.

Yorulma testleri sonucunda örnek olarak alınan iki adet numunenin kırılma yüzeyleri Şekil 8.16’da görülmektedir. Kırık yüzeyleri genel olarak birbirine benzer yapıdadır. Son kopma yüzeyleri genel alanın % 20-25’i civarındandır.



Şekil 8.16 1050 (a) ve 950 (b) MPa yüke maruz kalarak kırılan yorulma numunelerinin kırık yüzeyleri.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada mantarı sertleştirilmiş raylarda soğutma süresinin mikroyapı ve başta yorulma dayanımı olmak üzere mekanik özellikler üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu bağlamda laboratuvar ortamında R260 kalite raylardan 20 saniye ve 40 saniye sprej süreleriyle mantarı sertleştirilmiş raylar elde edilmiştir. Orijinal raylar ve ısıt işlem yapılan rayların kesitlerinde EN 13674 standardına göre mantar kesitlerinde yapılan sertlik taramaları yapılmıştır. 20 saniye soğutulan rayların sertlik değerleri R350 HT kalite rayların sınırları içerisinde olduğu saptanmıştır. 40 saniye süreyle soğutulan rayların ise hayli sert olduğu görülmüştür. Sertlik değerlerinin alındığı bölgelerde yapılan mikroyapı incelemelerine de sertlik taramalarını destekleyen sonuçlar elde edilmiştir. Isıt işlemsiz raylarda mikroyapılar genellikle birbirine yakın tane büyüklüğüne sahip, kaba perlitik yapıdan ibarettir. 20 saniye süreyle sprej işlemi uygulanan raylarda ise mikro yapı gene olarak incelenmiştir. Fakat, soğuma hızının yüksek olduğu yüzeye yakın bölgelerle çekirdeğe yakın bölgeler arasında belirgin bir fark saptanmıştır. Yüzeyde tane boyutu 10 mikronun altındayken WEB bölgesinde tane boyutu 20 mikron civarındadır. Şekil 8.9'a da baktığımızda, 20 saniye süreyle soğutmanın mantar kesitinde sıkı dizili perlit yapısını oluşturduğunu söyleyebiliriz. 40 saniye süreyle sprej işlemi uygulanan raylarda ise merkez ve yüzey arasında tane boyutu farkı son derece azdır. Mantar kesitinin genelinde tane boyutu 10 mikronun altındadır. Soğutma süresinin artmış olması malzemenin yüzeyinde ve merkezinde soğuma hızı birbirine yakın değerlere ulaştırmıştır. Bu da tane boyutunun tüm kesitte birbirine yakın değerlerde olmasını sağlamıştır. Bu soğuma süresi mantar kesitinde

standartlarda izin verilen değerlerin üzerinde martenzit oluşumuna sebep olabilir. fakat şekil 8.11’de de görüleceği gibi yapının geneli beynitiktir

R260 kalite raylarda çekme testi sonuçlarına göre maksimum mukavemet 880 MPa civarında ve % uzama miktarı % 10’dur. 20 saniye süreyle spre y işlemi uygulanan malzemelere maksimum mukavemet değeri 1185 MPa ve % uzama miktarı ise % 13 civarında gözlenmiştir. Çekme deneyi sonuçları da 20 saniye süreyle soğutulan rayların R350 HT kalite raylarla aynı özelliklerde olduğunu göstermiştir. 40 saniye süreyle spre y işlemi uygulanan raylarda ise maksimum mukavemet değeri 1330 MPa civarında ve seyrederken yaklaşık % 10 uzama göstermiştir. Bu sonuçlara bakılarak 40 saniye soğutma süresinin malzemenin daha gevrek davranmasına sebep olduğunu söyleyebiliriz.

Yorulma testlerinde beklenildiği gibi; ısııl işlem görmemiş olan R260 kalite raylar mantarı sertleştirilmiş olanlara göre daha az direnç göstermişlerdir. 20 saniye ve 40 saniye süreyle hava+su kullanılarak soğutulan raylar arasında ise çok bariz bir fark olmamakla birlikte soğutma süresinin artışı yorulma davranışını bir miktar artırmıştır. R260 kalte rayların yorulma dayanımları 570 MPa civarında görülürken, 20 saniye soğutma uygulanan raylar 850, 40 saniye soğutma uygulanan raylar da 900 MPa civarındadır.

Elde edilen sonuçlara bakıldığında mantar sertleştirme işleminin önemi ve gerekliliği tartışılmaz derecededir. Fakat burada bu işlemin ne kadar yapılacağı ne sonuçlar beklendiğine bağlıdır. 20 saniye süreyle yapılan işlem neticesinde R350 HT olarak bilinen sıkı dizili perlit yapıya sahip mantarı sertleştirilmiş raylarla aynı özellikte numuneler elde edilmiştir. Bu rayların mekanik testlerinin sonuçları da EN 13674 standardında belirtilen kriterlere uymaktadır. 40 saniye süreyle yapılan işlemde ise her yönden daha mukavim numuneler elde edilmiştir. Fakat bu numuneler herhangi bir standarda ya kullanılan bir rayın kriterlerine uymamaktadır. Dolayısıyla kullanılabilirliği meçhuldür.

KAYNAKLAR

- [1] Başkanuş, M., ve Tekin, E., (2012). “Hızlı Tren Olgusu, Mantarı Sertleştirilmiş ve Beynitli Ray Çelikleri”, International Iron and Steel Symposium, 02-04 Nisan 2012, Karabük.
- [2] TCDD, (2010). T.C. Devlet Demir Yolları İstatistik Yıllığı 2006-2010, Yayın No: 24, Ankara.
- [3] UIC, (2005). Recommendation For The Use Of Rail Steel Grades, Yayın No: 8, Paris.
- [4] TCDD, (1993). 1100 Kalite Rayların Kırılma Nedenleri Belirleme Araştırma Projesi Raporu, Yayın No: 5, Ankara.
- [5] Svejksky, U., ve Nerzak, T., (2007). “Modern Rail Production Using CCS and Railcool Technologies”, Stahl und Eisen, 127:55-60.
- [6] Lee, K.M., ve Polacarpou, A.A., (2005). “Wear Of Conventional Pearlitic and Improved Bainitic Rail Steels”, Wear, 259: 391-399.
- [7] Danielli, R., (2010). “Head Hardening Process”, Danews, 158:62-64.
- [8] EN 13674-1, (2003). Railway Applications – Track – Rail – Part 1: Vignole Railway Rails 46 kg/m and Above, Brussels.
- [9] Bhadeshia, H.K.D.H., (2002). “Steel For Rails”, Encyclopedia Of Materials Science and Technology.
- [10] Tulumtaş, H. Ray Üretim Teknolojisindeki Gelişmeler ve Türkiye’de Üretim İmkanları, <http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/12073.pdf>, 12 Haziran 2013.
- [11] Kardemir A.Ş., (2008). Stajer Öğrenci Eğitim Notları, Yayın No: 4, Karabük.
- [12] TCDD, (2012). Ray Alım Teknik Şartnamesi, TCDD 1. Bölge Müdürlüğü, İstanbul.
- [13] Koymatçık, H., (2012). R260 Kalite Rayların Optimum Mantar Sertleştirme Parametrelerinin Belirlenmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [14] Brook, C.R., (1998). “Metallography and Microstructures”, ASM Handbook, 88: 30-39.

- [15] United States Patent, (1994). Cycling Heat Treatment For Cooling Grain Size Of Superalloy Castings, Patent No: 5302217, Patent Tarihi: 12 Nisan 1994.
- [16] Boyer, H.E., (2000). "Casting and Properties Of Steels", Metals Handbook, 120: 25-38.
- [17] Beoks, C.R., (1991). "Heat Treatment Of Steels", ASM Handbook, 140: 3-19.
- [18] Bein, C., (1939). Functions Of The Alloying Elements In Steel, ASM International, Cleveland.
- [19] Kalaycıoğlu, O., (2006). Kardemir'de Ray Üretiminde İyileştirmeler, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [20] Onat, Ö., (2012). Mantarı Sertleştirilmiş Raylarda Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [21] Kamlesh, K.J., ve Murthy, R., (2002). "Improvements In Rail Steel Metallurgy For 32.5T Axle Load", N.E. Railway Southern Railway Publish, Proje Rapor No: 712: 1-27.
- [22] Kardemir A.Ş., (2000). Haddehaneler Müdürlüğü Hizmetiçi Eğitim Notları, Yayın No: 33, Karabük.
- [23] Torun, A., (2003). Ray Haddeleri Gelişim Süreci ve Teknolojisi Araştırma Raporu, Karabük.
- [24] Indian Railways Institute Of Civil Engineering, (2007). Rail Steel, Indian Railways Institute Of Civil Engineering Pune Publish, 73-76.
- [25] Xiao-fei, L., Langenberg, P., Münstermann, S., ve Bleck, W., (1963). "Recent Developments Of Modern Rail Steel", Technology Center, Anshan Iron and Steel Corporation, 2-5.
- [26] Satoh, Y., Tatsumi, M., Kasiwaya, K., Ueda, M., ve Yokoyama, H., (1998). "Developments Of Anti-darkspot Bainitic Steel Rail", Railway Technical Research Institute Report, 12:15-20.
- [27] Yokohama, H., Mitao, S., Yamamoto, S., Kataoka, Y., ve Sugiyama, T., (2000). "High Strength Bainitic Rails For Heavy Haul Railways With Superior Damage Resistance", NKK Giahou, 169: 17-23.
- [28] Bhadeshia, H.K.D.H., (2005). "High Performance Bainitic Steel", Materials Science Forum, 500-501: 63-74.
- [29] Bhadeshia, H.K.D.H., (2002). "Novel Steels For Rails", Encyclopedia Of Materials Science: Science and Technology, 170: 1-7.
- [30] Innotrack Guideline, (2006). "Definitive guidelines on the use of different rail grades", Innotrack Proje No: TIP5-CT-2006-031415, 1-43.
- [31] Inchinose, H., ve Takahara, J., (1978). "An Investigation On Contact Fatigued Wear Resistance Behaviour In Rail Steel", Proc 1st. International Heavy Haul Conference, 307: 1-10.
- [32] Pointner, P., (2008). "High Strength Rail Steel", Wear, 265: 1373-1379.

- [33] Mdler, K., Zoll, A., Heyder, R., ve Brehmer, M., (2007).). “Rail Materials Alternatives and Limits”, Proceeding Of The 8th. World Congress on Railway Research, 18-22
- [34] Bramfitt, B.L., (1991). “Accelerated Cooling of Rail”, Iron and Steelmaker, 18: 33-41.
- [35] Bramfitt, B.L., (1994). “Advanced In line Head Hardening of Rails”, Research Department, Bethlehem Steel Corporation.
- [36] United States Patent, (1984). Method For The Production of Improvement Railway Rails by Accelerated Cooling In Line With The Production Rolling Mill, Patent No: 4486248, Patent Tarihi: 04/12/1984.
- [37] De Boer, H., Beinzeisler, H., Msgen, B., Schmedders, H., ve Wick, K., (1992). “Verbesserung Des Betriebsverhaltens Von Eisenbahnschienen Durch Feinperlitisieren Des Schienekopfes”, Stahl Eisen, 112: 101-107.
- [38] Voestalpine, Heat treatment Technology, www.voestalpine.com, 08 Eylül 2013.
- [39] Taşkın, V., (1996). Takım eliklerinde ekme Basma Yorulma zelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- [40] Uysal, E., (2003). Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilmiş AISI 4340 eliğı ile Paslanmaz eliklerin Yorulma Dayanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eleziğ.
- [41] Fracture Investigations, Metalic Failures, www.fractureinvestigations.com, 07 Temmuz 2013.
- [42] Er, M., (2006). Yüksek Frekanslı, Genlik Ayarlı Eğılme Yorulması Test Cihazı Tasarımı ve 1100-H14 Alüminyum Levhasının Eğılme yorulması Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [43] Kayalı, E.S., Ensari, C., ve Dikeç, F., (1990). Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, 6/1990, İT Kimya Metalürji Fakültesi Ofset Atölyesi. İstanbul.
- [44] Tauscher, H., (1983). elik ve Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı, Biçim Etkisi ve Hesaplama Yöntemleri, MBEAE MATBAASI, Gebze; Güleç, ř. ve Aran, A.
- [45] Weisbach, W., (1998). Malzme Bilgisi ve Muayenesi, Birsen Yayınevi, İstanbul; Anık, S., Amık, E.S., Vural, M.
- [46] ISO 1143, (2010). Metalic Materials – Rotating Bar Bending Fatigue Testing, ISO, 2. Baskı, Switzerland.
- [47] Kumru, N., (2005). “Metalik Malzemelerde Yorulma Dayanımını İncelemek İçin Kullanılan Yorulma Makineleri”, Soma MYO Teknik Bilimler Dergisi, 1(4): 58-70.
- [48] Peapegem, W.V. ve Degrieck, J., (2001). “Experimental Setup and Numerical Modelling of Bending Fatigue Experiments on PlainWoven Glass/Epoxy Composites”, Composite Structures, 51(1): 1-8.

- [49] Bystritskii, V., Garate, E., Earthman, J., Kharlov, A., Lavernia, E. ve Peng, X., (1999). "Fatigue Properties of 2024-T3, 7075 T6 Aluminum Alloys Modified Using Plasma-Enhanced Ion Beams", Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 32: 47-53.
- [50] Vidaud, M., ve Zwanenburg, W., (2009). "Current Situation on Rolling Contact Fatigue – A Rail Wear Phenomena", 9th Swiss Transport Research Conference, 9-11 September 2009.
- [51] Magel, E., Sroba, P., Sawley, K., ve Kalousek, J., (). Control of Rolling Contact Fatigue of Rails, Centre for Surface Transportation Technology National Research Council Canada, Alberta.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Sait ÖZÇELİK
Doğum Tarihi ve Yeri : 17/01/1989 - KARABÜK
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ozceliksait@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Metalürji ve Malzeme Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2011
Lise	Fen	Karabük 75. Yıl Anadolu Lisesi	2007

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2012	Karabük Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2011	Gimsan A.Ş.	Kalite Kontrol Birim Sorumlusu
2010	Yıldız Teknik Üniversitesi	Öğrenci Asistan