

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**HIZLI TREN HATLARINDAKİ RAYLARIN AŞINMA
DAVRANIŞLARININ MİKROYAPISAL
ARAŞTIRILMASI**

Erkan YÜKSEL

Yüksek Lisans Tezi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri
Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Mehmet H. KORKUT

ELAZIĞ-2017

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HIZLI TREN İLATLARINDAKİ RAYLARIN AŞINMA DAVRANIŞLARININ
MİKROYAPISAL ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erkan YÜKSEL

(141140104)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 10 Kasım 2017

Tezin Savunulduğu Tarih: 10 Kasım 2017

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet H. KORKUT (F.İ.)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hüseyin TURHAN (F.İ.)

Yrd. Doç. Dr. Erdi VURAL (M.A.Ü.)

KASTM-2017

ÖNSÖZ

Mesleki kariyerimde önemli bir basamak olan yüksek lisans eğitiminin son aşamasına gelmiş bulunmaktayım. Ülkeme ve insanlara faydalı olmak ve mesleğimi daha iyi icra edebilmek için henüz başında bulunduğum yolda birçok engelin bulunduğunun da bilincinde olarak;

Bu çalışmanın başlangıcından tamamlanmasına kadarki süreçte her zaman yardım ve desteğini esirgemeyen, bilgileriyle karşılaştığım sorunların üstesinden gelmemi sağlayan, ahlaki ve insani yönünü takdir ettiğim ve örnek aldığım, öğrencisi olmaktan gurur duyduğum ve çalışma sürecinde bana olan yaklaşımıyla çalışma azmimi arttıran değerli hocam Prof. Dr. Mehmet H. KORKUT'A ve benden çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Hüseyin TURHAN'a teşekkür ederim.

Ayrıca numunelerin parlatılması ve dağlanması işlemlerini yapmamda atölyelerini ve malzemelerini kullandıran Elazığ Organize Sanayi Mert Döküm'e, numunelerin kesilmesi işlemlerinde bana yardımcı olan Yılmazlar Demir Doğrama Atölyesi'ne ve Çukurova Üniversitesi Araştırma Laboratuvarı'na teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni koruyan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve hep yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Erkan YÜKSEL

Elazığ-2017

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	XII
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XIII
1. GİRİŞ.....	1
2. DEMİRYOLU RAYLARI	3
2.1. Raylar.....	3
2.2. Rayların Görevleri ve Özellikleri	5
2.3. Rayların Profilleri	6
2.4. Rayların Kısımları	7
2.5. Ray Çeliklerinin Yapısında Bulunan Maddeler.....	8
2.6. Rayların Mekanik Özellikleri	9
2.7. Ray Boyutları.....	9
2.8. Ray Seçimini Etkileyen Faktörler.....	10
2.9. Raylarda Sertliğin Önemi	11
2.10. Rayların Yüzey Pürüzlülüğü	12
2.11. Rayların Aşınması	12
2.11.1. Dalgalı Aşınma	13
2.11.2. Yuvarlanma-Kayma Aşınması	14
2.11.3. Abrasiv Aşınma	15

3.	AŞINMA	18
3.1.	Aşınmaya Etki Eden Unsurlar	18
3.2.	Aşınma-Zaman İlişkisi	19
3.3.	Aşınma Türleri.....	20
3.3.1.	Adhesif (Yapışma) Aşınma	20
3.3.2.	Abrasif (Kazınma) Aşınma.....	21
3.3.3.	Yorulma Aşınması	22
3.3.4.	Erozyon Aşınması.....	22
3.3.5.	Korozyon Aşınması	22
3.4.	Aşınma Düzeyini Azaltan Unsurlar.....	24
3.5.	Aşınma Ölçüm Metotları	25
3.5.1.	Ağırlık Farkı Metodu.....	25
3.5.2.	Kalınlık Farkı Metodu	25
3.5.3.	İz Değişimi Yöntemi	26
3.5.4.	Radyoizotoplar İle Ölçme.....	26
3.5.5.	Bilgisayar Destekli Ölçme.....	26
3.6.	Aşınma Deneyleri ve Yöntemleri	26
3.7.	Aşınma Deneylerinde Kullanılan Cihaz Türleri	28
3.7.1.	Pin on Flat (Düzlem Üzeri Çubuk) Cihazı	30
3.7.2.	Dört Top Deney Cihazı.....	30
3.7.3.	Ball on Flat (Düzlem Üzeri Bilye) Cihazı	31
3.7.4.	Ball on Disk (Disk Üzeri Bilye) Cihazı.....	31
3.7.5.	Pin on Cylinder (Silindir Üstü Çubuk) Cihazı.....	32
3.7.6.	Plint TE 97 Cihazı	33

4.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	34
4.1.	Deneylerde Kullanılan Malzemeler	34
4.1.1.	Numunelerin Hazırlanışı.....	36
4.2.	Isıl İşlem	37
4.3.	Metalografik İşlemler	38
4.4.	SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) İncelemeleri.....	40
4.5.	EDS (Energy Dispersive Spectrograf) Noktasal Analiz Çalışmaları	41
4.6.	XRD (X-Ray Diffraction) Çalışmaları.....	41
4.7.	Aşınma Deneyleri	42
5.	DENEY SONUÇLARI	46
5.1.	Mikroyapı Sonuçları	46
5.2.	EDS Analiz Sonuçları.....	68
5.3.	XRD Testi Sonuçları	73
5.4.	Aşınma Testi Sonuçları	74
6.	GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	79
	KAYNAKLAR	82
	ÖZGEÇMİŞ	87

ÖZET

Hızlı Tren Hatlarındaki Rayların Aşınma Davranışlarının Mikroyapısal Araştırılması

Bu çalışmanın amacı, hızlı tren hatlarında rayların aşınmadan önce ve sonraki S49 serisi ray çeliğinin atomik içyapısını ve yüzey pürüzlülüğünün ileri metalografik araştırma (X-ışınları, sem ve optik mikroskop ve noktasal analiz gibi) teknikleri kullanılarak mikro yapılarının incelenmesidir. Ayrıca diğer malzemelerle kıyaslamının yapılması, aşınan ray çeliğinin mukavemetini artıcı önlemlerin belirlenmesi ve kullanılan S serisi ray çeliklerinin aşınmaya daha kararlı bir yapıya sahip ve daha uzun ömürlü olması ilave olarak üretimde de daha verimli hale getirilmesi amaçlanmaktadır.

Bu amaçla S49 çeliğinden imal edilmiş ray numunesi kesim işlemine tabi tutularak numuneler oluşturulmuştur. Aşınma deneyi için A1-A2-A3, B1-B2-B3 ve C1-C2-C3 olmak üzere 9 adet numune oluşturulmuştur. S49 çeliğinden alınan numuneler ısıtıcı fırında 800⁰C sıcaklığa yükseltilerek 15 dakika östenitleme işlemine maruz bırakılmıştır. Bu işlemde sonra numune sıcaklıkları 550⁰C, 575⁰C ve 600⁰C sıcaklıklarda fırında 5 dakika bekletilmiş ve havada soğutma işlemine tabi tutularak ısıtma işlemi uygulanması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra numune 80µ, 220µ, 400µ, 600µ, 800µ ve 1000µ keçeler kullanılarak cıva ve kadifeyle parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Parlatma işleminden sonra alkol ile temizlenen numune içyapısı mikroskopta görülünceye kadar kadife ile parlatılmış, görüntü elde edildikten sonra %2'lik nital ile dağlanmış. A1, B1, ve C1 numuneleri 10N, 20N ve 30N'luk yüklerde ve 1800m, 3600m ve 5400m'lik kayma mesafelerinde Fırat Üniversitesi Metalurji-Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan JET WMH Tool Group AG, GH-8603 markalı aşınma cihazıyla, aşınma testine tabi tutulmuşlardır. Deneysel aşamalardan elde edilen numuneler ışık mikroskobu, SEM, XRD ve EDS görüntüleri alınarak aşınma davranışları değerlendirilmiştir. Araştırma sonucunda S49 ray çeliklerinin yük, kayma hızı ve kayma yolu değişkenleriyle doğru orantılı bir şekilde kütle kaybına uğradığı yani aşınma düzeyinin arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, S49 Ray Çeliği, SEM, EDS, Metalurji

SUMMARY

Microstructural Study Of Rabble Abrasion Behaviors In High-Speed Train Lines

The aim of this study is to examine the microstructures of the high-speed railway lines using advanced metallographic research (such as X-rays, sem and optical microscopy and point analysis) techniques for the atomic interior construction and surface roughness of the S49 series rail steel before and after the rails are eroded. It is also aimed to make coMParison with other materials, to determine the measures to increase the strength of the worn rail steel and to make the S series rail steels used more stable and more durable than wear and to be more productive in production.

For this purpose, specimens were prepared by subjecting the rail sample made of S49 steel to cutting process. For the abrasion test, 9 samples A1-A2-A3, B1-B2-B3 and C1-C2-C3 were formed. The samples taken from the S49 steel were heated to 800⁰C in the heater furnace and subjected to austenitization for 15 minutes. After this process, sample temperatures were kept at 550⁰C, 575⁰C and 600⁰C for 5 minutes and heat treatment was applied by cooling in air. Then the sample was polished with mercury and velvety using 80μ, 220μ 400μ, 600μ, 800μ and 1000μ felts. After polishing, the sample cleaned with alcohol is polished with velvet until it is seen on the microscope, and after the image is obtained, it is etched with 2% qualitative. The JET WMH Tool, which is located at the laboratory of Firat University Metallurgical and Materials Engineering at specimens A1, B1 and C1 at loads of 10N, 20N and 30N and at 1800m, 3600m and 5400m, Group AG were subjected to a wear test with the GH-8603 abrasion device. The specimens obtained from the experimental stages were examined by light microscopy, SEM, XRD and EDS images. As a result of the research, it was determined that the S49 rail steels suffered mass loss in direct proportion to the load, shear rate and slip distance variables, that is, the level of wear increased.

Key Words: Wear, S49 Rail Steel, SEM, EDS, Metallurgy

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1.	S49 çelikleri kullanılarak yapılan bir demiryolu ve ray sistemi	3
Şekil 2.2.	Oluklu ray kesiti	6
Şekil 2.3.	Çift mantarlı ray kesiti	7
Şekil 2.4.	Rayın Kısımları	8
Şekil 2.5.	Dalgalı aşınma	14
Şekil 2.6.	Yuvarlanma-Kayma Aşınması	15
Şekil 2.7.	Ray yüzeyinde oluşan abrasiv aşınma	16
Şekil 2.8.	Sertliğin lameller arası mesafe ile değişimi	17
Şekil 3.1.	Aşınma süreci grafiği	19
Şekil 3.2.	Adhesif aşınma	20
Şekil 3.3.	Sert ve pürüzlü yüzeye sahip bir metalin yumuşak yüzeye sahip metalle etkileşmesi	21
Şekil 3.4.	Sürtünen iki metal arasına yüzeylerden en az birinden daha sert parçacıkların girmesi	21
Şekil 3.5.	Erozyon aşınması mekanizması	22
Şekil 3.6.	Farklı geometrik şekillerde kayma aşınması mekanizmaları	27
Şekil 3.7.	Pimin yüzeye temas şekilleri	27
Şekil 3.8.	ASTM G65-94 abrasif aşınma cihazı	28
Şekil 3.9.	Abrasif aşınma cihazı	29
Şekil 3.10.	Aşındırıcı parçacıklı aşınma cihazı	29
Şekil 3.11.	Pin on Flat cihazı	30
Şekil 3.12.	Dört Top Deney Cihazı	30
Şekil 3.13.	Ball on Flat cihazı	31

Şekil 3.14.	Ball on disk cihazı	32
Şekil 3.15.	Pin on Cylinder cihazı	32
Şekil 3.16.	TE-97 aşınma cihazı	33
Şekil 4.1.	S49 ray çeliği numunesi	34
Şekil 4.2.	Numunelerin spektral analizlerinin yapıldığı EDX3600B cihazı.....	35
Şekil 4.4.	Kullanılan numune örnekleri	36
Şekil 4.5.	Isıl işlem basamaklarında kullanılan fırın	37
Şekil 4.6.	S49 ray çeliği numunelerine uygulanan ısıtıl işlem basamaklarının şematik gösterimi	37
Şekil 4.7.	Numunelerin zımparalanması işlemi	38
Şekil 4.8.	Numunelerin parlatılması işleminde kullanılan zımparalar.....	38
Şekil 4.9.	Numunelerin cıva ve kadife kullanılarak parlatılması işlemi.....	39
Şekil 4.10.	Numunelerin dağlanması işleminde kullanılan nital çözeltisi.....	39
Şekil 4.11.	Numune incelemesinde kullanılan optik mikroskop	40
Şekil 4.12.	Numunelerin mikroyapı incelemesinde kullanılan SEM cihazı	40
Şekil 4.13.	Mikroyapı incelemesinde kullanılan XRD cihazı	41
Şekil 4.14.	XRD cihazındaki verilere göre XRD grafikleri oluşturma.....	42
Şekil 4.15.	Aşındırılacak numunelerin çapaklarını giderme ve alkol ile temizleme ...	42
Şekil 4.16.	Aşındırma deney cihazı	43
Şekil 4.17.	Plint TE97 aşındırma cihazının şematik görünümü	44
Şekil 4.18.	Numunelerin aşınma devir ve yük parametreleri	44
Şekil 4.19.	Numunelerin aşınma testi öncesi kütle tespitinin yapılması	45
Şekil 4.20.	Aşınan numunelerin kütle kaybını ölçmede kullanılan hassas terazi	45
Şekil 4.21.	Isıl işlem görmemiş numunenin parlatılmış görüntüsü	46
Şekil 4.22.	Isıl işlem görmemiş numunenin dağlanmış görüntüsü	46

Şekil 4.23.	Isıl işlem görmüş numunenin görüntüsü	47
Şekil 4.24.	Isıl işlem görmüş numunenin dağlanmış görüntüsü	47
Şekil 4.25.	A1 numunesine ait optik mikroskop görüntüleri	48
Şekil 4.26.	A1 numunesine ait SEM görüntüleri	49
Şekil 4.27.	A2 numunesine ait optik mikroskop görüntüleri	50
Şekil 4.28.	A2 numunesine ait SEM görüntüleri	51
Şekil 4.29.	A3 numunesine ait optik mikroskop görüntüleri	52
Şekil 4.30.	A3 numunesine ait SEM görüntüleri	53
Şekil 4.31.	B1 numunesine ait optik mikroskop görüntüleri	54
Şekil 4.32.	B1 numunesine ait SEM görüntüleri	55
Şekil 4.33.	B2 numunesine ait optik mikroskop görüntüleri	56
Şekil 4.34.	B2 numunesine ait SEM görüntüleri	57
Şekil 4.35.	B3 numunesine ait optik mikroskop görüntüleri	58
Şekil 4.36.	B3 numunesine ait SEM görüntüleri	59
Şekil 4.37.	C1 numunesine ait optik mikroskop görüntüleri	60
Şekil 4.38.	C1 numunesine ait SEM görüntüleri	61
Şekil 4.39.	C1 numunesine ait perlitik yapı görüntüsü.....	62
Şekil 4.40.	C2 numunesine ait optik mikroskop görüntüleri	62
Şekil 4.41.	C2 numunesine ait SEM görüntüleri	63
Şekil 4.42.	C3 numunesine ait optik mikroskop görüntüleri	64
Şekil 4.43.	C3 numunesine ait SEM görüntüleri	65
Şekil 4.44.	C3 numunesinin 40000X SEM görüntüsü.....	66
Şekil 4.45.	Isıl işlem görmemiş numunenin mikroyapısı	67
Şekil 4.46.	800 °C sıcaklığa kadar ısıl işlem uygulanmış numunenin mikroyapısı.....	67

Şekil 4.47.	8000C sıcaklığa kadar ısıtıl işlem uygulanmış numunenin 1. Bölge EDS sonuçları ve grafiği	68
Şekil 4.48.	8000C sıcaklığa kadar ısıtıl işlem uygulanmış numunenin 2. Bölge EDS sonuçları ve grafiği	69
Şekil 4.49.	30MPa yük ve 6000 metre kayma yolunda aşındırılmış C3 numunesine ait 1. Bölge EDS sonuçları ve grafiği	70
Şekil 4.50.	30MPa yük ve 6000 metre kayma yolunda aşındırılmış C3 numunesine ait 2. Bölge EDS sonuçları ve grafiği	71
Şekil 4.51.	30MPa yük ve 6000 metre kayma yolunda aşındırılmış C3 numunesine ait 3. Bölge EDS sonuçları ve grafiği	72
Şekil 4.52.	Isıl işlem görmemiş numuneye ait XRD1 grafiği.....	73
Şekil 4.53.	Isıl işlem görmüş numuneye ait XRD2 grafiği.....	74
Şekil 4.54.	S49 ray çeliğinin 10 MPa yük altında değişen kayma yoluna göre aşınma miktarı.....	75
Şekil 4.55.	S49 ray çeliğinin 20 MPa yük altında değişen kayma yoluna göre aşınma miktarı.....	76
Şekil 4.56.	S49 ray çeliğinin 30 MPa yük altında değişen kayma yoluna göre aşınma miktarı.....	76
Şekil 4.57.	S49 ray çeliğinin 300 devir/dakika kayma hızı ve 2000 metre kayma yolunda değişen yük değişkenine göre aşınma miktarı	77
Şekil 4.58.	S49 ray çeliğinin 600 devir/dakika kayma hızı ve 4000 metre kayma yolunda değişen yük değişkenine göre aşınma miktarı	77
Şekil 4.59.	S49 ray çeliğinin 900 devir/dakika kayma hızı ve 6000 metre kayma yolunda değişen yük değişkenine göre aşınma miktarı	78

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1. Ray boyutları.....	10
Tablo 2. Günlük Trafik Yükleri İçin Seçilecek Ray Tipleri	11
Tablo 3. Deney numunesi olarak kullanılan R260 kalite S49 çeliğinin kimyasal bileşenleri ve oranları.....	35
Tablo 4. Aşındırıcı disk çeliğinin kimyasal bileşenleri ve oranları.....	35
Tablo 5. Numunelerin aşındırma işlemi sonucundaki kütle kayıp değerleri.....	75
Tablo 6. Numunelerin basınç değişkenine göre aşınma miktarları	77

SEMBOLLER LİSTESİ

µm	: Mikron metre
MPa	: Megapascal
mm	: Milimetre
C	: Karbon
P	: Fosfor
Al	: Alüminyum
O	: Oksijen
Mo	: Molibden
Ni	: Nikel
Sn	: Kalay
Ti	: Titanyum
Fe	: Demir
Cu	: Bakır
St	: Çelik
Sn	: Kalay
SEM	: Scanning Electron
XRD	: X-Işını Kırınım Yöntemi
EDX	: Energy Dispersive X-Ray Analysis
UIC	: International Union of Railways

1. GİRİŞ

Ülkemizdeki kullanımı çok eski yıllara dayanan demiryolların, teknolojik gelişmelere rağmen istenilen seviyeye ulaşamamıştır. Ulaşım alanında daha hızlı ve gelişmiş ulaşım araçlarının varlığına rağmen karayollarında trafiğin yoğun olması, yüksek kaza riskleri ve havayolu gibi ulaşım araçlarının oluşturduğu yüksek maliyetler nedeniyle demiryolu taşımacılığından vazgeçilememiştir. Düşük maliyet, yüksek taşıma kapasitesi ve düşük kaza riski özelliklerinden dolayı özellikle yük taşımacılığı başta olmak üzere taşımacılıkta önemli bir rol oynayan demiryollarında yaşanan sorunların ele alınarak değerlendirilmesi ve çözümler üretilmesini gerektirmiştir. Günümüzde teknolojinin gelişmesi, arz ve talebin artması gibi durumlar sonucunda demiryollarıyla taşınan yük kapasitesinin artması ve gelişen teknolojiyle birlikte hızlı trenlerin kullanılması raylarda aşınma problemlerini de birlikte getirmiştir.

Demiryolu taşımacılığında trenlerin hızına ve taşınan yüklerin kapasitelerine bağlı olarak demiryolu yapımlarında farklı raylar kullanılmaktadır. Daha yüksek aşınma mukavemetine sahip olan S49 çeliğinden üretilen raylar kullanılmaktadır. S49 çeliği ile üretilen rayların yapısının %72-80'ini karbon oluşturmaktadır. Demiryollarında ülkeden ülkeye farklılık gösterse de genellikle 2000m ve daha az çaptaki virajlar, dar virajlar olarak nitelendirilmektedir. TCDD'nin 2006-2010 yılı istatistik yıllığında ülkemizdeki mevcut demiryollarının %34,2'sinin dar virajlı olduğu belirtilmiştir (TCDD, 2010). Ray ömrü düz yolda normalde 20-25 yıl iken dar virajlı yollarda bu süre 5 yıla kadar inebilmektedir. Bu sebepten ötürü dar virajlı yollarda S49 çeliklerinin kullanılması ray ömrünün uzamasını sağlarken aynı zamanda aşınmaların neden olacağı kaza risklerini de ortadan kaldırır. Özellikle son yıllarda hızlı trenlerin raylarında ve dar virajlı yollarda S serisi çeliklerinin kullanımı UIC tarafından da önerilmektedir. Ülkemizde demiryolu yapımlarında kullanılan S serisi çeliklerin tamamı yurtdışından karşılanmaktadır.

Bu çalışmada, ülkemize ekonomik yük oluşturan, üretimi sınırlı sayıda ülke tarafından gerçekleştirilen ve yapımının ticari sır olarak gizlendiği S serisi çelikleriyle üretilen rayların aşınma davranışlarını incelemektir. Gelişen teknoloji ile ülkemizde hızlı tren kullanımı, yük kapasitesinin artması ve özellikle dar virajlı yolların aşınması sebepleriyle yıllık yaklaşık 25000 km demiryolu yapımı gerçekleştirilmektedir (TCDD,

2010). S serisi çeliklerle imal edilen rayların yapımının çözölerek ölkmizde üretiminin gerçekleştirilmesi ekonomik olarak büyük katkılar sağlayacaktır.

Bu çalışmanın amacı S49 çelikleriyle üretilmiş rayların aşınma davranışlarının laboratuvar ortamında incelenmesidir. Bu bağlamda S49 eliğiyle imal edilen raylardan alınan parçadan aşınma çalışması amacıyla A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2 ve C3 adıyla 9 numune, metalografik çalışmalar için 4 numune alınmıştır. Öncelikle numuneler 15 dakika 800⁰C'lik fırında östenitleme işlemeine tabi tutulmuştur. Numune 550⁰C, 575⁰C ve 600⁰C sıcaklıklarda 5 dakika süreyle fırında bekletilmiş ve fırından çıkarılarak havada soğutulmuş ve ısıl işlem tamamlanmıştır. Daha sonra numune 80μ, 220μ 400μ, 600μ, 800μ ve 1000μ keçeler kullanılarak cıva ve kadifeyle parlatma işlemeine tabi tutulmuştur. Parlatma işleminde sonra alkol ile temizlenen numune içyapısı mikroskopta görölünceye kadar kadife ile parlatılmış, görüntü elde edildikten sonra %2'lik nital ile dağlanmıştır. Nital dağlama işlemleri gerçekleştirildikten sonra A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2 ve C3 numuneleri 10N, 20N ve 30N'luk yüklerde ve 1800m, 3600m ve 5400m'lik kayma mesafelerinde aşınma testine tabi tutulmuştur. Deneyisel aşamalardan elde edilen numuneler ışıık mikroskobu, SEM, XRD ve EDX görüntüleri alınarak aşınma davranışları değerlendirilmiştir.

2. DEMİRYOLU RAYLARI

2.1. Raylar

Bir çekici ve birkaç tane çekilen araçtan oluşan vasıtaların üzerinde hareket etmesini sağlayan çift sıra ray sistemi ve bu sistemin elemanlarına demiryolu adı verilmektedir (Erdemir, 2006). Yine demiryolu üzerinde hareket eden araçların üzerinde rahat bir şekilde hareket etmesini, tekerleklerin yuvarlanabilmesini, yönlendirilmesini sağlayan ve aracın ve taşıdığı yükün oluşturduğu basınç kuvvetini traverslere aktaran dökme çelikten imal edilmiş malzeme de ray olarak isimlendirilir (Yücel, 2009).



Şekil 2.1. S49 çelikleri kullanılarak yapılan bir demiryolu ve ray sistemi

Demiryolu araçları, yüksek tonajlı yüklerin oluşturduğu basıncı, virajlarda ve yokuş yukarı kısımlardaki zorlanmalarını raylara iletmektedir (Başkonuş, 2012). Tüm demiryolu işletmecileri demiryolu bakım maliyetlerini düşürmek için çeşitli yollar aramaktadırlar (Şekil 2.1). Yapılan maliyet çalışmaları satın alma süreçlerine yön vermektedir. Demiryolu sektörü, rayların üretim ve uygunluk gibi özelliklerini de gelişen ve değişen koşullara göre revize edebilmelidir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte rekabet ortamı kızışmıştır ve ihtiyaçların giderilmesi için zamanla yarışılmaktadır. Ulaşım teknolojilerinin gelişmesiyle beraber çok uzun mesafelerin çok kısa sürede alınmasıyla birlikte trenlerin hızları ve frekansları da arttırılmıştır. 1990'lı yıllarda yaşanan bu gelişmeler beraberinde trenlerin ağır taşıdıkları ağır tonajlı yükler

ve patinaj gibi durumlardan kaynaklanan aşınmada artışın yaşanmasına neden olmuştur. Bu durum da işletmeler için ekstra maliyetler oluşmasına neden olmuştur.

Ray üreten firmaların müşterileriyle senkronize olarak, rayların mukavemetini test etmek, performanslarını ölçmek ve değerlendirebilmek amacıyla farklı demiryolu kısımlarında oluşturulan test hatlarında farklı yükler altında test edilmesi demiryolu kurulumlarının farklı bir boyutunu oluşturmaktadır. Ayrıca rayların ekonomik değerleriyle uyumlu performans göstermesi ve yeterli güvenlik seviyesine uygun olması demiryolu şirketlerinin önem verdiği bir diğer boyutu oluşturmaktadır.

Gregor Girsch ve Norbert Frank'ın, Voestalpine Schienen firmasının destekleriyle Almanya'da yapmış oldukları çalışmada 1400m çaplı ve orta seviyede hızla sahip bir hattaki aşınma ve yorulma davranışlarını belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu çalışma sonucunda S49 raylarının servis ömürlerinin 13 yıl olduğunu hesaplamışlardır (Thakur vd., 2006).

Gelişen teknolojiyle birlikte demiryolu yapımlarında servis ömürleri uzun olan yüksek dayanıklılığa sahip ray çeliklerinin kullanımında artış görülmektedir. Ülkemizde demiryolu yapımlarında genellikle R260 (EN 13674-1) kalite standardına sahip S49 çeliğinden imal edilen raylar kullanılmaktadır. Bu raylar yüksek aşınma ve yorulma mukavemetine sahip olması nedeniyle hızlı trenlerde, dar virajlarda ve ivmelenme bölgelerinde tercih edilmektedir.

S49 çelikleri kullanılarak üretilen raylar tüm dünyada olduğu gibi ray üretiminde baz alınan R260 (EN 13674-1) üretim standartlarına uygun olarak üretilmektedirler. Rayların mukavemetini arttıran unsur içeriğinde bulunan artırılmış karbon miktarının artırılmasıdır. Bu raylarda mangan, küçülen perlit topluluklarının oluşmasına yardımcı olurken aynı zamanda perlitik dönüşüm noktasının düşmesine de neden olmaktadır. S49 çeliği temel elementler ve düşük düzeyde alaşım elementlerinden oluşmuş, yüksek saflık ve düşük gaz konsantrasyonuna sahiptirler (Schleinker ve Fischer, 2000).

Rayların mukavemetleri aşınma direncine de bağlıdır. SEM görüntülerinde ray çeliğinin lamelleri arasındaki mesafenin azalması rayın aşınma direncinin arttığını gösterir. Perlitik rayların aşınma mukavemetleri sertlikleriyle doğru orantılı olarak değişmektedir (Akpınar, 2009).

2.2. Rayların Görevleri ve Özellikleri

Demiryolu araçlarının sürtünme düzeyini indirmek, araçların tekerleklerini yönlendirmek ve yükün uyguladığı basıncı traverse iletmek rayların görevidir. Ayrıca raylar ağır tonajların oluşturduğu basınca, kırılmaya ve aşınmaya karşı mukavemet göstermelidir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte demiryolu araçlarının kullanım amaçları ve şekilleri değişmektedir. Demiryolu araçlarıyla daha fazla yük ve yolcu taşınması, demiryolu araçlarının hızlarının artması raylarda aşınma, kırılma ve yorulma gibi durumların oluşmasına neden olmaktadır. Teknolojik gelişmelerle birlikte ortaya çıkan fazla yük ve yüksek hızların sonucunda oluşabilecek aşınma, kırılma ve yorulmaya karşı dayanıklıdır ve saflık derecesi yüksektir. S49 çelikleriyle üretilen rayların yüzey kalitesi iyi düzeydedir (MEGEP, 2015).

Demiryolu işletmelerinin raylardan beklediği birtakım özellikler şunlardır (Turan, 2015):

1. Aşınma ve yorulmaya karşı yüksek mukavemet
2. Sıkıştırma mukavemetinin yüksek olması
3. Sertlik, akma dayanımı ve çekme mukavemetinin yüksek seviyede olması
4. Kırılma mukavemetinin yüksek olması
5. Kaynaklanabilme özelliğinin iyi olması
6. Saflık derecesinin yüksek olması
7. Yüzey kalitesinin iyi seviyede olması
8. Yeterli miktardaki hızlarda ve yüklerde ortaya çıkan aks yükünü taşıyabilme kapasitesi
9. Ray profillerinin düz olması ve kurallara uygunluğu
10. İmalat sonrası düşük kalıntı gerilim

Özetle;

1. Demiryolu araçlarının hızlanması ve yavaşlaması durumunda araçların tekerlekleri tarafından uygulanan darbe ve sürtünmelere karşı mukavemeti yüksek olmalıdır.

2. Raylar, ortam sıcaklığından veya yüksüz sıcaklıktan farklı sıcaklıkların oluşmasına neden olan termal kuvvetlere karşı yüksek mukavemet gösterebilmelidir. Bu termal kuvvetler ray sıcaklığının, nötr sıcaklıktan düşük ya da yüksek değerlerde olmasından dolayı oluşan çekme ve basma kuvvetleridir. Eğme ve boyuna gerilmeler ray tasarlama sürecinde belirleyici rol oynamaktadırlar. Gerilimler, rayların bakım sürecinde ray yorulmasına en çok neden olan faktördür.
3. Ray aşınmaları, rayların kullanım ömürlerini belirleyen en önemli unsur olup, ray üretim çeliklerinin sertlik değerleri aşınmayı en aza indirecek düzeyde olmalıdır. Rayların üretim sürecinde, enine, boyuna, orta bölge ve yüzey bölgelerinde kusurlar oluşabilmektedir. Bu kusurlar üretim sürecinde kontrol edilerek telafi edilebilir.
4. Günümüzde özellikle üzerinde durulan ray problemleri mantar kısmında görülen kabuklanma, yorulma ve raylarda katlanma problemleri çalışmaların temel amacını oluşturmaktadır (Kamlesh ve Murthy, 2002).

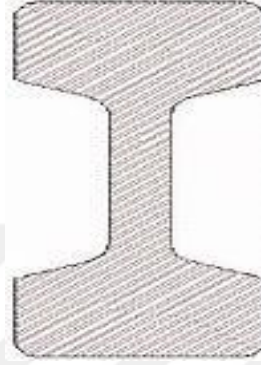
2.3. Rayların Profilleri

Demiryolu teknolojisinin gelişmesiyle birlikte yolcu taşımacılığında hızlı ve yüksek konforlu yolculuklar için üretilen rayların şekillerinde ve niteliklerinde farklılıklar olmuştur. Son yıllarda oluklu ray ve tek mantarlı (vinyol) rayların kullanımı artmaktadır. Daha çok tramvay hatlarında kullanılan oluklu raylar aynı zamanda demiryolu ve karayolu kesişim noktalarında yani hemzemin geçitlerde, rıhtım hatlarında ve karayolu, demiryolu ve yaya yolu kesişim noktalarında da kullanılmaktadır (Şekil 2.2) (Ünlü vd., 2003).



Şekil 2.2. Oluklu ray kesiti (Çelikyürek, 2006)

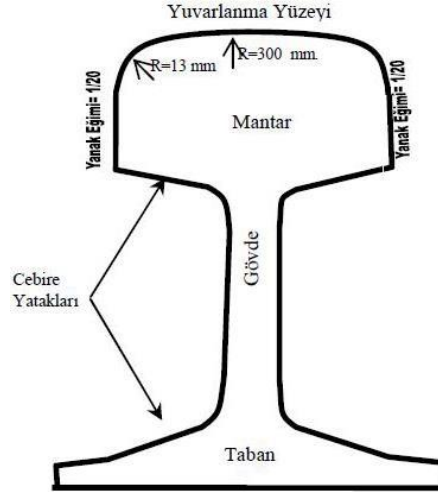
İki mantarın altlı üstlü simetrik bir şekilde yerleştirilmesiyle oluşturulan raylardır. Mantarın bu şekilde üretilmesinin sebebi üst mantarın aşındıktan sonra alt mantarın çevrilerek kullanılması düşüncesidir. Ancak üstteki mantarın aşınmasıyla birlikte alttaki mantarın da aşındığının görülmesi üzerine kullanımından vazgeçilmiştir. Günümüzde Fransa'nın bazı bölgelerinde kullanımı nadir de olsa görülmektedir (Şekil 2.3) (Erdemir, 2006).



Şekil 2.3. Çift mantarlı ray kesiti (Çelikyürek, 2006)

2.4. Rayların Kısımları

Genel olarak raylar, mantar, gövde ve taban olmak üzere 3 bölümden oluşmaktadır. Demiryolu aracının tekerleri ile doğrudan temas halinde olan ve bombeli yuvarlanma yüzeyine ve eğimli yanaklara sahip olan ve belirli bir yüksekliği olan ray kısmı “mantar” olarak isimlendirilir. Genellikle mantarların bombe yarıçapları 200-500mm ve yanak eğimi 1/20, üst köşe yarıçapı 13 mm olmaktadır. Mantarların taban ile bağlantısını sağlayan bölüm “gövde” olarak isimlendirilmektedir. Gövde, mantar üzerine binen yükün traverse aktarılmasını sağlama görevini de üstlenmektedir. Rayların traverse bağlandığı kısım ise “taban” olarak isimlendirilir (Şekil 2.34). Tabanın geniş olması selet ile bağlantısının sağlam olmasını ve devrilmemesini sağlar. Tabanın geniş olması travers üzerindeki basıncı azaltacağından traversin daha az yorulma davranışı göstermesi sağlanır. Geçmiş dönemlerde kullanıldıkları hatlara göre isimlendirilen raylar günümüzde ise birim uzunluktaki ağırlığına göre isimlendirilmektedir (Akbulut, 2006).



Şekil 2.4. Rayın Kısımları (Çelikyürek, 2006)

2.5. Ray Çeliklerinin Yapısında Bulunan Maddeler

Ray çeliklerinin yapısında demirin yanı sıra karbon, fosfor, kükürt, manganez ve silis bulunur. Ray çeliklerinin yapısında karbon, manganez ve silisin belirli oranlarda bulunması dayanıklılığını arttırmaktadır. Fosfor ve kükürt, ray çeliklerinin bünyesinde bulunan zararlı maddelerdir ve tamamen çıkarılması mümkün değildir.

Demirin doğal yapısında Fe_3C şeklinde bulunan karbon genellikle ray çeliklerinin dayanıklılığını arttırmanın yanında malzemenin gevrek olmasına da neden olmaktadır. Bu nedenden ötürü ray çelikleri içerisindeki karbon miktarının %0,4-0,6 oranında olması gerekmektedir.

Çeliğin oksidasyonunu zorlaştıran silis, çeliğin akıcı, yoğun, homojen ve ince taneli olmasını sağlar. Ray üretiminde kullanılan çeliklerin %0,35-0,50 oranında silis içermesi gerekmektedir.

Çeliğin sertliğini ve buna bağlı olarak mukavemetini arttıran manganezin çelik içerisindeki oranı, karbon oranının 2-3 katı kadar yani %0,8-2,1 oranında olması gerekmektedir.

Çeliği sertleştirici bir etkisi olmasına rağmen elastikiyeti karbondan daha fazla azaltan fosforun ray çeliklerinde %0,03-0,08'den fazla oranda bulunmaması gerekmektedir.

Ray çeliği üretiminde istenmeyen madde olan kükürt tüm çabalara rağmen tam olarak temizlenemediği için kabul edilebilir eşik değeri %0,06 oranıdır (Yıldızlı vd., 2003).

Çeliğe zararlı olduğu bilinen oksijen, çelik üretim aşamalarında kullanılan bir element olup, rayların mukavemetine ve çekmesine herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Oksijen az da olsa ray çeliklerinin sertliğini artırıcı etkisi bulunurken, kırılma ve darbe dayanıklılığını azaltır. S49 çeliklerinde izin verilen maksimum oksijen miktarı 20 ppm'dir (Koymatçık, 2012).

2.6. Rayların Mekanik Özellikleri

Teknolojin gelişmesi ve ihtiyaçların artmasıyla birlikte demiryolu taşımacılığında yük ve hız kapasitesinin artması ray kesitlerinin de büyümesine neden olmuştur. UIC standartları ray çekme dayanıklılığını 70-85 kg/mm² olmasını gerektirmektedir. Raylar mekanik olarak kırılmayacak kadar esnek olmalıyken aşınmayacak kadar da sert olmalıdır. %0,78 oranında karbon ve %0,9 oranında manganez kullanılarak sert mantarlı raylar üretilir. Ray çeliklerinin çeşitli kaynaklarla sıcaklığı 1050°C'ye çıkarıldıktan sonra 3-4°C/s soğutma hızında havada soğutularak sıcaklığı 500°C'ye kadar düşürülerek sertlik değeri 280 BSD'den Brinell sertlik değerine (300BSD-400BSD) yükseltilebilmektedir. Bu işlemle 14-40 mm arasında değişen bir derinlik bölgesi oluşturur. Rayların dayanıklılığı kimyasal bileşim oranlarında değişiklikler yaparak veya farklı maddeler kullanılarak artırılabilmesine rağmen bu durum raylarla etkileşim halinde bulunan tekerlek bandajının hızlı aşınmasına sebep olmaktadır. Ray çeliği üretiminde karbon ve manganez oranının artırılması, rayın gevrekliğinin artmasına neden olur. Bu durum rayın daha çabuk kırılmasına neden olmaktadır (Özsaraç ve Durman, 2000).

2.7. Ray Boyutları

Kullanım amaçlarına göre boyutları değişen rayların TCDD'ye göre bazı örnekleri Tablo 1'de verilmiştir. Ülkemizdeki standart demiryolu hatlarında ve hızlı tren hatlarında kullanılan raylar bir metresinin ağırlığı 49 kg olan S49 çeliğinden ve bir metresinin ağırlığı 60 kg olan UIC60 çeliğinden üretilen raylardır. Kullanım amaçlarına göre ray üretiminde kullanılan çelik tipi farklılıklar göstermektedir (MEGEP, 2015).

Tablo 2.1. Ray boyutları (Ünlü vd., 2003)

Rayın Cinsi (kg/m)	Taban Genişliği (mm)	Yüksekliği (mm)	Mantar Genişliği (mm)	Gövde Kalınlığı (mm)
60.340	150	172	72	16,5
49.050	125	148	67	14
49.430	125	149	67	14
46.303	134	145	64	15
39.520	120	138	62	12

2.8. Ray Seçimini Etkileyen Faktörler

Raylarda görülen kırılma miktarının azaltılması, ray ağırlığının artırılmasıyla giderilebileceği demiryolu işletmecileri tarafından belirtilmektedir. Hollanda’da kullanılan 40 kg/m’lik rayların yerine 54 kg/m’lik yay kullanıldığında yay kırılmalarının %30-40 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir. Yine 46 kg/m’lik rayların yerine 63 kg/m’lik rayların kullanılmasıyla ray kırılmalarını %70 oranında azaltılacağı da çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Ray ağırlıkların daha fazla artırılması her ne kadar işletmelere ek maliyetler oluştursa da bakım ve onarım maliyetleri bu ek maliyetleri telafi edecek düzeylere ulaşmaktadır. Ray üretici firmalar ise tüm demiryolu işletmelerinin ortak bir rayda karar kılmaları durumun avantaj yaratacağından söz etmektedir.

İşletmelerin ray tercihlerini trafik yoğunluğu, taşınan yük ve araçların hızları etkilemektedir. Hafif trafik yoğunluğuna sahip hatlar için S49 veya UIC54 tipi ray kullanımı yeterli olurken yüksek trafik yoğunluğuna sahip olan hatlarda ise UIC60 tipi rayların kullanılması yeterli olmaktadır.

Daha yoğun trafiğin görüldüğü, ağır taşıma yüklerinin olduğu, demiryolu araçlarının yüksek hızlarda seyir etmesi ve küçültülmüş teker çaplarının oluşturduğu etkiyi kaldırabilmesi için rayların metre ağırlıklarının arttırılması gerekmektedir (Kalaycıoğlu, 2006).

Hatların günlük trafik yoğunluklarına, taşıma yükü miktarına ve demiryolu aracı hızlarına göre tercih edilebilecek ray tipleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Günlük Trafik Yükleri İçin Seçilecek Ray Tipleri (Bozkurt, 2016)

Günlük Trafik	Ray Tiip
<25000 Ton	49-54 kg/m
25000-35000 Ton	Ahşap traverslerde 49-54 kg/m Beton traversler 60 kg/m
>35000 Ton	60 kg/m

Tablo 2’ye göre hatlarda taşınan yük ağırlığı arttıkça, ray ağırlığının da artması gerekmektedir. R260 kalite raylar, 25 tonluk aks yüküne sahip hatlarda kullanılması problem oluşturmayacağı “UIC-724 Balastlı yollarda 25 ton (250kN) dingil basıncı için yol ekipmanı” şartnamesinde belirtilmiştir.

Ray seçimlerini etkileyen bir diğer husus da demiryolu araçlarının seyir hızlarıdır. Yüksek hızlı tren hatlarında ve hızı 100km/h üzerinde olan demiryolu hatlarında UIC60 standartlarına uygun rayların kullanılması tercih edilmelidir. Demiryolu araçlarının tekerlekleri ile raylar temas halinde bulunduklarından dolayı, rayların mukavemetinin yüksek olması tekerleklerinin aşınmasına neden olurken tekerleklerin yüksek mukavemetli olması da rayların aşınmasına neden olur. Ray seçimleri yapılırken hem rayın hem de tekerlerin aşınmasını en aza indirerek uzun ömürlü olmasını sağlamak temel amaçtır. Ray aşınmaları ray ömrünü belirleyen en önemli unsurlardan biridir. Genel olarak raylarda düşey aşınma ve yanıl aşınma olmak üzere iki türlü aşınma görülür.

2.9. Raylarda Sertliğin Önemi

Maddelerin aşınma, yayılma, kazınma ve yıpranma durumlarına karşı gösterdiği dirence sertlik adı verilmektedir. Metaller içerdiği maddelere göre farklı sertlik düzeylerine sahiptirler. Metallerin sertlikleri ısııl işlem uygulanarak ya da içerdiği maddelerin oranlarıyla oynanarak değiştirilmesi mümkündür (Kamlesh ve Murthy, 2002). Raylarda sıkça karşılaşılan aşınmaları gidermek amacıyla genellikle perlitik yapılar tercih edilmektedir. R260 kalite S49 ray çeliklerinin 260-300 HB arasında olan sertlik değeri yapısındaki kimyasalların oranları değiştirilerek 340-355 HB sertlik değerine kadar yükseltilebilirken, ısııl işlem uygulanarak 350-450 HB sertlik değerlerine ulaşılabilir (Ay, 2012). Rayların sertliklerinin fazla arttırılması daha az

aşınmasını sağlarken yorulma davranışı görülme oranını arttırmaktadır. Rayların sertlikleri rayların aşınmasını engelleyecek kadar yüksek olurken ray yüzeylerinde oluşan yorulma davranışını önleyecek kadar da düşük olacak şekilde ayarlanmalıdır (Zhan ve Wang, 2005).

Rayların sertlikleri ile çekme mukavemetleri arasında doğru orantı bulunmaktadır. Rayların mantar kısımlarının aşınma durumu, rayların çekme mukavemetine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Yüksek ağırlıklı trafik yoğunluğuna sahip hatlarda çekme mukavemeti yüksek olan rayların kullanılması, aşınma düzeyinin aşağıya çekilmesini sağlamaktadır (Balcı, 2008).

2.10. Rayların Yüzey Pürüzlülüğü

Demiryolu ulaşımını sağlayan rayların yüzeylerinin pürüzsüz olması söz konusu değildir. Demiryolu araçlarının seyir halinde tekerlekleri ile raylar arasındaki etkileşim sonucu mantar yüzeyinde pürüzlülük tepeleri ya da kaba bir oluşum halinde gözlenmektedir. Mantar yüzeyinde oluşan bu pürüzlülükler ray yüzeyinde dalgalanmalara, ray ömrünün ksalmasına, titreşimlere ve gürültüye neden olabilmektedir (Candemir, 2005).

Ray yüzeylerinin pürüzlü olması durumunda tekerleklerin uyguladığı basınç tek bir noktada toplanır ve bu durum ray ömrünün ksalmasına neden olur. Ancak ray yüzeyinin pürüzsüzlüğü yükün ray üzerine eşit bir şekilde dağılmasını sağlar ve bu durum ray ömrünü artırır (Rovira ve ark., 2011).

Ray yüzeylerinin pürüzlü olması demiryolu araçlarının tekerleklerinin seyir halindeyken yüksek basınç oluşmasına ve tekerleklerin ray üzerinde büyük basınç oluşturmaya neden olmakta ve aşınmaya sebep olmaktadır (Kapoor, 2002).

Rayın mukavemeti ve sertliği ray pürüzlülüğü üzerinde de etkilidir (Liu ve ark., 2003). Sert ray yüzeylerin pürüz oluşum hızı azaldığı için rayın aşınma hızı azalır ve bu durum ray ömrünün uzamasını sağlar.

2.11. Rayların Aşınması

Bilgi ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte demiryolu taşımacılığında da yeni gelişmeler sağlanmış ve bu durum yük ve yolcu taşımacılığında demiryolu kullanımını

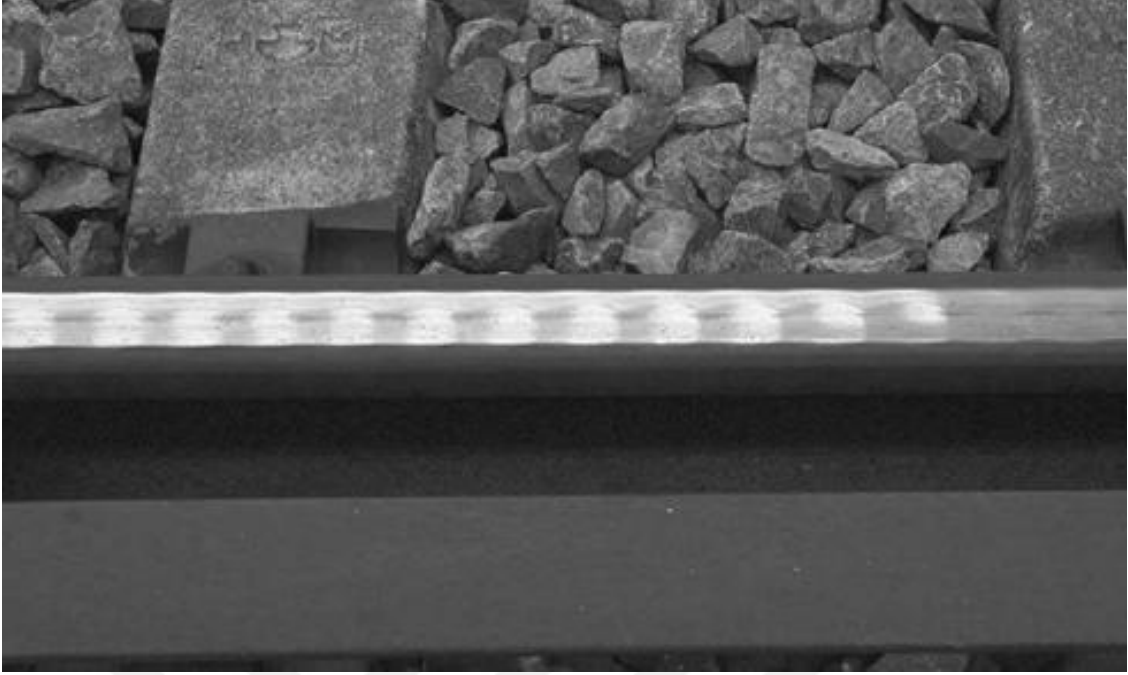
arttırmıştır. Son yıllarda yolcu taşımacılığında yüksek hızlı trenlerin kullanılması ve yüksek tonajlı yükleri taşıyabilen trenler geliştirilmiştir. Demiryolu işletmeciliğinde meydana gelen bu gelişmeler beraberinde yüksek hız ve trafik yoğunluğunu da beraberinde getirmiş ve bu durum süreç içerisinde raylarda şekil bozuklukları oluşmasına, rayların fiziksel özelliklerinde bozulmalar meydana getirerek trenlerin tekerleklerinde ve raylarda hasar oluşumuna, onarım ve bakım maliyetlerinin artmasına, trenlerin hareketleri sırasında gürültü seviyesinin artmasına ve hatta bazen ciddi tren kazalarına neden olabilmektedir. Demiryolu raylarında yüksek hız ve trafik yoğunluğuna bağlı olarak süreç içerisinde doğrultu ve yükseklik bozukluklarından farklı olarak kırılma ve aşınma gibi hasarların oluşumuna da rastlanabilmektedir (Erel, 2009). Demiryolları bakımı ve onarımı maliyetlerini ciddi düzeyde arttıran sebeplerin başında yer alan aşınma, raylarda sıklıkla karşılaşılan bir problemdir. Rayların aşınmasını etkileyen unsurlar şunlardır;

1. Rayın üretildiği çeliğin mikroyapısı,
2. Ray çeliğinin sertliği,
3. Ray çeliğine uygulanan işlemler
4. Rayın trafik yoğunluğu,
5. Demiryolu aracının seyir hızı
6. Tren tekerleklerinin ray üzerinde sürtünmesi,
7. Ray yüzeyinin pürüzlülüğü

Raylarda dalgalı aşınma, yuvarlanma-kayma aşınması ve abrasiv aşınma olmak üzere üç türlü aşınma şekli yoğun bir şekilde karşımıza çıkmaktadır.

2.11.1. Dalgalı Aşınma

Dalgalı aşınmanın bir diğer adı “ondülasyon”dur. Bu aşınma şeklini ray mantarının yüzeyinde nadiren ya da sıklıkla meydana gelen periyodik düzlemsel bozukluklar olarak tanımlayabilmek mümkündür (Şekil 2.5). Ray mantarının üst kısmında tekerleklerin yuvarlanma yüzeyinde sıralı şekilde devam eden parlak tepeler ve mat çukurların oluşumu şeklinde görülen bu aşınma, trafik güvenliğine risk oluşturmaz fakat yüksek frekanslı gürültü oluşumuna neden olur (Ağlan, 2004).



Şekil 2.5. Dalgali aşınma (Suda ve ark., 2002)

İngiliz Standartları Enstitüsü'nün hazırladığı BS EN 13231-3 standardına göre 10-30mm boyundaki dalgalar çok kısa, 30-100mm boyundaki dalgalar kısa, 100-300mm boylarındaki dalgalar uzun ve 300-1000mm boylarındaki dalgalar ise çok uzun olarak nitelendirilmiştir (Onay, 2011).

2.11.2. Yuvarlanma-Kayma Aşınması

Demiryolu araçlarının ray üzerinde yuvarlanması sonucunda meydana gelen aşınma türü yuvarlanma-kayma aşınması olarak isimlendirilir (Şekil 2.6). Trenlerin tekerleklerinin ray ile olan etkileşimini yüksek temas kuvvetleri ile küçük temas alanları olmak üzere iki şekilde gruplandırılabilir. Mevcut yükün tamamı rayın tüm kısımları tarafına eşit olarak dağıldığı görünse de realitede durum böyle değildir. Ray mantarı yüzeyinde oluşan pürüzler, yükün bir noktada toplanmasına ve plastik akış gerçekleşmesine sebep olur. Basıncın etkisiyle mantar yüzeyinde aşağı doğru basma kuvveti oluşur ve mantar kenarlarından malzeme akışı gerçekleşir. Bu akıntılar ilerleyen süreçlerde ray kenarlarında sertleşir ve kırılırlar (Çakmak ve Yalçın, 2005).



Şekil 2.6. Yuvarlanma-Kayma Aşınması

Yuvarlanma-kayma aşınması genellikle istasyon girişlerinde karşımıza çıkan aşınma türüdür. Bunun nedeni trenin istasyon girişlerinde yaptığı frenin, tekerleklerin yuvarlanmasına karşı oluşturduğu dirençtir. Trenin freni tekerleklerin dönmesine engelleyici kuvvet uygulayarak tekerleğin dönmeden ray üzerinde dönmesine neden olur (Uğur, 2012). Yuvarlanma-kayma aşınması hem raylarda hem de trenin tekerleklerinde farklı oranlarda aşınma oluşmasına neden olabilmektedir (Şekil 2.6).

2.11.3. Abrasiv Aşınma

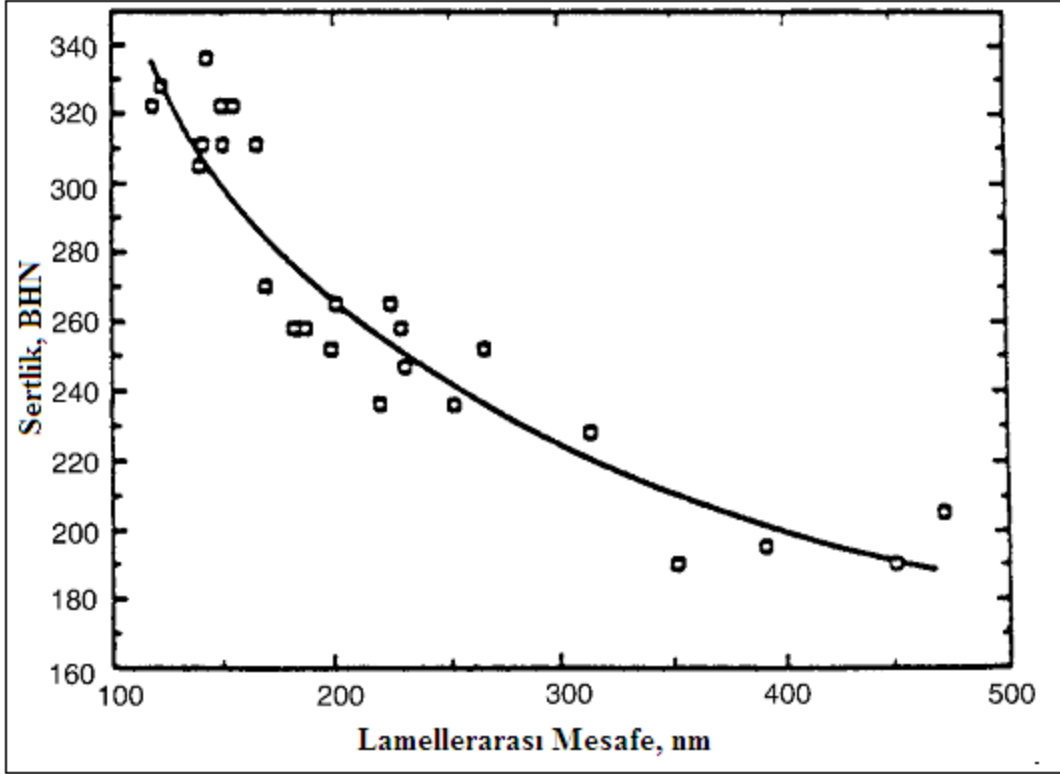
Bu aşınma türü demiryollarında sık karşılaşılan bir durumdur. Yuvarlanma-kayma hareketi yapan trenin tekerleğindeki kaba parçalar, artan basıncın da etkisiyle rayın mantar kısmına gömülür. Bu parçalar ray yüzeyinin kazınmasına, bozulmasına, aşınma yüzeyleri oluşturarak abrasiv aşınmanın gerçekleşmesine ve kırılabilirliğinin artmasına neden olmaktadır (Kapoor, 1997).



Şekil 2.7. Ray yüzeyinde oluşan abrasiv aşınma (Büyükkelleci, 2008)

Abrasiv aşınmayı arttıran etkilere birisi de yüzeyler arasında giren tozlardır. Bu parçalar tekerlek-ray arasında girerek bir zımpara etkisi yaratır ve malzemenin aşınmasına neden olur (Özsaraç, 2005). Abrasiv aşınma ile raylarda boyuna, yanıl veya düşey hasarlar oluşturur ve ray profilinin farklılaşmasına sebep olur (Erel, 2009).

Rayların aşınması üzerindeki en önemli etkenlerin başında rayın sertliği gelmektedir. Yüksek aşınma dayanıklılığına sahip olan S serisi çeliklerle üretilen raylar, demiryolu işletmeleri tarafından tercih edilmektedir. Çeliklerin lamelleri arasındaki mesafe çeliğin sertliğini ve aşınma dayanıklılığını etkilemektedir. Lameller arası mesafe ile sertlik ve aşınma dayanıklılığı arasında ters orantı bulunmaktadır. Yani lameller arası mesafe arttıkça sertlik ve aşınma dayanıklılığı azalırken, lameller arası mesafe azaldıkça sertlik ve aşınma dayanıklılığı artmaktadır.



Şekil 2.8. Sertliğin lameller arası mesafe ile değişimi (ASM International, 2005)

Raylarda sertlik ile aşınma dayanıklılığı arasında doğru orantı bulunmaktadır. Rayların sertliği arttıkça aşınma dayanıklılığı da arttığından dolayı çeşitli uygulamalar yapılarak ray çeliklerinin sertliğini arttırmak mümkündür (Şekil 2.7). Ray çeliğinin ısıtılma işlemi tabii tutulması ve kimyasal yapısında değişiklikler yapılması ile sertlik değerlerinin artırılması mümkün olmaktadır. Ancak ray çeliklerinin sertlikleri belli bir düzeyden sonra deformasyonlara ve kırılmalara neden olduğu için belirli seviyelere kadar artırılmaktadır (Kalaycıoğlu, 2006).

3. AŞINMA

Mekanik etkiler sonucunda, cismin yüzeyinden parçaların kopmasının meydana getirdiği istenmeyen değişiklik aşınma olarak isimlendirilir. Aşınma hem maddeler üzerinde hasar oluşumuna neden olurken hem de malzeme kaybı yaşanmasına neden olmaktadır. Aşınma sonucunda önemli maddi kayıplar oluşabilmektedir. Bir maddede görülen yıpranmanın aşınma olarak nitelendirilebilmesi için;

1. Mekanik bir etki sonucu oluşması,
2. Sürtünme sonucu oluşması,
3. Belirli bir süreç içerisinde gerçekleşmesi,
4. Madde yüzeyinde değişiklik oluşturmaması,
5. İstemsiz gerçekleşmesi

şartlarını taşıması gerekir.

Yukarıdaki özelliklerden herhangi birini taşımayan yıpranmalar aşınma olarak nitelendirilemez (Çiçek, 2011). Aşınma sürecinde ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük ve hareket olmak üzere beş temel öge bulunmaktadır.

3.1. Aşınmaya Etki Eden Unsurlar

1. Aşınan malzemenin cinsi
2. Aşınan ve aşındıran arasında gerçekleşen sürtünme
3. Aşınan malzeme yüzeyine etki eden yük
4. Kayma mesafesi
5. Aşınan malzemenin yüzeyinin sertlik derecesi
6. Aşınan malzemenin yüzey pürüzsüzlüğü
7. Aşınan malzemenin yüzeyinin yağlanması (Çetin ve Gül, 2006).

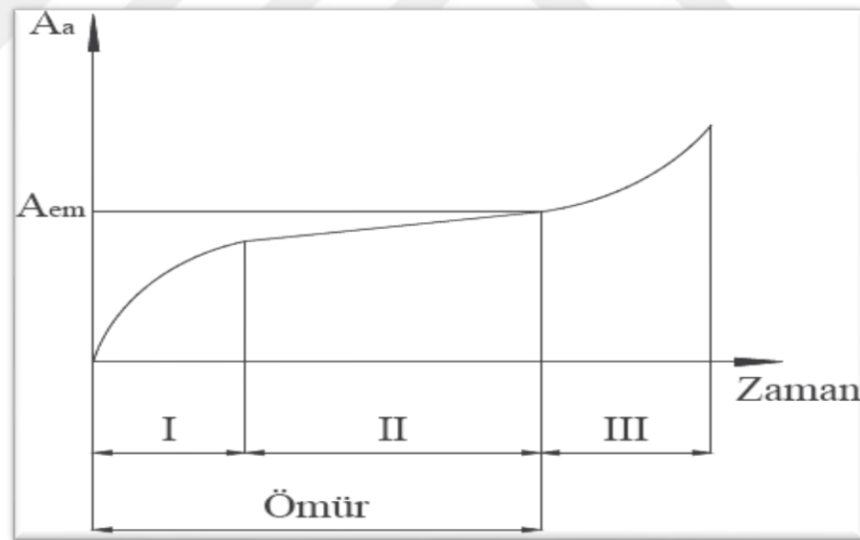
3.2. Aşınma-Zaman İlişkisi

Aşınmalar ya belirli bir süreç içerisinde gerçekleşir ya da ani gelişen durumlar sonucunda gözlenir. Belirli bir süreç içerisinde oluşan aşınmalar üç aşamada incelenebilir:

1. Safha (Rodaj Safhası): Birlikte çalışan parçaların birbirlerine alıştırılması safhası olup, ilk çalışma aşamasındaki aşınmaların önlenmesi amaçlanmaktadır. Parçalar arasında alıştırma yapılırken düşük hızlarda ve hafif yükler altında birbirine alıştırılmaktadır. Alıştırma sürecinde kullanılan özel ağırlıklar rodaj safhasında kullanılmaktadır (Erdemir, 2006).

2. Safha: Birinci aşamaya göre aşınma hızının daha düşük olduğu bu safhada malzemenin aşınma oranı artmaya başlar ve bu safhadan sonra büyük oranlı aşınmalar gerçekleşir.

3. Safha: Bu safhada malzemedeki aşınma düzeyi en fazladır. Bu safhada meydana gelen aşınmalar yüksek oranda hasarların oluşumuna neden olmaktadır.



Şekil 3.1. Aşınma süreci grafiği (Kuş, 2007).

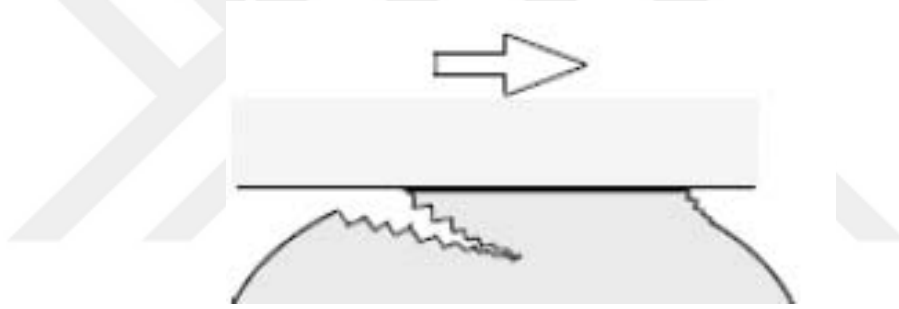
Malzemelerin aşınma ömürleri, kabul edilebilir aşınma değerinin belirlenmesiyle aşınma süreci grafiği kullanılarak tespit edilebilir (Şekil 3.1). Böylece raylı sistemlerin periyodik bakım süreçleri belirtilerek aşınan malzemenin tamir edilmesi ya da değiştirilmesi sağlanır (Turan, 2015). Aniden gerçekleşen aşınmalarda da malzemelerin yüzeylerinde deformasyonlar oluşurken bazı durumlarda çalışmayacak kadar hasar

alabilirler. Bu durum genellikle birlikte çalışan malzemelerin birbirleriyle uyumsuz olması ya da malzemelerin yetersiz yağlanmaları sonucu meydana gelmektedir.

3.3. Aşınma Türleri

3.3.1. Adhesif (Yapışma) Aşınma

Kayma ya da yapışma aşınması olarak da isimlendirilen bu aşınma şeklinde düzgün yüzeyli iki katının yağlamalı ya da yağlamasız ortamlarda birbirleri üzerinde kaydırılması sonucu gerçekleşmektedir (Şekil 3.2). Katı cisimlerin yüzeylerinde bulunan pürüzlerin varlığı cisimlerin birbirlerini yapışmasını sağlar. Cisimlerin birbirleri üzerinde kaymasıyla yüzeylerindeki bu pürüzler kesilir. Yüzeylerden birinden kopan parçaların diğer yüzeye yapışması sonucu yüzeylerin aşınmasına neden olan bir partikül haline dönüşür (Korkut, 1997).



Şekil 3.2. Adhesif aşınma (Soydaş, 2006)

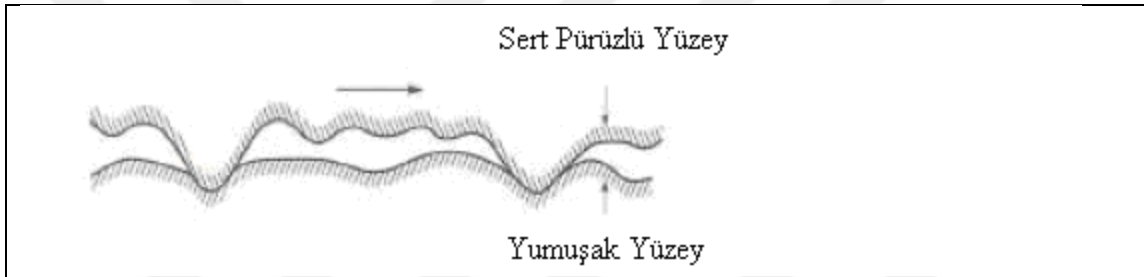
Tüm aşınma durumlarının önlenmesine rağmen cisimlerin temas yüzeylerinin kuru olması durumunda adhesif aşınma sürekli gerçekleşir (Palabıyık, 2013). Maddelerin sürtünme yüzeyleri ne kadar genişletilmeye çalışılsa da realitede durum görünürdeki sürtünme alanından daha küçüktür. Birbiri üzerinde hareket eden cisimlere yük uygulanması durumunda, cisimlerin temas noktalarında yüksek gerilmeler oluşur.

Cisimlerin birbirlerine sürtünmesiyle akma sınırı aşıldığında iki cisim arasında kaynak bağı oluşumu gerçekleşir. Cisimler üzerine yük ve sıcaklık uygulanması sonucunda kaynak bağlarının oluşum hızı artar. Hareketin devam etmesi durumunda malzemelerin yapışma noktaları veya kaynak bağları kopar ve cisimlerin temas yüzeylerinde hasarlar oluşur. Genellikle zayıf olan metallerde kırılmalar meydana gelmektedir (Osmanoğlu, 2012).

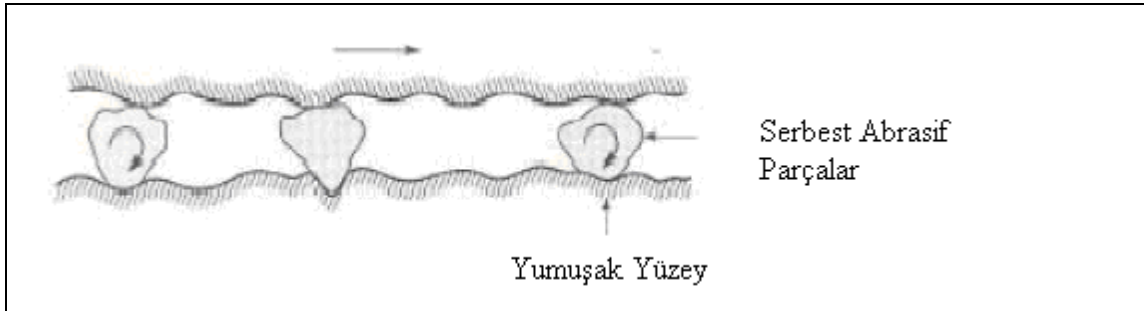
Literatürde var olan çalışmalar temas yüzeylerinde yağlama yapılmasının adhesif aşınmayı azalttığı; yük uygulama, kayma yolunu artırma ve sürtünen yüzeylerin sertliklerinin de arttırdığı belirlenmiştir.

3.3.2. Abrasif (Kazınma) Aşınma

Bu aşınma türünde, üst üste hareket eden iki metal yüzeyin pürüzlü olması ya da aralarına sert maddelerin kaçması sonucunda metallerin yüzeyinde hasar oluşumu gözlenir. Sürtünen metal yüzeylerinden birinin daha sert ve pürüzlü olduğu durumlar ile yüzeylerden en az birinden daha sert olan yabancı cisimlerin sürtünen metallerin arasına girmesi sonucunda meydana gelen durumlar abrasif aşınmaya neden olan durumlardır (Şekil 3.3-4) (Ünlü vd., 2003).



Şekil 3.3. Sert ve pürüzlü yüzeye sahip bir metalin yumuşak yüzeye sahip metalle etkileşmesi (Ünlü vd., 2003)



Şekil 3.4. Sürtünen iki metal arasına yüzeylerden en az birinden daha sert parçacıkların girmesi (Ünlü vd., 2003)

Abrasif aşınmayı arttıran unsurlar şunlardır (Çelikyürek, 2006);

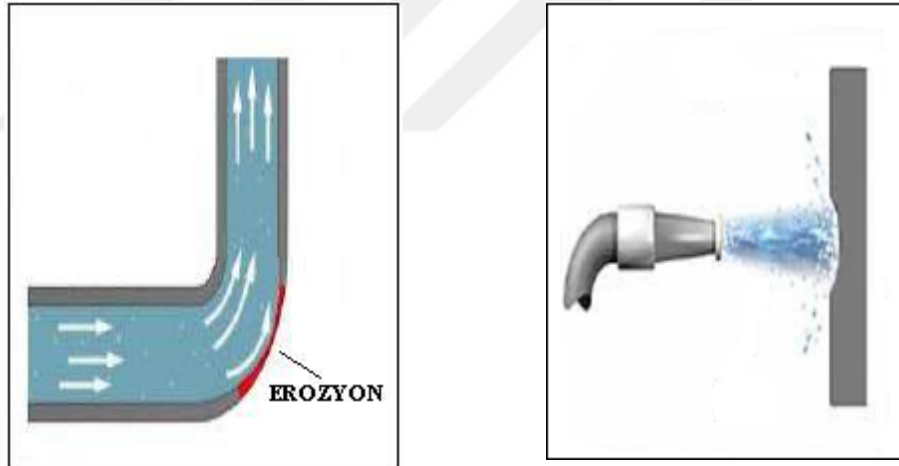
1. Sürtünen metallerin sertliklerinin artması
2. Ana yüzeyden daha sert, dayanıklı ve büyük boyutlu cisimler,
3. Azalan deformasyon sertleşme hızı,
4. Yabancı cisimler

3.3.3. Yorulma Aşınması

Maddelerin yüksek basınç altında tekrarlanarak sürtünmesi ile metallerin içyapısında meydana gelen çatlakların metal yüzeyine doğru büyüyerek ilerlemesi veya metallerin iç kısmındaki diğer çatlaklarla birleşerek malzemeden parça kopması şeklinde gerçekleşen aşınma türüdür. Bu aşınma türü, yüzeylerin kuruluşundan ya da yetersiz yağlanmasından dolayı meydana gelen hasarlardan farklı olup iyi yağlanmış yüzeylerde de görülebilmektedir (Akbulut, 2006). Pitting adı verilen bu aşınma türü genellikle rulman yataklarında, raylarda, dişli çarklarda ve sirkülasyon poMPalarında görülmektedir.

3.3.4. Erozyon Aşınması

Bu aşınma türü taşınan sıvı ya da gaz maddeler içerisine giren yabancı cisimlerin, akma sırasında temas ettikleri yüzeylere darbe etkisi uygulayarak yüzeyde hasar oluşturma şeklinde gerçekleşir (Şekil 3.5) (Özsaraç ve Durman, 2000).



Şekil 3.5. Erozyon aşınması mekanizması (Ay, 2012)

3.3.5. Korozyon Aşınması

Düşük korozyon aşınması ve yüksek korozyon aşınması olmak üzere iki türlü korozyon aşınması gerçekleşmektedir. Metal içerikli maddeler, yapılarında bulundurdıkları alaşım elementlerinin doğal yapısında çok az miktarda oksit tabakası bulunur. Metaller yapılarında bulunan bu oksit tabakası ile korozyon ortamlarının etkilerinden korunurlar. Metallerin yüzeyine sürtünen malzemeler, yükün ve sürtünmenin etkisiyle bu oksit tabakasının kalkmasına neden olurlar. Sürtünmelerin

tekrarlanması ve zaman içerisinde oksit tabakasını üreten elementin metal içerisinde yok olması sonucunda oksit tabakasının tekrar oluşumu mümkün değildir. Korozyonun metal yüzeyinde hasar oluşumuna sebep olduğu bu aşınma türüne “düşük sıcaklık korozyon aşınması” adı verilmektedir (Korkut, 1997).

Maden sektörü, kimya sektörü, metalurji sektörü, dizel motorlar ve diğer sanayi dallarında ise yüksek korozyon aşınması türü görülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda korozyon aşınmasına maruz kalan metallerin korozyon dirençleri ortamdan etkilenmekte ve aşağıdaki sekiz farklı şekilde aşınma görülmektedir (Kesti, 2009):

1. Oksitlenme
2. Metallerin toz haline gelmesi ve kireçlenmesi
3. Nitrürlenme
4. Halojen korozyonu
5. Sülfürleme
6. Tuz çökeleği korozyonu
7. Erimiş tuz korozyonu
8. Sıvı metal korozyonu

Korozyon aşınmasının görüldüğü ortamlar iki gruba ayrılır. Oksitleyici atmosfer, yanma odalarına oksijen taşımak amacıyla oluşturulan hava kanallarında, yüksek oranda O_2 molekülü bulunan moleküler oksijen konsantrasyonu ile oksijen aktivitesinin sağlandığı ortamlardır. Redükleyici atmosfer, oksijensiz ortamlarda yanma olayının gerçekleştirildiği ortamlardır (Korkut, 1997).

Oksitlenme, yüksek korozyon aşınma türlerinden en önemlisidir. Yüksek sıcaklıkta havada veya oksijen ortamında bulunan metallerin ve alaşımların yüzeylerinde oksit tabakası oluşumu artar. Oluşan oksit tabakası ile metalin genleşme katsayıları birbirlerinden farklıdır. Metallerin ve alaşımların doğal yapısında bulunan koruyucu oksit tabakası metalin içerisinde bulunduğu ortamdaki sıcaklık değişimlerinin etkisiyle kendi kendine dökülür ve tekrar yenilenir. Koruyucu oksit tabakasının kendini yenileyememesi durumunda metaller oksitlenir ve pul halinde dökülerek malzeme kaybına neden olur (Akbulut, 2006).

3.4. Aşınma Düzeyini Azaltan Unsurlar

1. Çalışılan ortamda görülmesi muhtemel olan aşınma türüne ve şiddetine karşı direnç gösterebilecek malzemeler seçilmelidir.
2. Metallerin geometrik tasarımları, aşınma durumları göz önünde bulundurularak yapılmalıdır.
3. Malzemelerin sürtünme yüzeyleri ya da dış yüzeylerinin tamamı asıl maddenin yapısından farklı olarak aşınmaya daha dayanıklı malzemelerle kaplanmalıdır.
4. Malzemelerin sadece aşınan yüzeylerinin aşınmaya dayanıklı malzemelerle kaplanması maliyet açısından daha uygun olmaktadır.
5. Malzemelerin yüzeylerinde görülebilecek kırık, çatlak, pürüzlülük ve cüruf kalması gibi imalat hatalarına karşı üretim aşamasında gerekli tedbirler alınmalıdır.
6. Malzemelerin kapasitelerine uygun basınç, sıcaklık ve hız değerlerinde kullanılması gerekmektedir.
7. Sıcaklık yağların viskozite değerlerini etkilemektedir. Bu sebepten ötürü viskozite indeksi büyük olan yağlarla metal yüzeylerinin yağlanması yüksek sıcaklık ve basınç değerleri altında bozulmasını önleyerek aşınmayı engeller. Yağların viskozite değerlerini yükseltmek amacıyla kullanılan katkı maddelerinin metallerin oksidasyon aşınmasına neden olduğu da göz önünde bulundurularak malzeme seçimlerine dikkat edilmelidir.
8. Çalışma ortamlarına uygun nitelikteki soğutucu seçimi aşınmayı azaltmaktadır.
9. Yağların ve soğutucu maddelerin filtrasyonu sağlanarak metallerin aşındırılmasına neden olan yabancı cisimlerden arındırılmalıdır.
10. Yağlayıcılar belirli bir kullanım ömrü olduğu için gerekli kontrolleri yapılmalı ve belirli periyotlarla değiştirilmelidir.
11. Korozyon aşınmalarında malzeme üzerindeki korozyon tabakasının belirli periyotlarla temizlenmesi, malzeme ömrünü uzatır (Yiğit vd., 2008).

3.5. Aşınma Ölçüm Metotları

3.5.1. Ağırlık Farkı Metodu

Aşınma miktarını tespit etmede en çok kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Bu yöntem ekonomik olması ve 10^{-4} veya 10^{-5} gram hassasiyete sahip teraziler kullanılarak ölçülebilmesi en çok tercih edilen yöntem olmasını sağlamıştır.

Aşınma miktarı, ağırlığın gram ya da miligram cinsinden alınması ve kayma yolunun de metre ya da kilometre cinsinden alınması ile belirlenmişse aşınma miktarı malzemede görülen kütle kaybının kayma yoluna oranlanmasıyla gr/km ya da mg/m cinsinden tespit edilir. Birim alandaki ağırlık kaybının hesaplanmasında da kütle kaybının toplam alana bölünmesiyle gr/cm^2 cinsinden tespiti yapılabilir. Ağırlık farkı hesaplamalarında (3.1) bağlantısı kullanılır (Yıldızlı vd., 2003).

$$W_a = \frac{G}{d.M.S} \quad (3.1)$$

W_a : Aşınma miktarı (mm^3/Nm)

G : Ağırlık kaybı (gr)

M : Uygulanan Kuvvet (N)

S : Kayma mesafesi

d : Aşınan malzemenin yoğunluğu (gr/mm^3)

3.5.2. Kalınlık Farkı Metodu

Bu yöntemde cismin aşınmadan önceki boyutları ile aşınma işlemine maruz kaldıktan sonraki boyutları ölçülerek karşılaştırılır. Bu yöntemde cismin aşınmadan önceki hacmi ile aşınma işleminden sonraki hacmi tespit edilerek karşılaştırılır ve birim hacimdeki aşınma oranı tespit edilir. Hacim ölçümlerinde $1\mu\text{m}$ duyarlılığa sahip cihazlar kullanılmalıdır. Sistem durdurulmadan da cismin boyutlarında meydana gelen değişimler mekanik, optik ve elektronik cihazlar yardımıyla tespit edilebilmektedir (Neşeli, 2005).

3.5.3. İz Değişimi Yöntemi

Plastik deformasyon ile malzemenin sürtünen yüzeyinde geometrik şekli belli olan bir iz oluşturulur. Deney süresince bu izin boyutlarında meydana gelen değişimler tespit edilir. Vickers ve Brinell en çok kullanılan sertlik ölçme aletleridir. Bu aletlerdeki bilyenin ya da elmas piramidin oluşturduğu izin çapındaki değişimler mikroskopla gözlenerek ölçüm gerçekleştirilir (Öztürk ve Arlı, 2009).

3.5.4. Radyoizotoplar İle Ölçme

Bu sistemin işleyiş şekli, malzemelerin sürtünme yüzeylerinin, proton, nötron veya elektronlar kullanılarak radyoaktif hale getirilmesidir. Bu ölçüm sisteminin avantajı aşınma miktarını çok hassas bir şekilde ölçebilme ve çalışma koşulları değiştirilmeden ölçü alınabilmesidir. Yüksek maliyetli olması özel durumlar dışında kullanılmasını engellemektedir (Yücel, 2009).

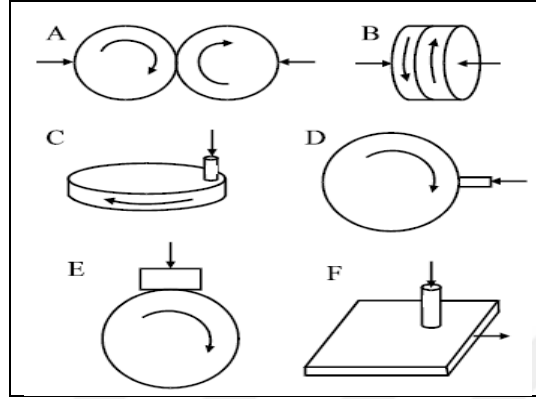
3.5.5. Bilgisayar Destekli Ölçme

Bu ölçüm tekniğinde aşınma miktarına ilişkin değerler, pim disk aşınma belirleme sistemine entegre edilen sensörler yardımıyla tespit edilmektedir. Malzemenin aşınma miktarı ve sistemin sürtünme katsayısı A/D-D/A kartları vasıtasıyla bilgisayara aktarılır. Çeşitli yazılımlarla elde edilen değerler grafiklere dönüştürülebilir, farklı hesaplamalar yapmak amacıyla kullanılabilir ve istatistiksel analizler yapılabilir (Yıldızlı d., 2003).

3.6. Aşınma Deneyleri ve Yöntemleri

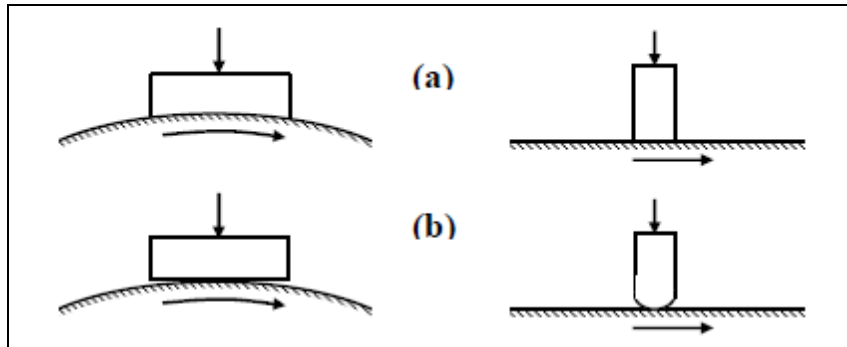
Günümüzde bilimsel çalışmalarda birçok deneysel düzenek yardımıyla aşınma tespiti yapılmaktadır. Laboratuvar ortamında yapılan aşınma çalışmaları, aşınma mekanizmalarının incelenmesini, gerçek aşınma ortamın simüle edilmesi ve aşınma miktarı ve sürtünme katsayısı tespiti için elde edilmesi gereken verilerin tespit edilmesini sağlar. Aşınma deneylerindeki amaç aşınmayı etkileyen unsurların tespitini yaparak, bu unsurları kontrol altına almaktır. Sürtünmeyi ölçmek için kullanılan araca tribometre adı verilmektedir (Arslan, 1996). Şekil 14'te aşınma tespitinde kullanılan bazı araçlar verilmiş olup iki metot kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Birinci metot, aynı maddeden yapılan malzemelerin farklı kayma yüzeylerinde farklı aşınma oranları

gösterdiği asimetrik düzendir. Aşınma deneylerinde pek tercih edilmeyen simetrik düzen Şekil 14'teki A ve B örneklerinde görüldüğü gibi gerçekleştirilir. Simetrik düzende ya malzemeler çevreleri boyunca (A) veya yüzeyleri boyunca dönen iki bilezik veya iki disk ile birlikte temas halinde bulunurlar (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Farklı geometrik şekillerde kayma aşınması mekanizmaları (Çiçek, 2011)

Aşınma çalışmalarında en çok tercih edilen metotların başında bir disk üzerine bastırılan pim yöntemi gelmektedir. Bu yöntemde pim diskin düz yüzeyine (C) veya kenarına (D) bastırılmaktadır. Bu düzende pim ya bilezik çevresine ya da düz bir zemine temas ettirilir. Pimin yüzey ile teması ya belirli bir alanla temas edecek şekilde ya da bir nokta veya çizgi üzerinde temas edecek şekilde yapılmaktadır (Şekil 3.7) (Özsaraç ve Durman, 2000).



Şekil 3.7. Pimin yüzeye temas şekilleri (Taşgın, 2007)

Aşınma miktarı kayma hızına, kayma yoluna ve uygulama süresine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Sürtünme enerjisinin yüzeye dağılımını ve maddenin iç yüzeyinin sıcaklığını kayma hızı etkilemektedir. Aşınma hızının iki katına çıkarılıp aşınma süresinin yarıya düşürüldüğü deneyde elde edilen sonuçlarla normal hız ve sürede yapılan aşınma deneyinin sonuçları farklı olur. Aşınma mekanizmalarında kayma

hızında ve kayma oranında ani farklılıklar gelişebilir. Kayma yüzeylerinin etkileşim yüzeylerinde oluşan basıncın da aşınma üzerinde etkisi bulunmaktadır. Aşınma üzerinde etkili olan bir diğer husus numunelerin boyutlarıdır. Boyları farklı olan numunelerden uzun numunede oluşan aşınma hasarı, kısa numunede oluşan aşınma hasarından daha fazla olmaktadır (Ağlan vd., 2004).

Aşınmayı yük miktarı, temas yüzeyi, kayma hızı ve test süresi dışında etkileyen farklı unsurlar da bulunmaktadır. Aşınma deneylerinde diğer unsurların da göz önünde bulundurularak gerekli değerlendirmelerin yapılması gerekmektedir. Malzemenin fiziksel özelliklerini ve yağlamada kullanılan yağın viskozitesini etkilediğinden dolayı sıcaklık da aşınma üzerinde etkili olan faktörlerden birisidir. Aşınma üzerinde etkili olan diğer faktörlerden biri de atmosferik unsurlardır. Nemlilik ve oksijen miktarı atmosferik unsurlar malzemelerin aşınma miktarını etkilemektedir (Özden, 2011).

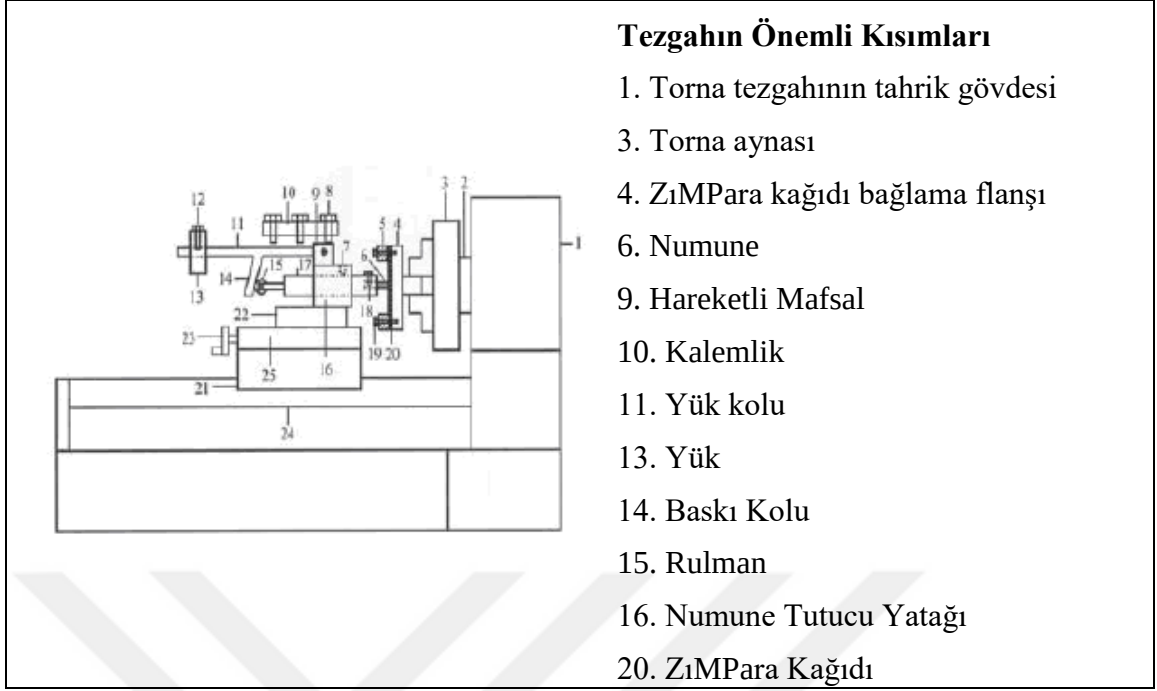
3.7. Aşınma Deneylerinde Kullanılan Cihaz Türleri

Karpit bileşiklerinin aşınma davranışlarını incelemek amacıyla Klaasen ve Kübarsepp adlı iki bilim adamı deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu bileşikleri Şekil 16'da gösterilen ASTM G65-94 markalı deney cihazını kullanarak aşındırmaya çalışmışlardır. Abrasif aşınma ve disk üstü blok deneylerini bu cihaz ile gerçekleştirmek mümkün olmaktadır (Şekil 3.8) (Klaasen vd., 2006).



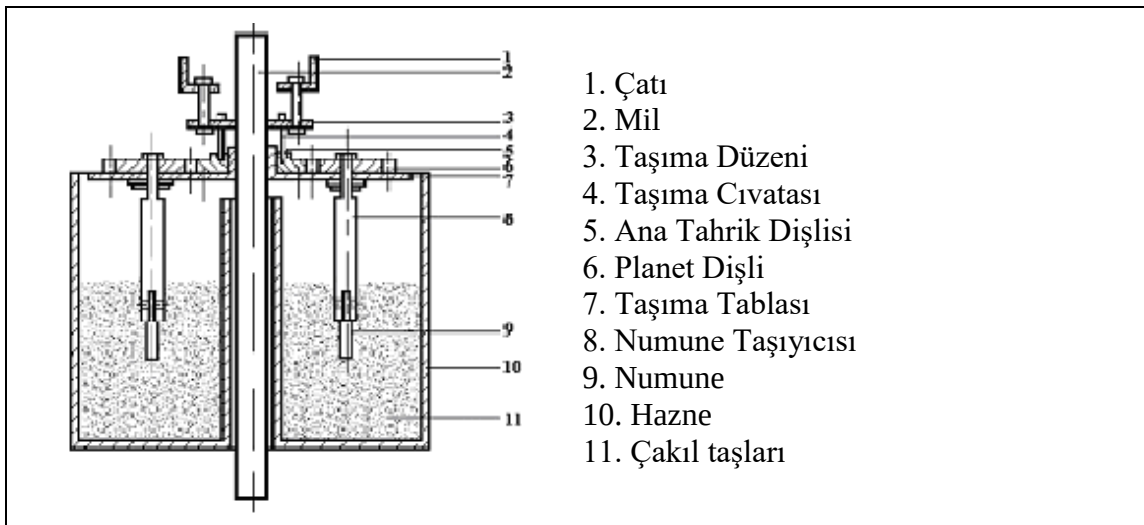
Şekil 3.8. ASTM G65-94 abrasif aşınma cihazı (Klaasen, 2006)

Taşgın ve Kaplan'ın dubleks döküm tekniğiyle ürettikleri FeCrC ilaveli malzemenin Şekil 17'deki cihazı kullanarak abrasiv aşınma deneyini gerçekleştirmişlerdir. Bu cihaz genel olarak bir torna tezgahına monte edilmiş parçalardan ve ölçüm cihazlarından oluşmuştur (Şekil 3.9) (Taşgın ve Kaplan, 2007).



Şekil 3.9. Abrasif aşınma cihazı (Taşgın ve Kaplan, 2007)

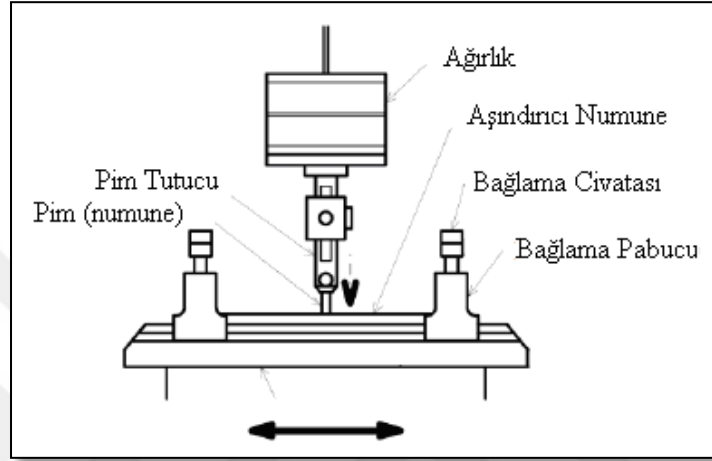
Sarı ve Yılmaz'ın çalışmalarında kullandıkları numunenin abrasif aşınma davranışlarını incelemek amacıyla kullandıkları cihazın şematik görüntüsü Şekil 18'de gösterilmiştir. Bu cihazda, numuneleri aşındırmak amacıyla 820 Knopp'luk sertlik değerine sahip çakıl taşları kullanılmaktadır. Bu cihazın çalışma prensibi dönme-karıştırma sistemidir. Haznede bulunan çakmak taşları, dişli mekanizması yardımıyla mil ekseninde ve kendi ekseninde dönerek zaman içerisinde numunelerin aşındırılmasını sağlamaktadır (Şekil 3.10) (Sarı ve Yılmaz, 2000).



Şekil 3.10. Aşındırıcı parçacıklı aşınma cihazı (Sarı ve Yılmaz, 2000)

3.7.1. Pin on Flat (Düzlem Üzeri Çubuk) Cihazı

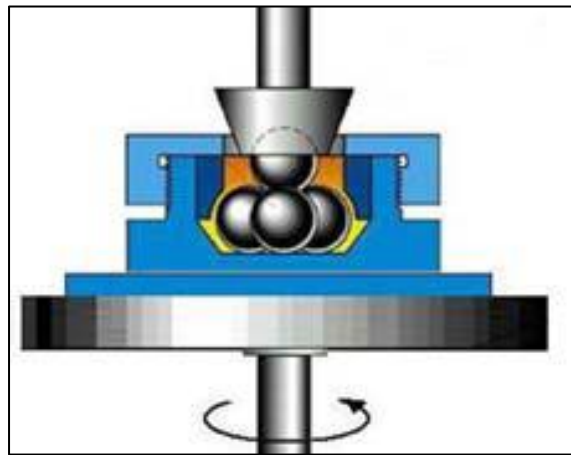
Yatay bir düzlem üzerine tutturulan numune, sabit bir çubuğa monte edilmiş aşındırıcıya, yatay düzlemin git-gel hareketiyle sürtünmesi sağlanır. Bazı cihazlarda bu hareketi hem düzlem hem de çubuk gerçekleştirir. Çubuğun ucundaki aşındırıcı bir küre, yarım küre veya düz bir silindir şeklinde geometrik bir yapıya sahip olabilir (Şekil 3.11) (Taşgın ve Kaplan, 2007).



Şekil 3.11. Pin on Flat cihazı (Taşgın ve Kaplan, 2007)

3.7.2. Dört Top Deney Cihazı

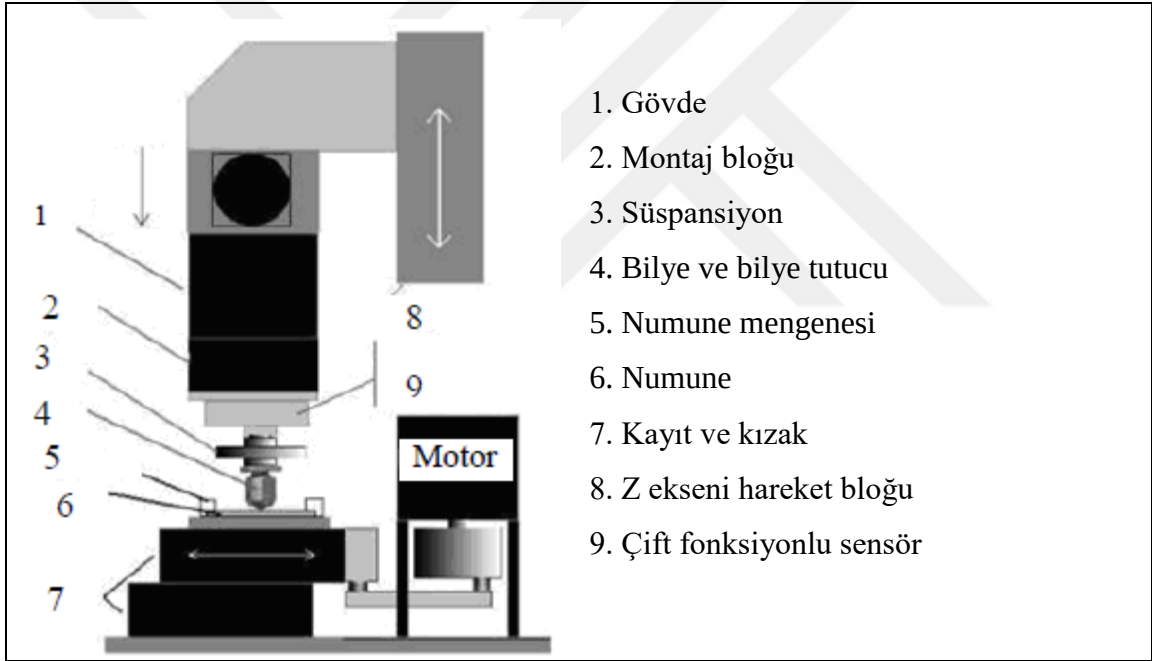
Dört toptan oluşan bu sistemde alttaki üç top birlikte dönerken üstteki topa doğru hareket etmeye çalışırlar. Üstteki top alttaki toplara aşağıya doğru bir kuvvet uygular. Bu cihaz, malzemenin aşınma davranışından ziyade yağlama durumu değerlendirilmesi amacıyla kullanılmaktadır (Şekil 3.12) (Soydan ve Ulukan, 2003).



Şekil 3.12. Dört Top Deney Cihazı (Anonim, 2013)

3.7.3. Ball on Flat (Düzlem Üzeri Bilye) Cihazı

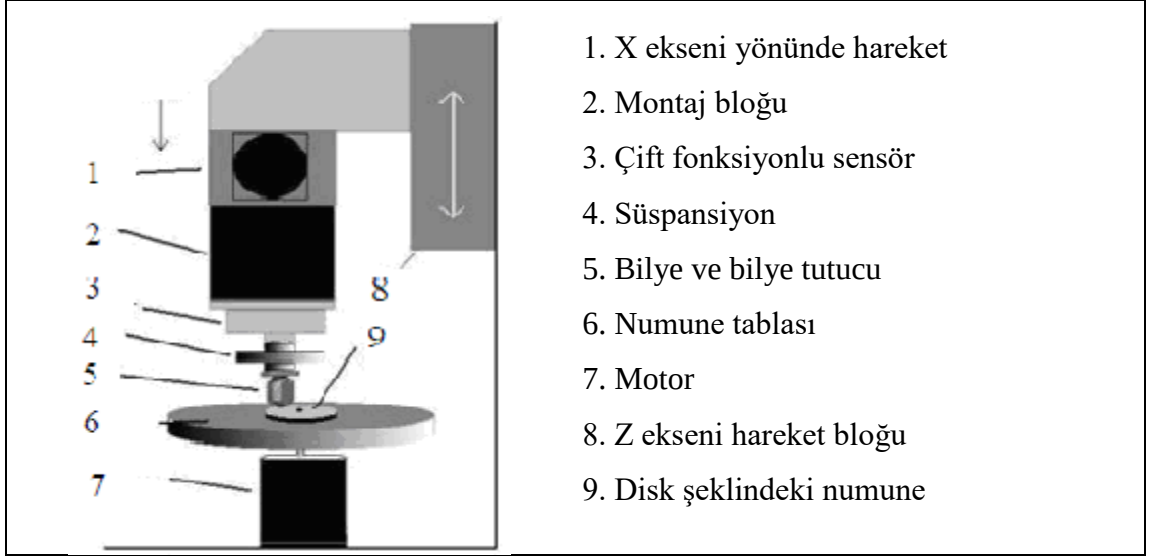
Numunenin üzerine konulan bir düzlemin, ucunda bir bilye bulunan ve yuvarlanma özelliği bulunan çubuk altında belirli bir basınçla hareket etmesi sistemiyle çalışan bu sistemde, bilye belirli bir basınçla numune üzerinde yuvarlanma hareketi yapmaktadır. Bu cihazla aşındırma deneylerinin yanı sıra sürtünme deneyleri de gerçekleştirilebilmektedir. Numunenin üstüne oturtulduğu düzlem bir motorun uyguladığı dairesel hareketler ile ileri-geri hareketi yapabilmektedir. Bir çubuk üzerinde bağlanan çeşitli çaplara sahip küreler belirli bir basınç uygulayarak levha üzerindeki numune üzerinde kayma hareketi yapmaktadır. Bu cihazda aşınma miktarını etkileyen unsurlar bilyenin uyguladığı basınç, ileri-geri hareket mesafesi, hareket devri, sıcaklık ve test süresidir (Şekil 3.13) (Neşeli, 2005).



Şekil 3.13. Ball on Flat cihazı (Bayrak, 2002)

3.7.4. Ball on Disk (Disk Üzeri Bilye) Cihazı

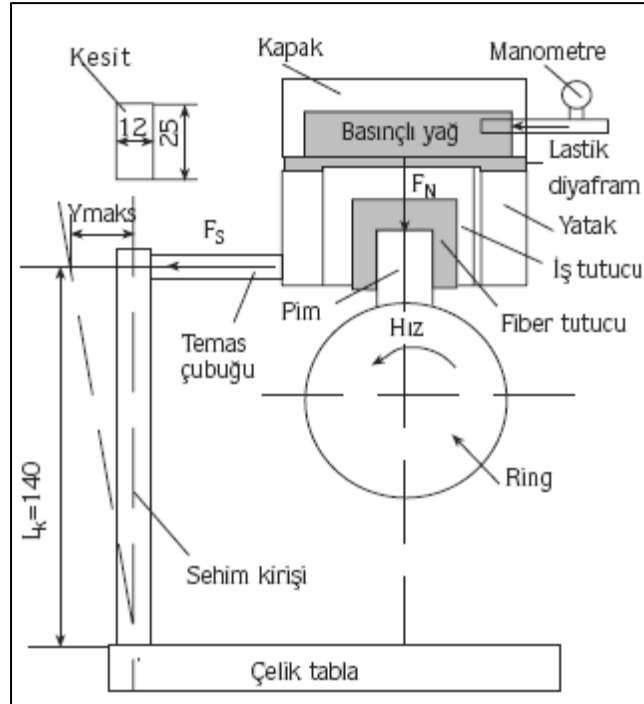
Pin on disk cihazının çalışma prensibine benzer bir sistemle çalışan bu cihazda disk şeklinde kesilen numuneye, cihazın uç kısmına bağlı bir kürenin belirli bir yük uygulayarak kayma hareketi yapar. Cihazda bir motor tarafından kendi ekseninde döndürülen disk şeklindeki numune dönerken, uç kısımdaki bilye X ve Y eksenleri yönünde hareketler yaparak numune üstünde belirli bir basınçla kayma hareketi yapar (Şekil 3.14) (Blau ve Budinski, 1999).



Şekil 3.14. Ball on disk cihazı (Eryürek, 1993)

3.7.5. Pin on Cylinder (Silindir Üstü Çubuk) Cihazı

Bu cihazın çalışma prensibi de pin on disk cihazıyla benzerlik göstermektedir. Pin on disk cihazından farkı, numunenin dönen silindir üzerine dik bir şekilde yerleştirilmesidir. Yani pin on disk cihazında çubuk sabit tutulup numune hareket ettirilirken bu cihazda numune sabit tutulup, aşındırıcı disk hareket etmektedir (Şekil 3.15) (Evin ve Aksoy, 1999).

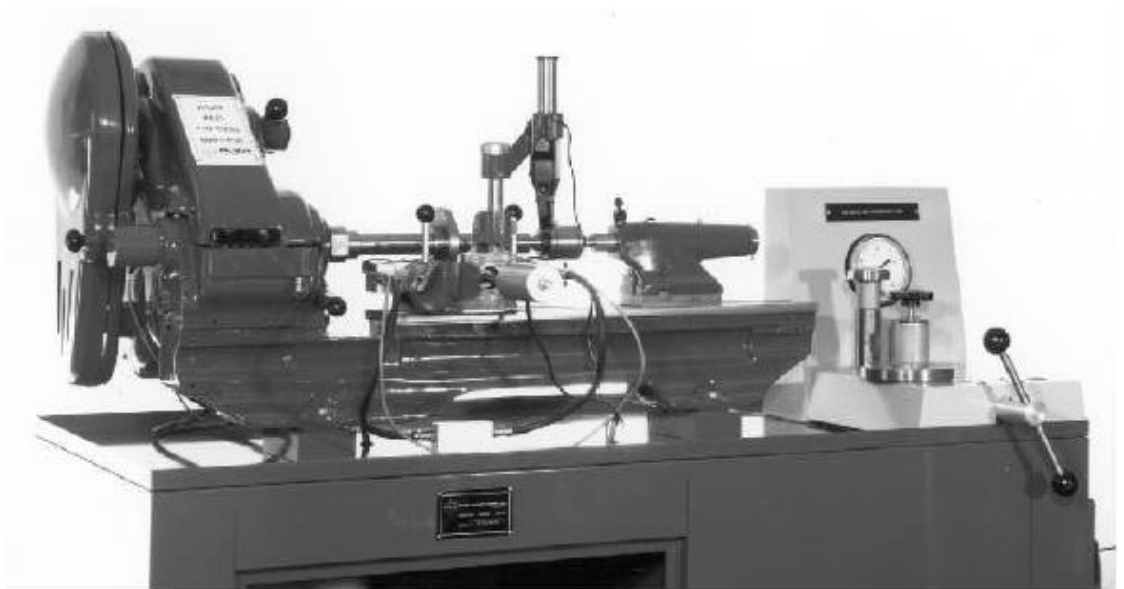


Şekil 3.15. Pin on Cylinder cihazı (Blau ve Budinski, 1999)

3.7.6. Plint TE 97 Cihazı

Hem sürtünme katsayısını hem de aşınma davranışlarını belirlemeyi sağlayan bu cihaz Dr. Mcihael Plint ve Prof. Druncan Dowson tarafından tasarlanmış bir cihazdır (Koymatcık, 2012).

Maddelerin aşınması ve sürtünmesi üzerine geçmişten beri sürekli çalışmalar yapılmıştır. Tarihte insanoğlu tahıllarını öğütmek için kullandıkları makinelerin parçalarının aşınmasını ve sürtünmesini azaltmak ve büyük kütleli yüklerin daha az kuvvet uygulanarak hareket ettirebilmek amacıyla yağlardan faydalanmışlardır. Bilgi ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte endüstriyel üretime geçilen çağımızda teknolojik cihazların ömürlerinin uzaması ve maliyetin düşürülmesi amacıyla sürtünme ve aşınma konusu oldukça önemsenen bir konu olmuştur. Günümüzde üretim alanında kullanılan birçok pahalı teknolojik cihazın sürtünme ve aşınma sebebiyle arıza vermekte ve işletmelere büyük ekonomik zararlar vermektedirler. Metallerin aşınma ve sürtünme davranışlarını belirlemeyi sağlayan birçok cihaz bulunmasına rağmen TE 97 model cihaz, aşınma ve sürtünme olaylarını, kuru ve yağlı kaymayı, birden fazla parçalı kaymaları ve aşınmaya neden olan parçaların yapışıp kopma özelliklerini incelemek amacıyla üretilmiştir. Bu cihazlara farklı aparatlar bağlanarak farklı deneyler gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 3.16) (Akpınar, 2009).



Şekil 3.16. TE-97 aşınma cihazı (Arslan, 1996)

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmanın amacı, hızlı tren hatlarında rayların aşınmadan önce ve sonraki S serisi ray çeliğinin atomik içyapısını ve yüzey pürüzlülüğünün ileri metalografik araştırma (X-ışınları, sem ve optik mikroskop ve noktasal analiz gibi) teknikleri kullanılarak mikro yapılarının incelenmesidir. Ayrıca diğer malzemelerle kıyaslamanın yapılması, aşınan ray çeliğinin mukavemetini artırıcı önlemlerin belirlenmesi ve kullanılan S serisi ray çeliklerinin aşınmaya daha kararlı bir yapıya sahip ve daha uzun ömürlü olması ilave olarak üretimde de daha verimli hale getirilmesi amaçlanmaktadır.

Bu araştırmada ülkemiz tren yollarında kullanılan R260 kalite S49 ray çeliği kullanılmıştır. Ray numunesi Adana ili Makine İkmal Müdürlüğü'nden temin edilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. S49 ray çeliği numunesi

S49 ray çeliğinin spektral analizleri EDX3600B markalı spektrometre cihazı kullanılarak numunenin kimyasal birleşiminde bulunan elementlerin oranları tespit

edilmiştir. S49 çeliğinin yapısında bulunan elementler ve oranları Tablo 3’te verilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Numunelerin spektral analizlerinin yapıldığı EDX3600B cihazı

Tablo 4.1. Deney numunesi olarak kullanılan R260 kalite S49 çeliğinin kimyasal bileşenleri ve oranları

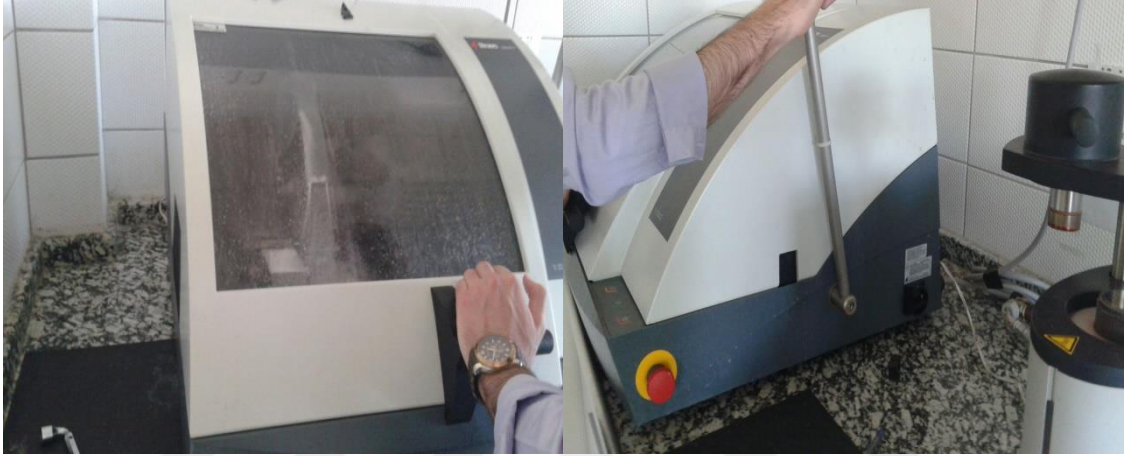
Kimyasal Bileşenler (%)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
0,7012	0,3314	0,9235	0,0129	0,0117	0,0329	0,1108	0,0001	97,8755

Tablo 4. Aşındırıcı disk çeliğinin kimyasal bileşenleri ve oranları

Kimyasal Bileşenler (%)				
C	Fe	Mn	P	S
0,085	99,9	0,006	0,004	0,005

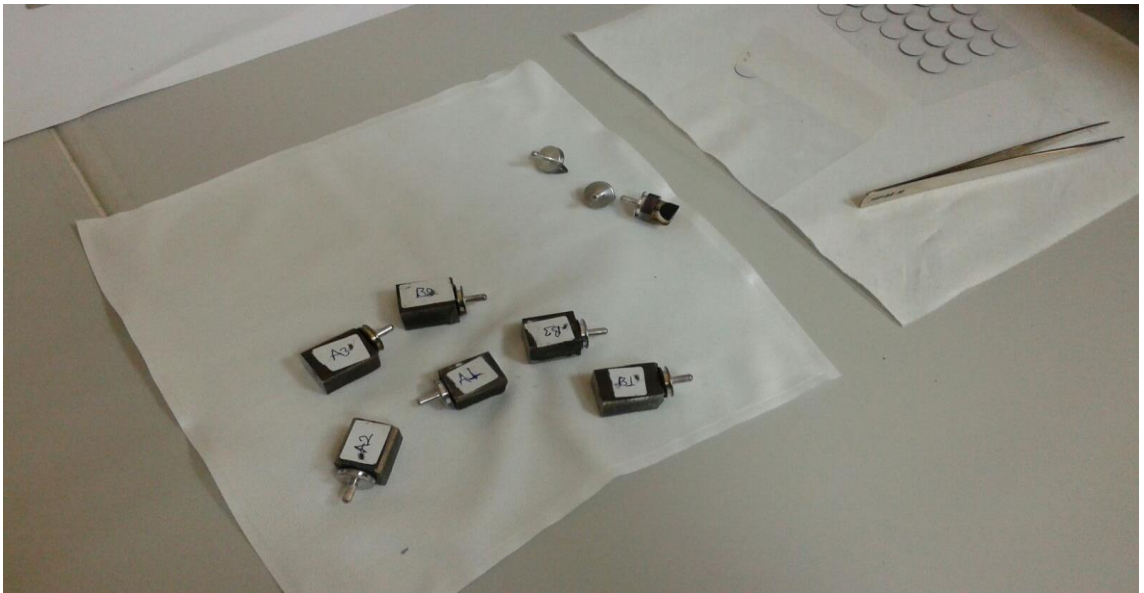
4.1.1. Numunelerin Hazırlanışı

Elimizdeki S49 çeliğinden yapılmış ray numunesi öncelikle 50x10x20 mm çaplarında CNC kesimi yardımıyla numuneler elde edilmiştir. Elde edilen numuneler SEM, EDAX ve Optik Mikroskop cihazlarına girebilecek boyutlara getirilmek için Fırat Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Struers Discotom marka metalografik numune kesme cihazı ile 15x10x10 mm ebatlarında kesilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Struers Discotom Marka metalografik numune kesim cihazı

Toplamda aşınma için A1-A2-A3, B1-B2-B3, C1-C2-C3 olmak üzere toplamda 9 numune, metalurjik çalışmalar için 4 numune ve ısıtıl işlem için 3 numune olmak üzere toplamda 16 numune kullanılmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Kullanılan numune örnekleri

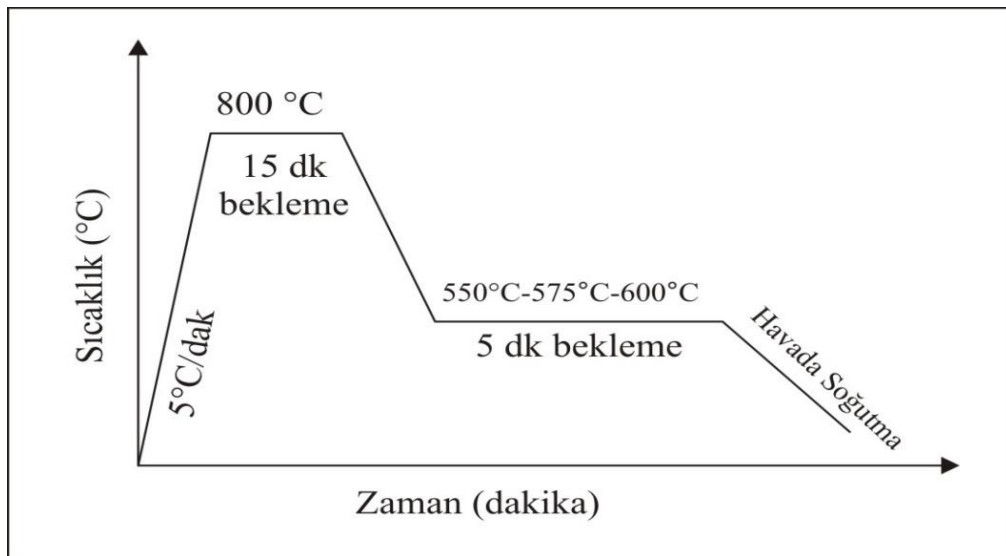
4.2. Isıl İşlem

Kesilen numunelerin 3 tanesi, Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan Elektromag marka ve M1914 model fırın kullanılarak ısıtılma maruz bırakılmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Isıl işlem basamaklarında kullanılan fırın

Isıl işleme maruz kalan 3 numune $5^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ hızda sıcaklığı 800°C 'ye ulaşınca kadar bekletilmiş ve 15 dakikalık östenitleme işlemine maruz bırakılmıştır. Bu işlemle ray çeliklerinin içeriğinde bulunan sementit parçalanarak, karbon içerisinde çözünmüştür. Östenitleme işleminin akabinde numuneler, $5^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ hızında sıcaklıkları 550°C , 575°C ve 600°C 'ye kadar arttırılmış ve bu sıcaklıklarda 5 dakika sürede fırında bekletilmiş ve havada soğutularak ısıtılma işlemi tamamlanmıştır. Isıl işlem basamaklarını gösteren grafik Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. S49 ray çeliği numunelerine uygulanan ısıtılma işlem basamaklarının şematik gösterimi

4.3. Metalografik İşlemler

Araştırmamızda kullandığımız numunelerin parlatma ve Nital dağlama işlemleri Elazığ ili Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren Mert Döküm firmasının atölyesinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin zımparalama işlemleri Bulupol marka cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Numunelerin zımparalanması işlemi

Metalografik işlemlerde kullanılmak üzere ısıtılmış ve ısıtılmış işlem görmemiş numuneler olmak üzere iki grup numune oluşturulmuştur. Öncelikle numuneler alkolle temizlendikten sonra ısıtılmış işlem görmüş ve işlem görmemiş numuneler 80µ, 220µ, 400µ, 600µ, 800µ ve 1000µ'lik zımparalarda geçirilmiş (Şekil 4.7), görüntü elde edilene kadar cıva ve kadife ile parlatılmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Numunelerin parlatılması işleminde kullanılan zımparalar



Şekil 4.9. Numunelerin cıva ve kadife kullanılarak parlatılması işlemi

Görüntü elde edildikten sonra hem ısıl işlem görmüş numuneler hem de ısıl işlem görmemiş numuneler %3'lük nital ile dağlanmıştır (Şekil 4.9).



Şekil 4.10. Numunelerin dağlanması işleminde kullanılan nital çözeltisi

Dağlama işleminden sonra ısıl işlem gören parlatılmış numuneler, ısıl işlem görmeyen parlatılmış numuneler ve nital ile dağlanan numunelerin görüntüleri optik mikroskop ile alınmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.11. Numune incelemesinde kullanılan optik mikroskop

4.4. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) İncelemeleri

Aşındırılan numuneler ve nital ile dağlanan ısıtıl işlem görmüş numuneler ve ısıtıl işlem görmeyen numuneler Çukurova Üniversitesi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan FEI Quanta 650 Field Emission markalı SEM cihazı kullanılarak 500X, 1000X, 2000X, 3000X, 5000X ve 10000X'lik Şekilleri alınmış ve mikroyapıları incelenmiştir. Ayrıca aşınmamış numunelerin SEM görüntüleri ile aşınmış numunelerin SEM Şekilleri alınarak karşılaştırmaları yapılmıştır (Şekil 4.11).



Şekil 4.12. Numunelerin mikroyapı incelemesinde kullanılan SEM cihazı

4.5. EDS (Energy Dispersive Spectrograf) Noktasal Analiz Çalışmaları

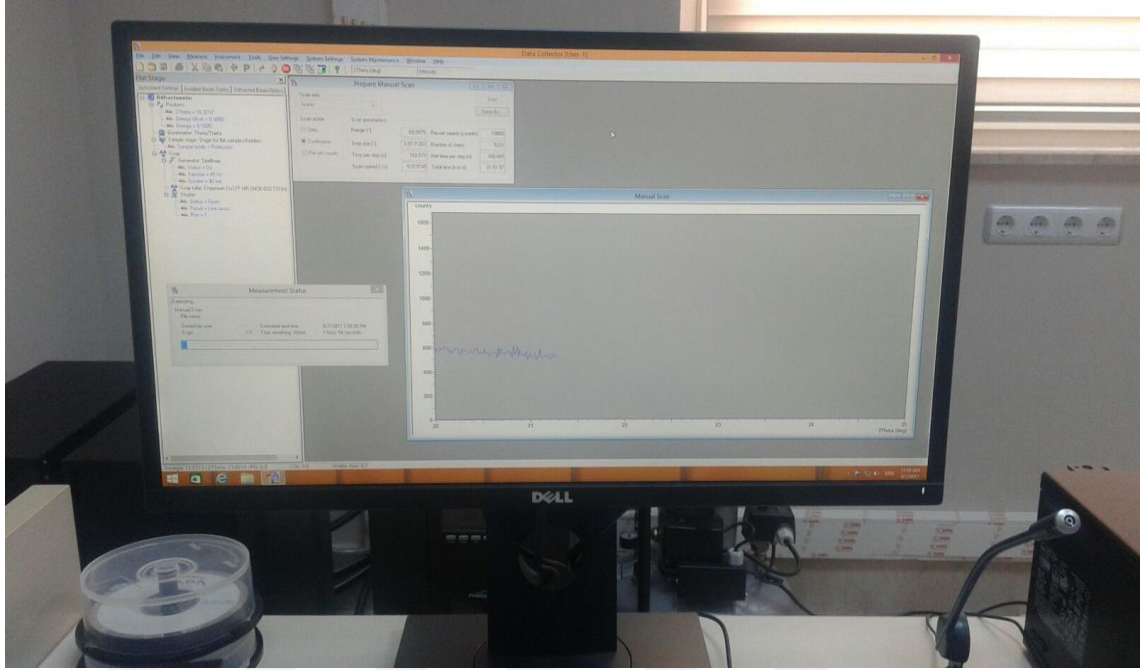
EDS, SEM mikroskopunda bulunan bir ünite olup, numunelerin mikroyapılarında meydana gelen değişimlerin ve tanımlanamayan farklı oluşumların noktasal analizlerinin yapılarak pik görüntülerinin alınması amacıyla kullanılmıştır. Araştırmamızda C3 aşınmış numunesi ve ısıtılmış numunelerimizin EDS noktasal analizi Çukurova Üniversitesi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan FEI Quanta 650 Field Emission markalı SEM cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.12).

4.6. XRD (X-Ray Diffraction) Çalışmaları

Isıtılmış ve ısıtılmamış numunelerin mikroyapılarının daha hassas incelenebilmesi amacıyla Çukurova Üniversitesi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan PANalytical EMPYREAN marka XRD cihazı kullanılmıştır (Şekil 12). Numunelerin görüntüleri 20° - 90° 'lik frekans hızında alınmıştır. XRD cihazından elde edilen verilerle XRD grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Mikroyapı incelemesinde kullanılan XRD cihazı



Şekil 4.14. XRD cihazındaki verilere göre XRD grafikleri oluşturma

4.7. Aşınma Deneyleri

CNC tezgahında küçük parçalara ayrılan numuneler metalografik numune kesme cihazında 15x10x10 mm boyutlarında kesildikten sonra numune üzerinde bulunan çapakların ve diğer kalıntıların giderilmesi amacıyla 400 mesh'lik zımpara kullanılarak zımparalanmış ve alkol ile temizlenip kurutulmuştur (Şekil 4.15).



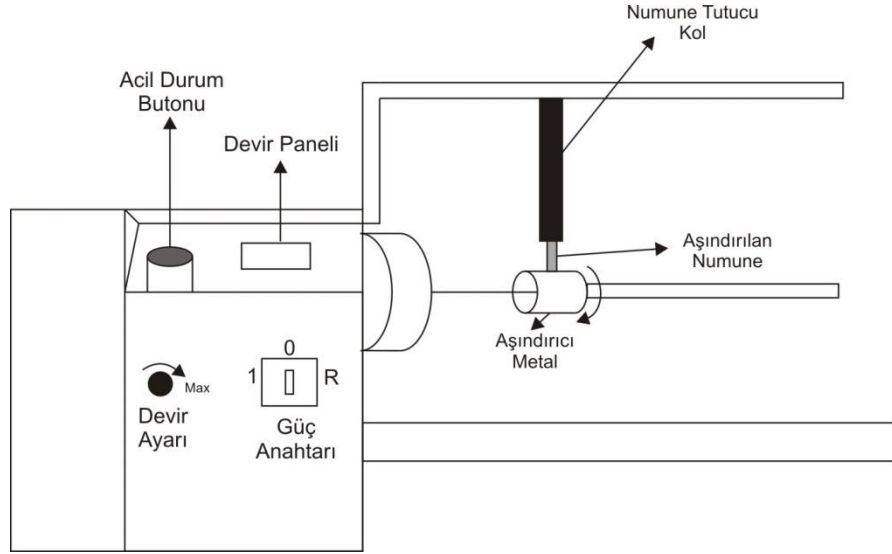
Şekil 4.15. Aşındırılacak numunelerin çapaklarını giderme ve alkol ile temizleme

Numunelerin aşındırılma deneyleri Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan JET BD-7 marka Çin yapımı aşındırma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.15).

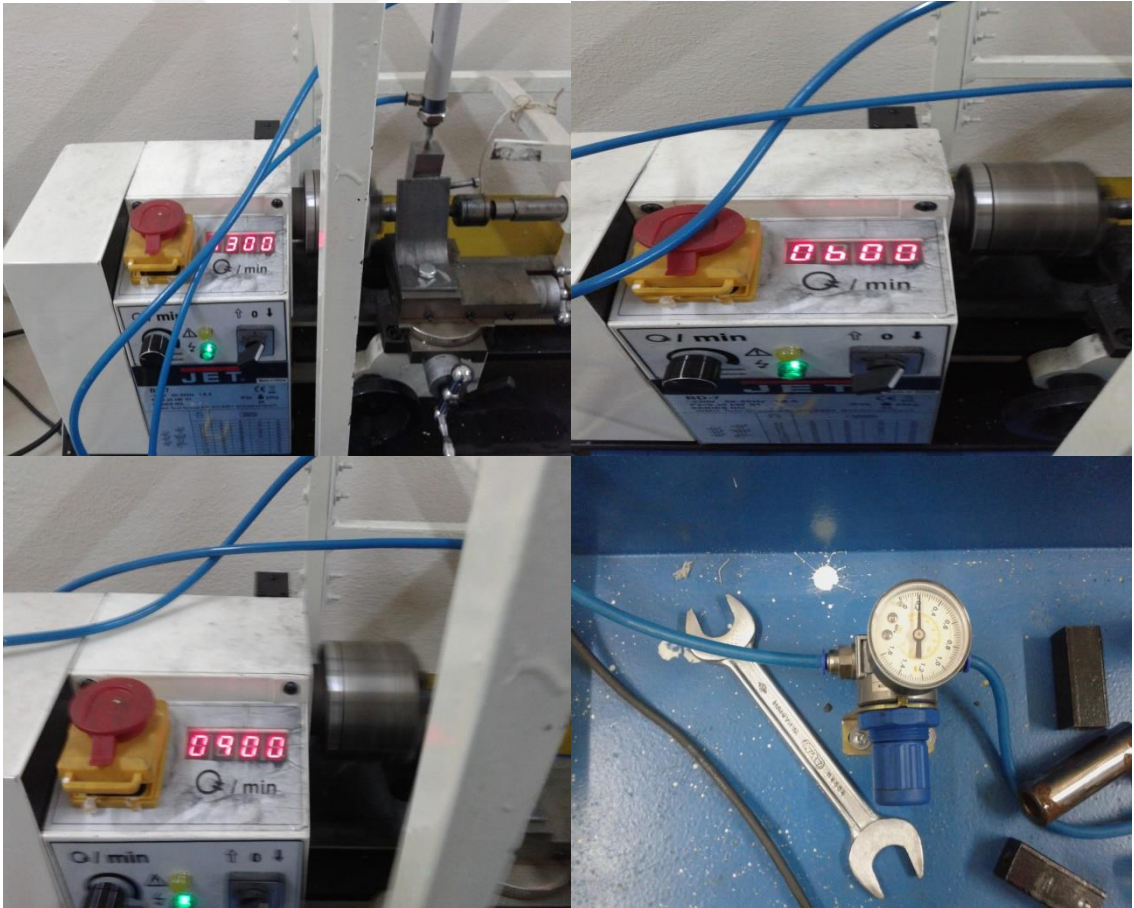


Şekil 4.16. Aşındırma deney cihazı

Aşınma testleri yapılırken 10 MPa yük ve 10 dakikalık periyotlarda, A1 numunesi 300 devir/dakika kayma hızında, A2 numunesi 600 devir/dakika kayma hızında ve A3 numunesi 900 devir/dakika'lık kayma hızında aşındırılmıştır. Yine 20 MPa yük ve 10 dakikalık periyotlarda B1 numunesi 300 devir/dakika, B2 numunesi 600 devir/dakika ve B3 numunesi 900 devir/dakika'lık kayma hızlarında aşındırılmıştır. 30 MPa basınç ve 10 dakikalık periyotlarda ise C1 numunesi 300 devir/dakika, C2 numunesi 600 devir/dakika ve C3 numunesi de 900 devir/dakika'lık kayma hızında aşındırılmıştır (Şekil 4.16).



Şekil 4.17. Plint TE97 aşındırma cihazının şematik görünümü



Şekil 4.18. Numunelerin aşınma devir ve yük parametreleri

Numuneler aşınma testine tabi tutulmadan önce hassas terazide tartılmış ve sonuçlar kaydedilmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.19. Numunelerin aşınma testi öncesi kütle tespitinin yapılması

Numuneler aşınma mesafeleri 2000, 4000 ve 6000 metre olup, numuneler aşındıktan sonra üzerinde kalan parçacıklar temizlenmiş ve Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan 0,01 mg duyarlılığa sahip GR 200 hassas terazisinde tartılarak aşınma sonucunda meydana gelen kütle kaybı hesaplanmıştır (Şekil 4.18).

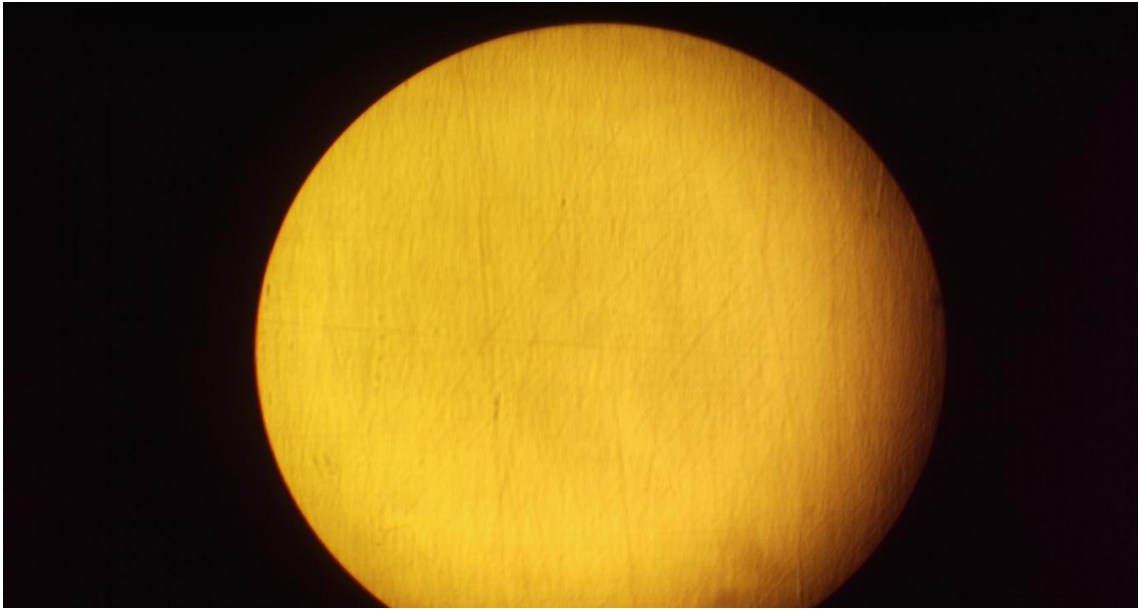


Şekil 4.20. Aşınan numunelerin kütle kaybını ölçmede kullanılan hassas terazi

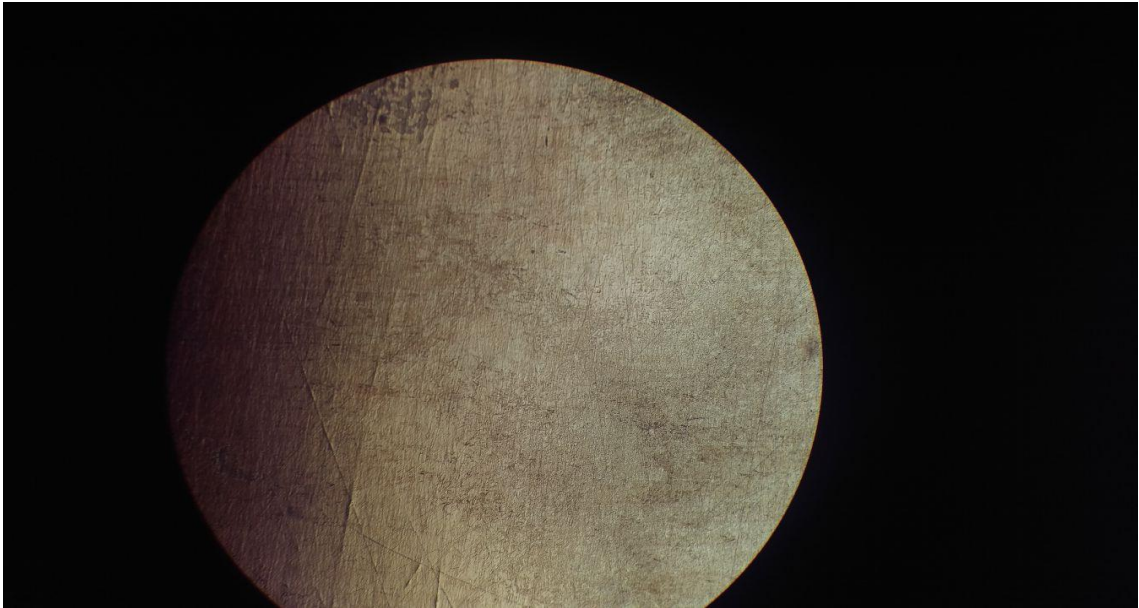
5. DENEY SONUÇLARI

5.1. Mikroyapı Sonuçları

Araştırma kapsamında incelenen numunelerin mikroyapı görüntüleri optik mikroskopta çekilmiştir. Araştırma kapsamında incelenen numunelerden ısıtıl işlem uygulanan ve ısıtıl işlem uygulanmayan numuneler, zımparalanıp alkol ile temizlendikten sonra cıva ve kadife kullanılarak parlatılmış görüntüler alınmıştır. Sonrasında numuneler %3'lük nital dağlama yapıp optik mikroskoptaki görüntüsü alınmıştır.

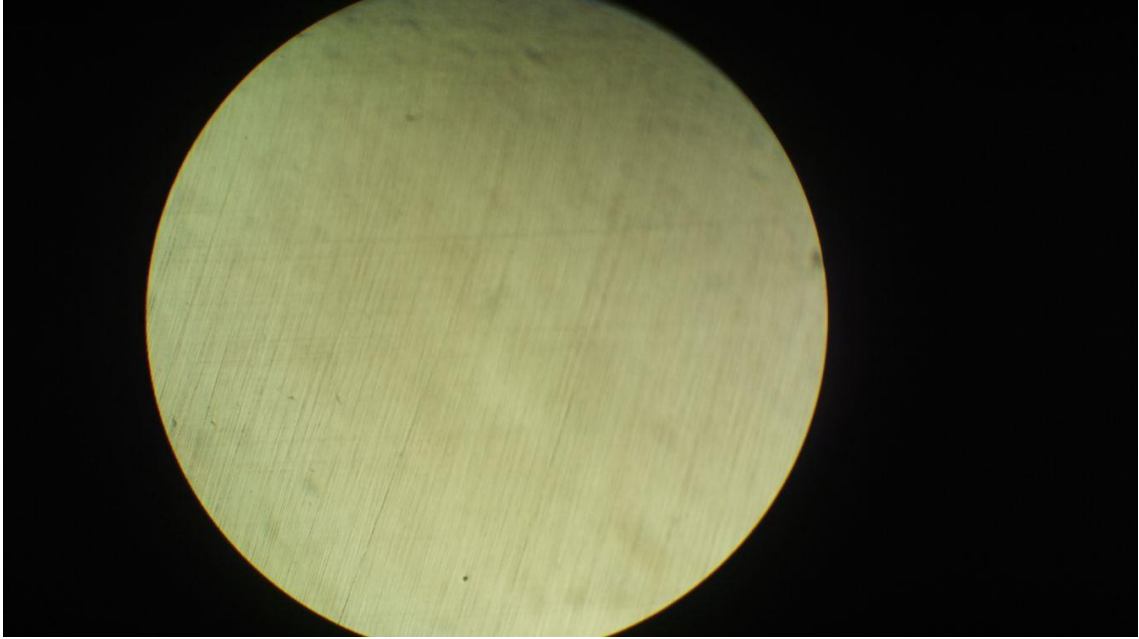


Şekil 4.21. Isıl işlem görmemiş numunenin parlatılmış görüntüsü (200X)

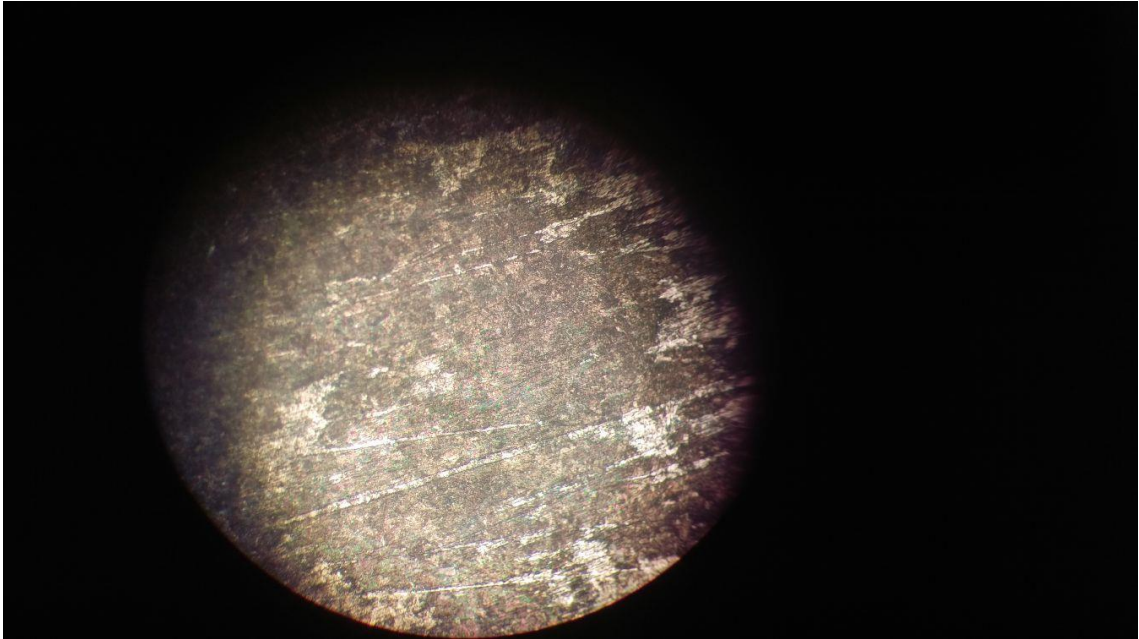


Şekil 4.22. Isıl işlem görmemiş numunenin dağlanmış görüntüsü (200X)

Şekil 4.18’de S49 çeliğinden üretilen ray çeliğinin ısıt işlemler uygulanmamış halinin alkol ile temizlenip parlatıldıktan sonra çekilmiş optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. S49 çeliğinden üretilen rayın perlitik yapıda olduğu Şekil 21’de görülmektedir. Isıt işleme maruz kalmamış S49 çeliği numunesinin %3’lük nital dağlandıktan sonraki görüntüsü incelendiğinde perlitik yapıda herhangi bir farklılık olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 4.19).



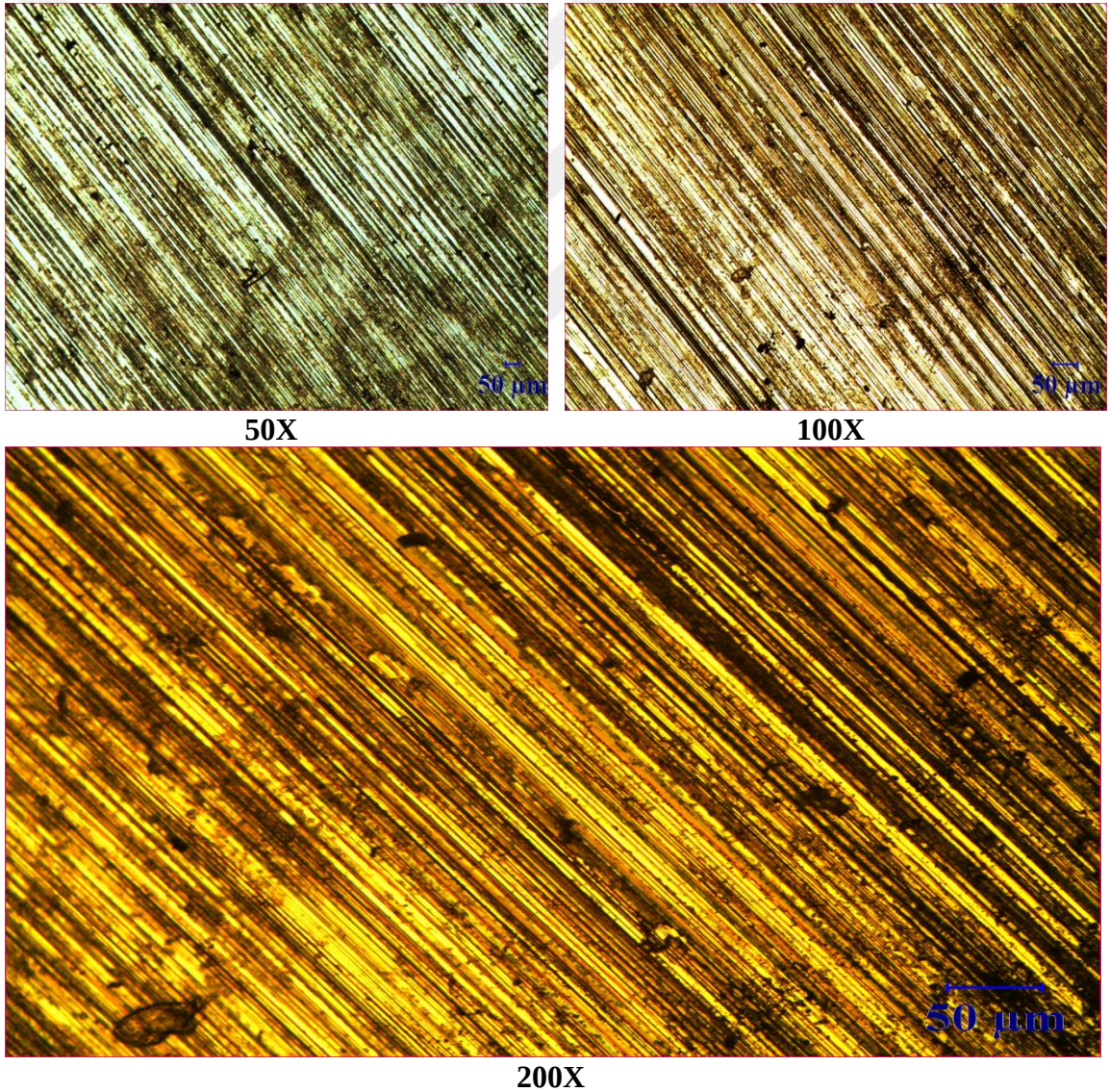
Şekil 4.23. Isıt işlemler görmüş numunenin görüntüsü (200X)



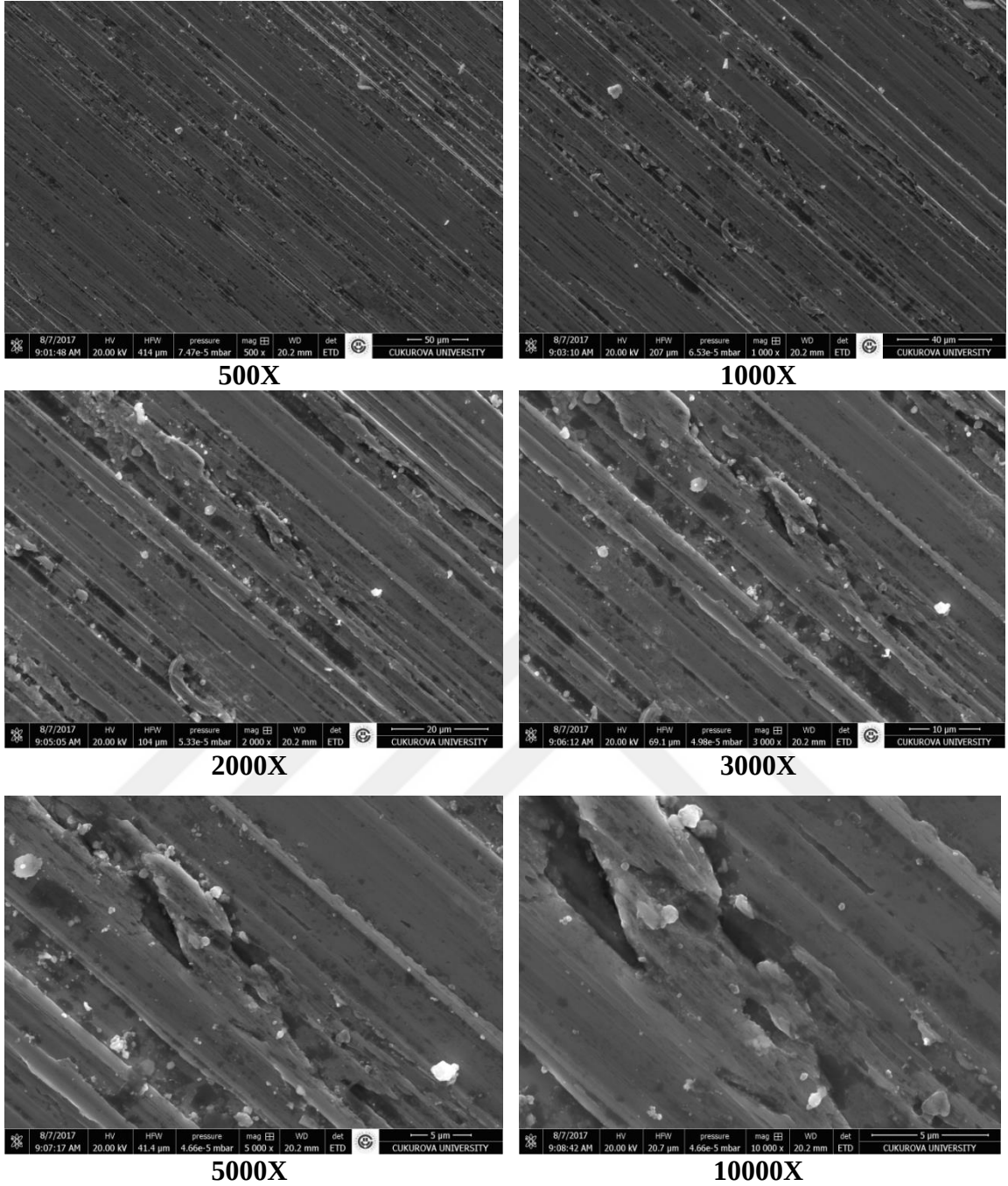
Şekil 4.24. Isıt işlemler görmüş numunenin dağlanmış görüntüsü (200X)

S49 çeliğinden üretilen ray numunesi 800 °C'de östenitleme işlemine tabii tutulduktan sonra hava ortamında kendiliğinden soğumaya bırakılmıştır. Bu işlem sonucunda numunenin perlit lamellerinin daha kaba bir yapıda olduğu Şekil 23'de görülmektedir. Isıl işlem uygulanmış numune %3'lük nital çözeltisi ile dağlandıktan sonra çekilen görüntüsü incelendiğinde perlitik yapının daha belirgin bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir.

Araştırma kapsamında aşınma deneyinde kullanılan 9 numune alkol ile temizlenip parlatılma işlemine tabi tutulduktan sonra optik mikroskopta 50X, 100X ve 200X büyüklüğünde görüntüleri ve numunelerin 500X, 1000X, 2000X, 3000X, 5000X ve 10000X büyütme SEM görüntüleri alınmıştır.

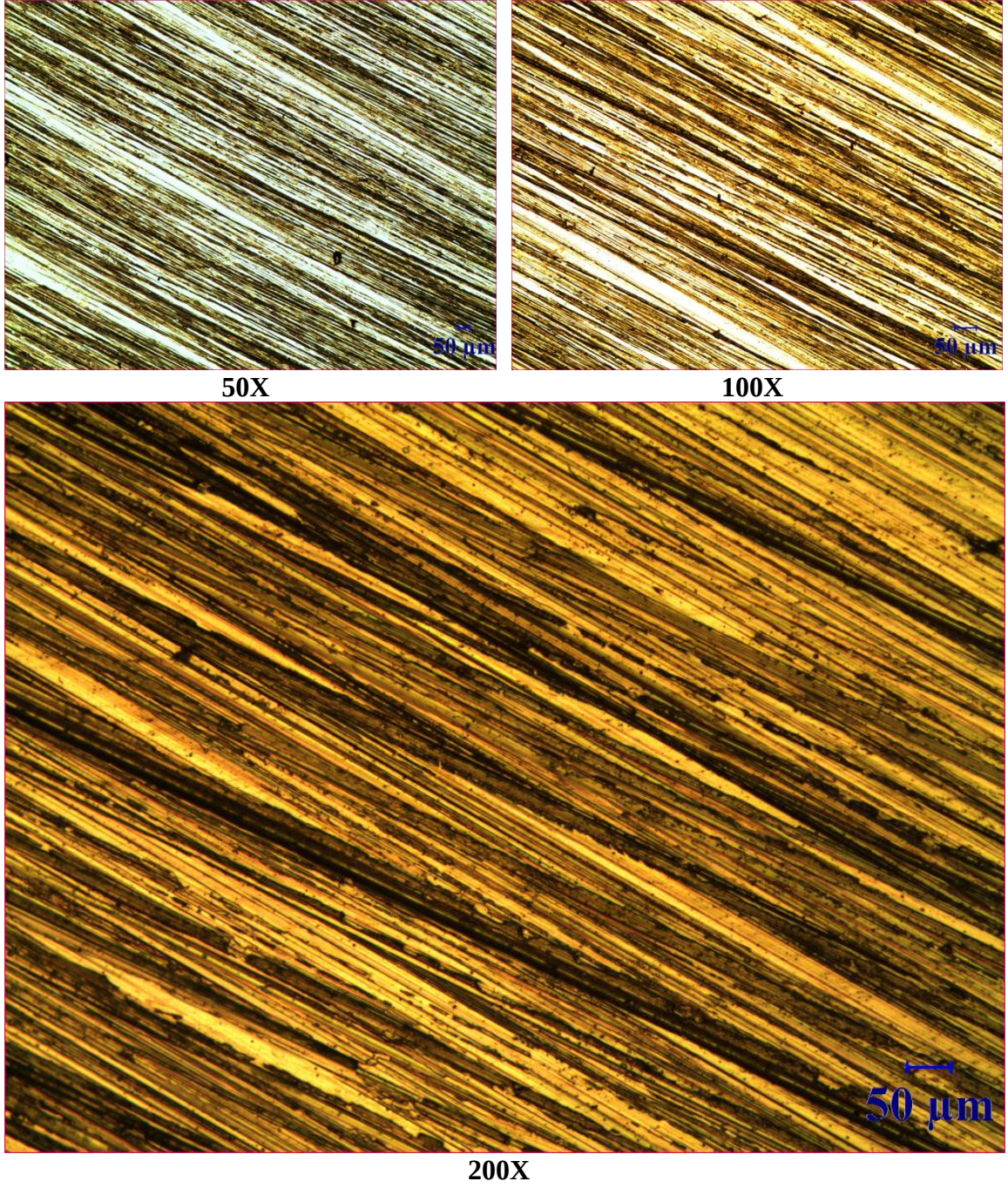


Şekil 4.25. A1 numunesine ait optik mikroskop görüntüleri

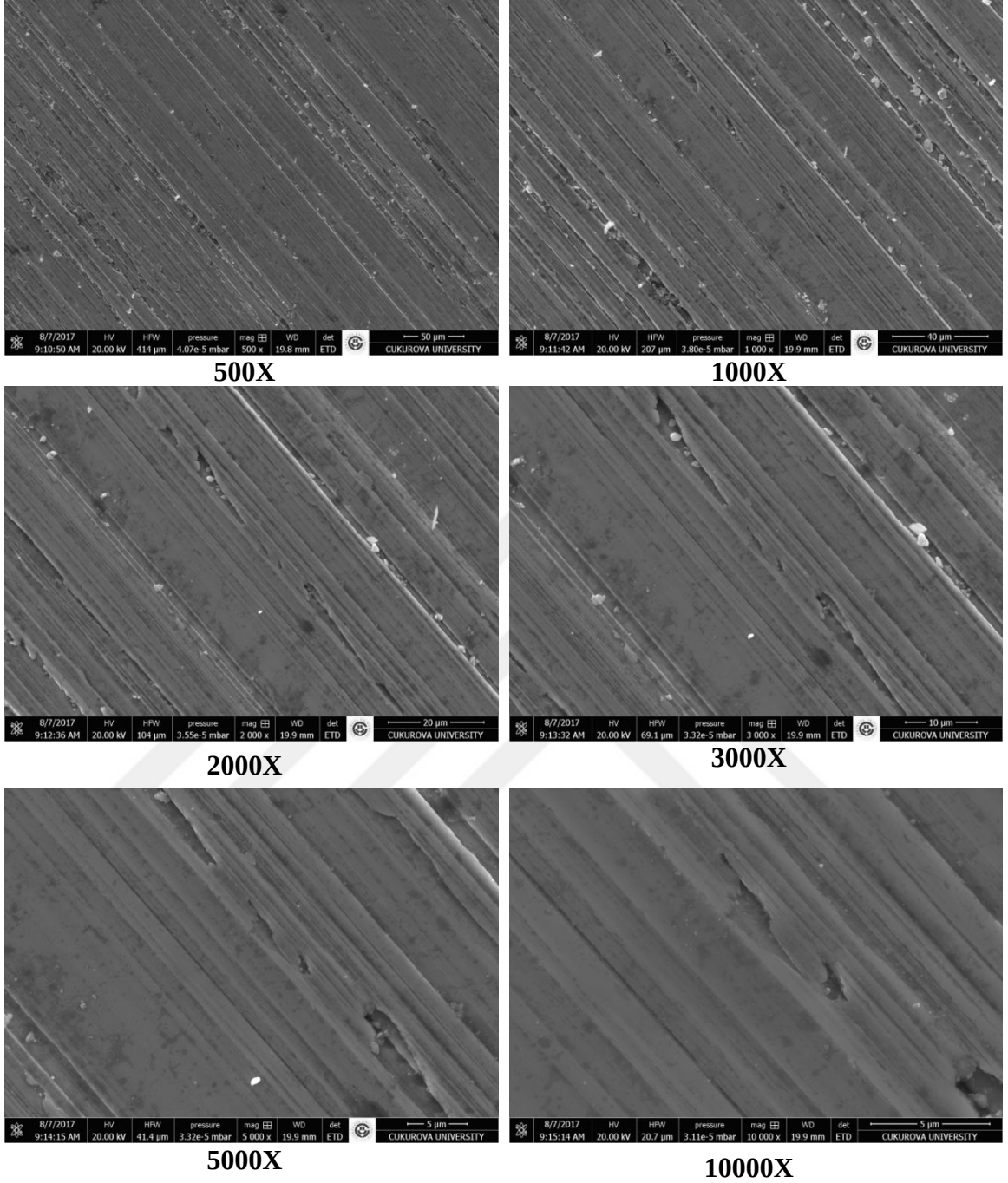


Şekil 4.26. A1 numunesine ait SEM görüntüleri

10MPa'lık yük, 300 devir/dakika kayma hızı ve 2000 metre kayma yolunda aşınma testine tabi tutulan A1 numunesine ait SEM ve optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde kırmızı-kahverengi oksit tabakası yüzeyi kapladığı ve yüzeyde oluşan aşınma yönündeki yüzeysel aşınma oluşumları ve düşük orandaki parçacık kopmaları adhesif aşınma düzeyinin düşük olduğunu göstermektedir.

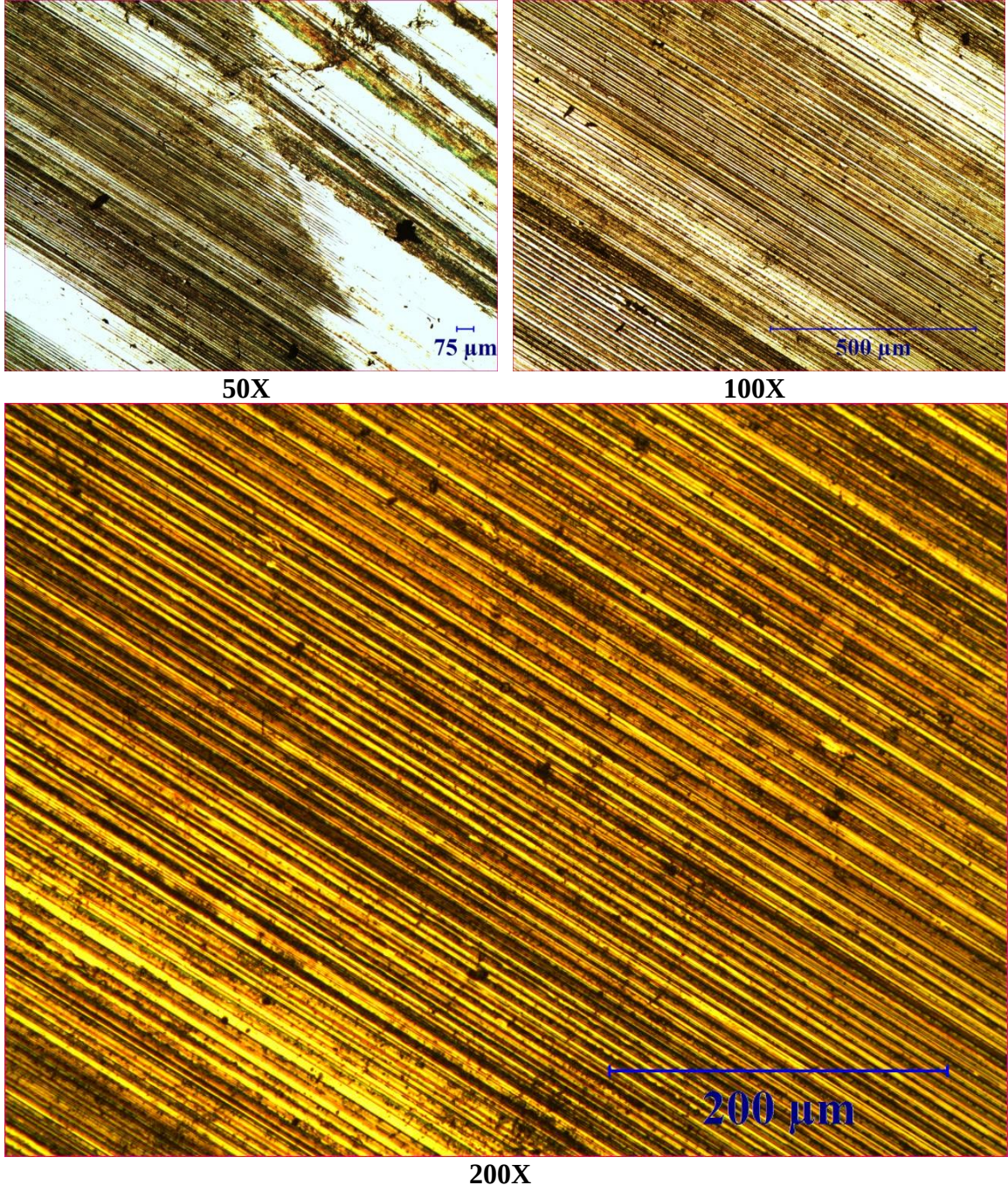


Şekil 4.27. A2 numunesine ait optik mikroskop görüntüleri

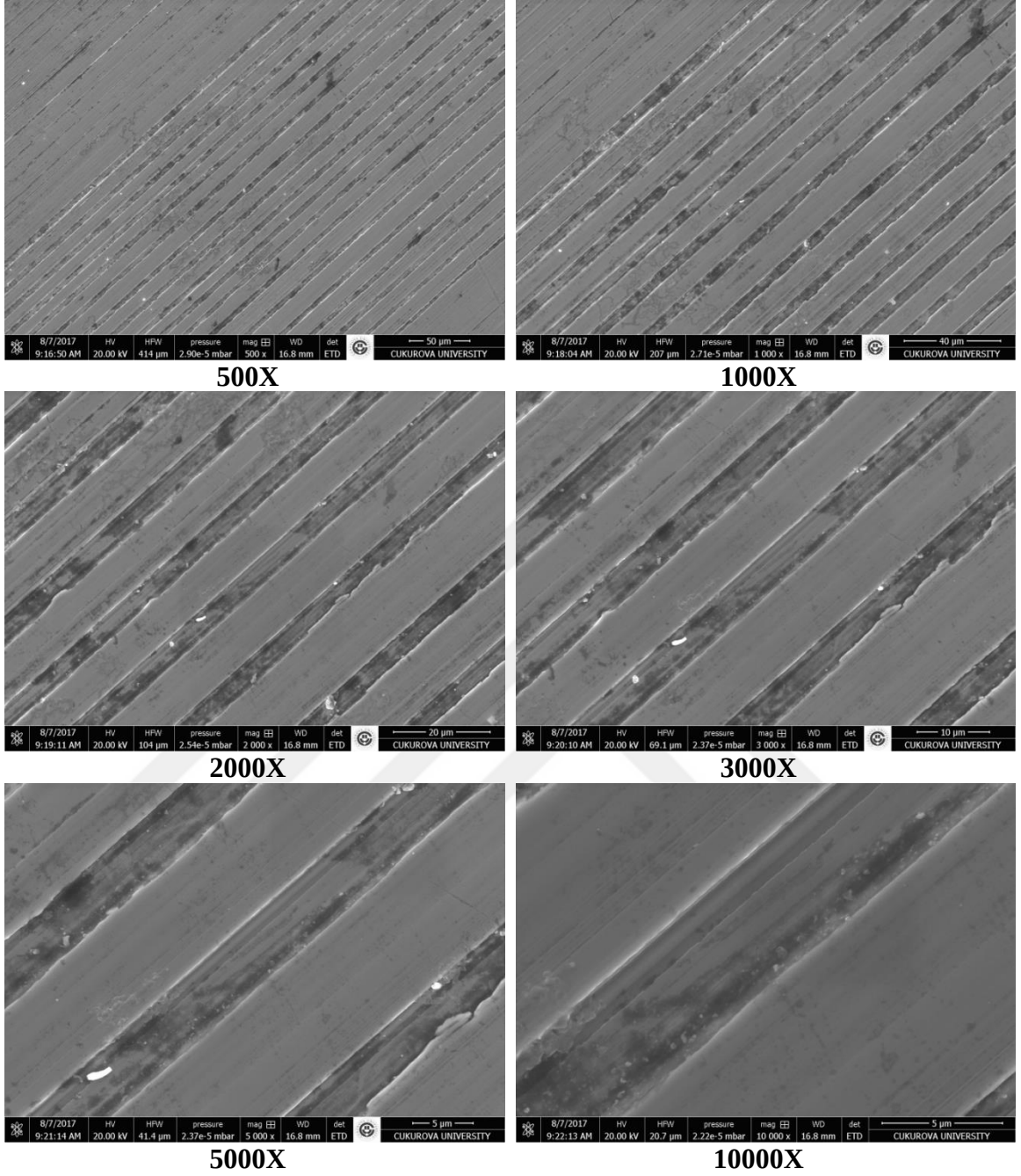


Şekil 4.28. A2 numunesine ait SEM görüntüleri

10MPa’lık yük, 600 devir/dakika ve 4000 metre kayma yolunda aşınma testine tabi tutulan A2 numunesine ait SEM ve optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde kırmızı-kahverengi oksit tabakası yüzeyi kapladığı ve yüzeyde nispeten daha derin aşınma oluşumları ve nispeten daha fazla oranda gerçekleşen parçacık kopmaları adhesiv aşınma düzeyinin A1 numunesine göre daha fazla olduğunu göstermektedir.

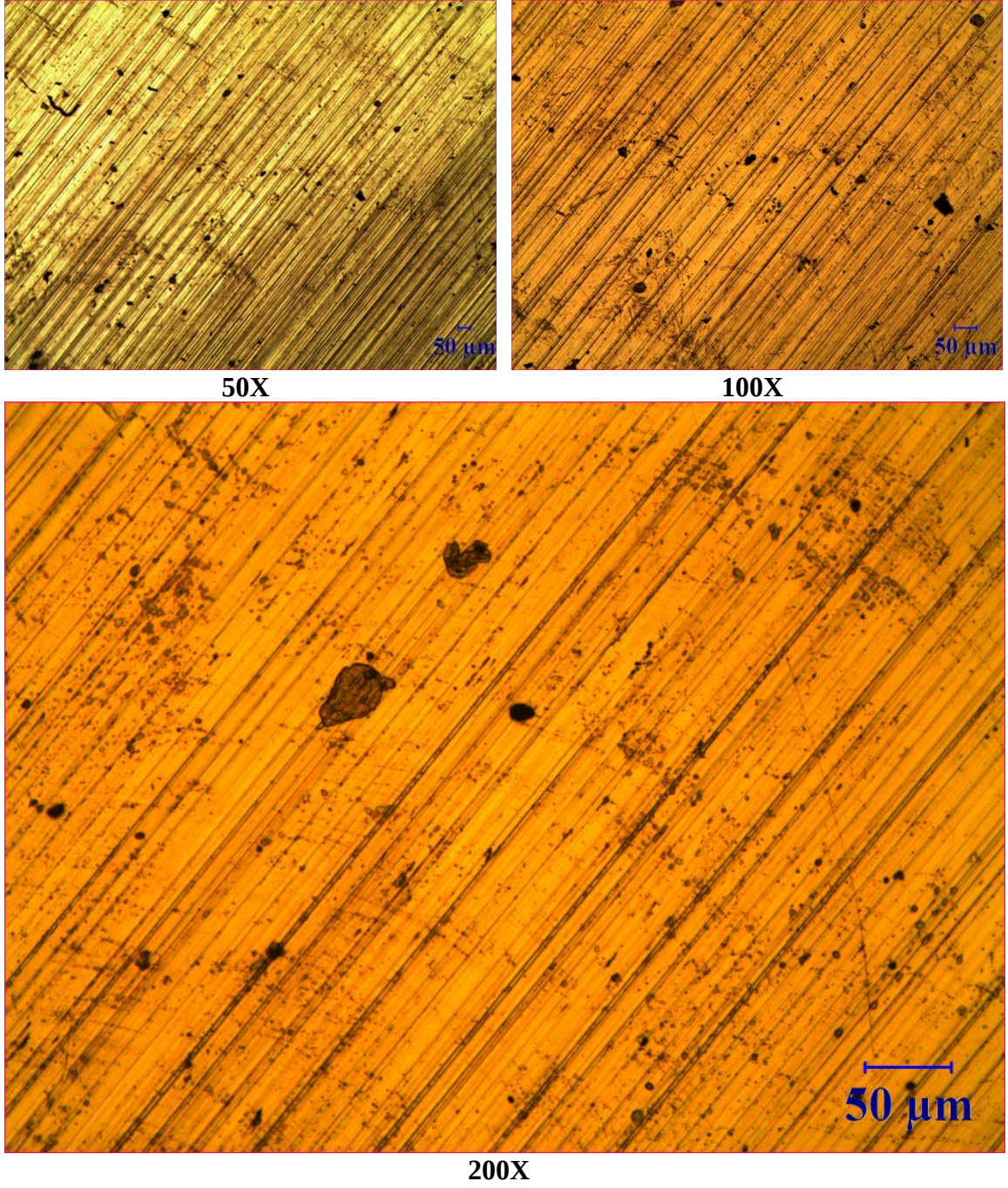


Şekil 4.29. A3 numunesine ait optik mikroskop görüntüleri

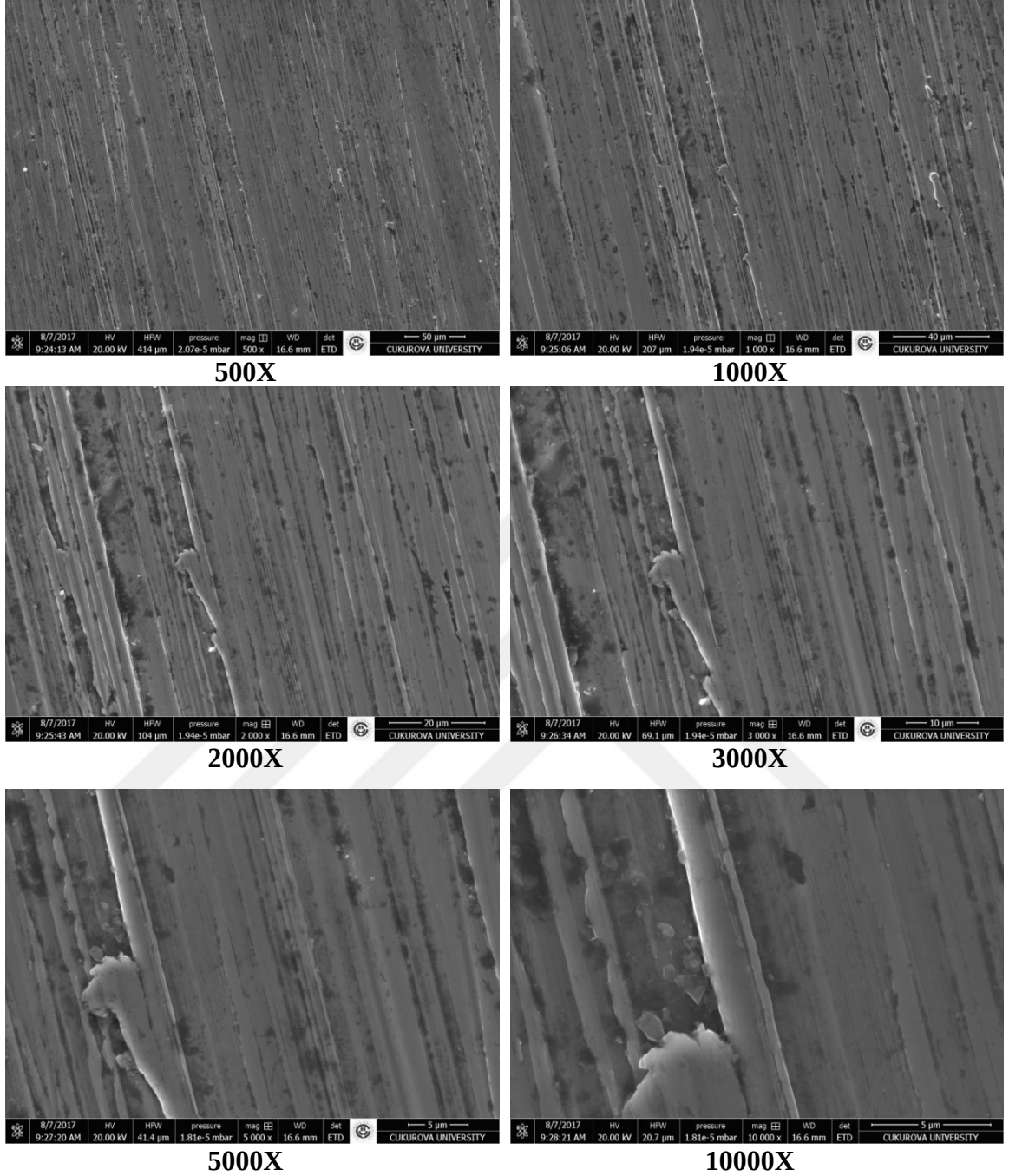


Şekil 4.30. A3 numunesine ait SEM görüntüleri

10MPa'lık yük, 900 devir/dakika ve 6000 metre kayma yolunda aşınma testine tabi tutulan A3 numunesine ait SEM ve optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde kırmızı-kahverengi oksit tabakasının yüzeyde yer yer azaldığı ve yüzeyde daha belirgin aşınma oluşumları ve nispeten daha fazla oranda gerçekleşen parçacık kopmaları adhesiv aşınma düzeyinin A2 numunesine göre daha fazla olduğunu göstermektedir.

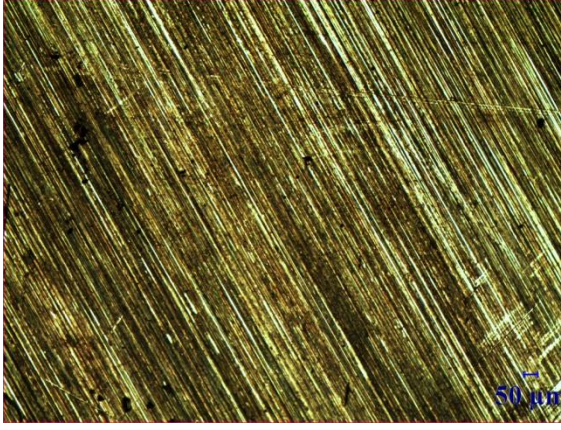


Şekil 4.31. B1 numunesine ait optik mikroskop görüntüleri

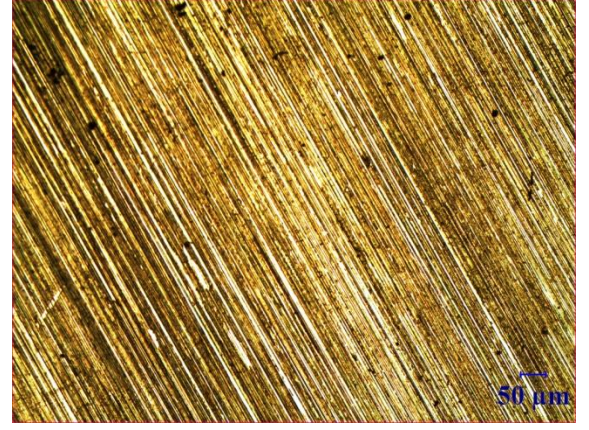


Şekil 4.32. B1 numunesine ait SEM görüntüleri

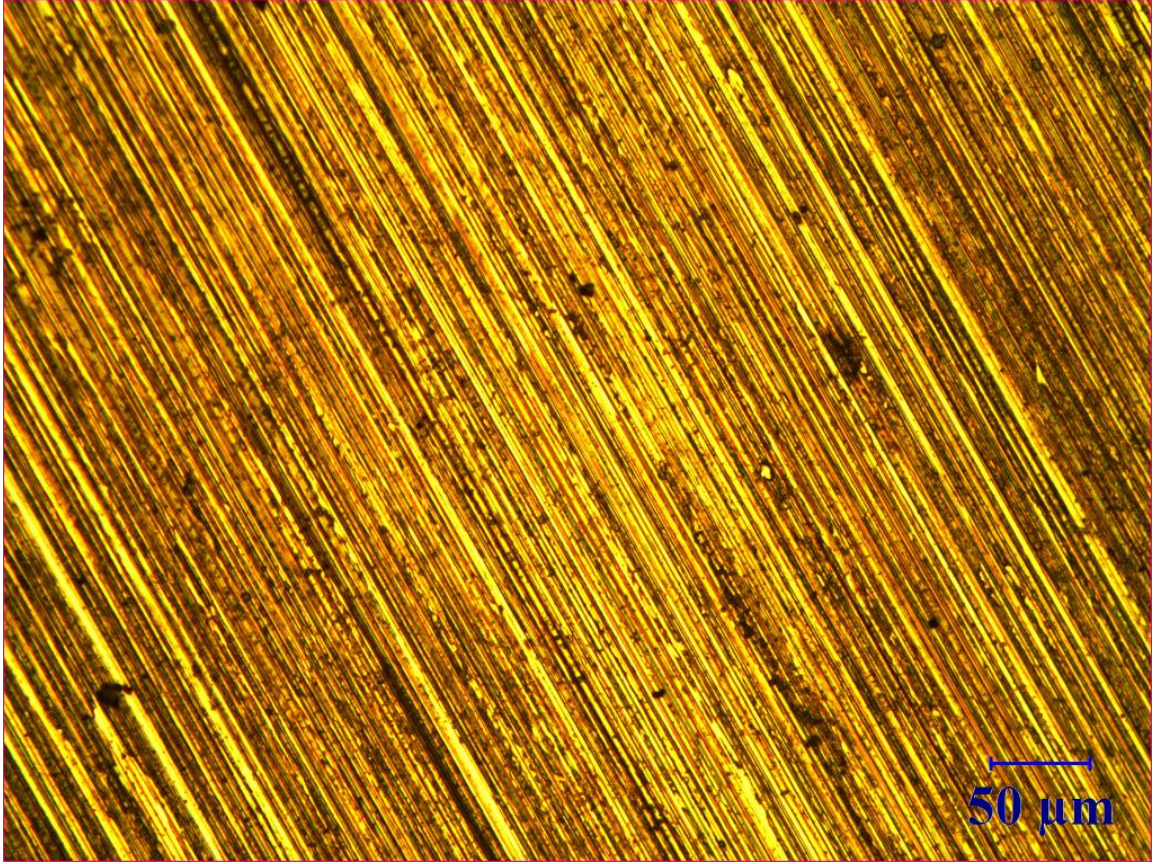
20MPa'lık yük, 300 devir/dakika kayma hızı ve 2000 metre kayma yolunda aşınma testine tabi tutulan B1 numunesine ait SEM ve optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde kırmızı-kahverengi oksit tabakasının yer yer yüzeyde bulunduğu ve yüzeyde oluşan aşınma yönündeki sık ve derin aşınma oluşumları ve parçacık kopmaları adhesiv aşınma düzeyinin yük ile doğru orantılı olarak arttığını göstermektedir.



50X

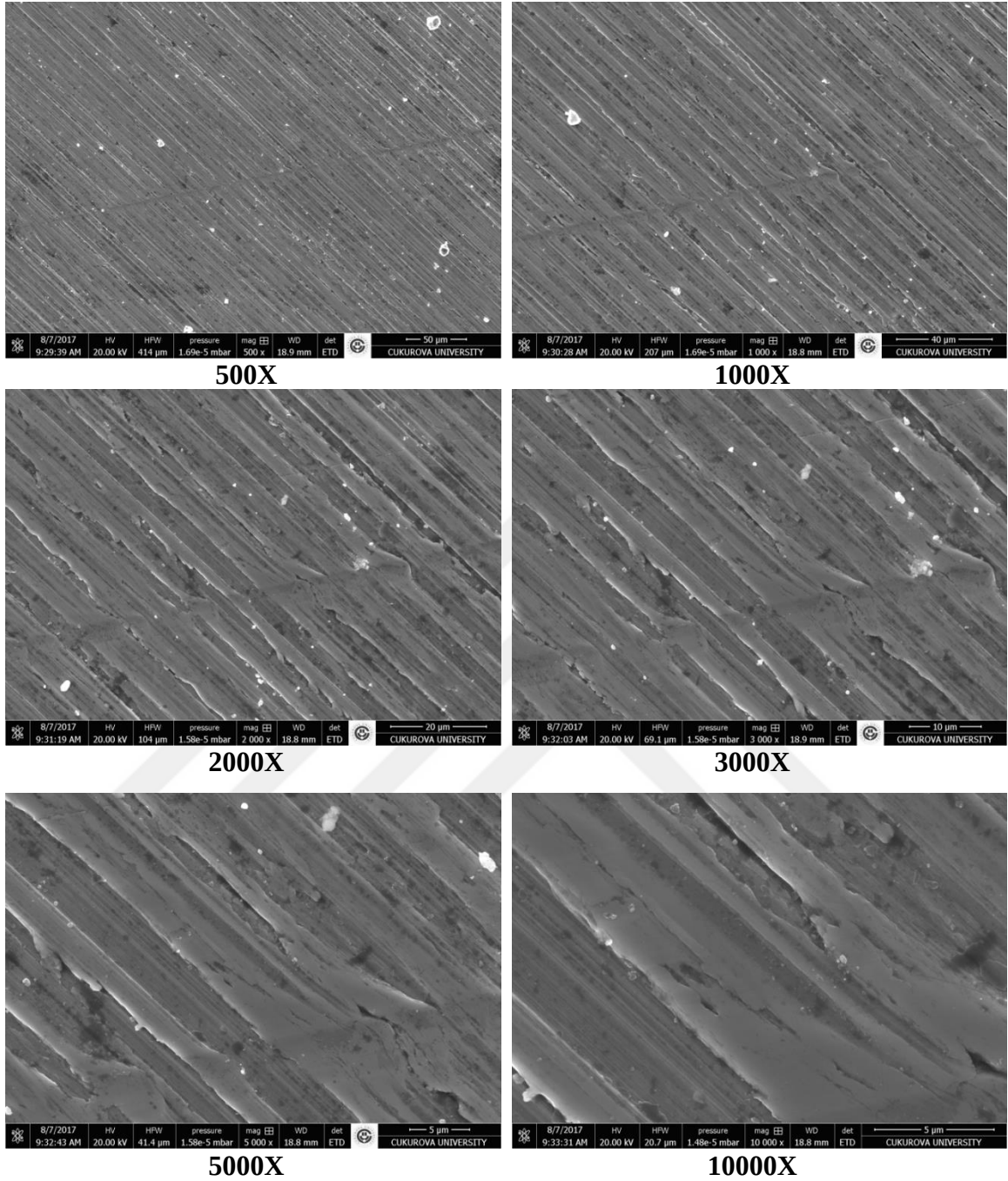


100X



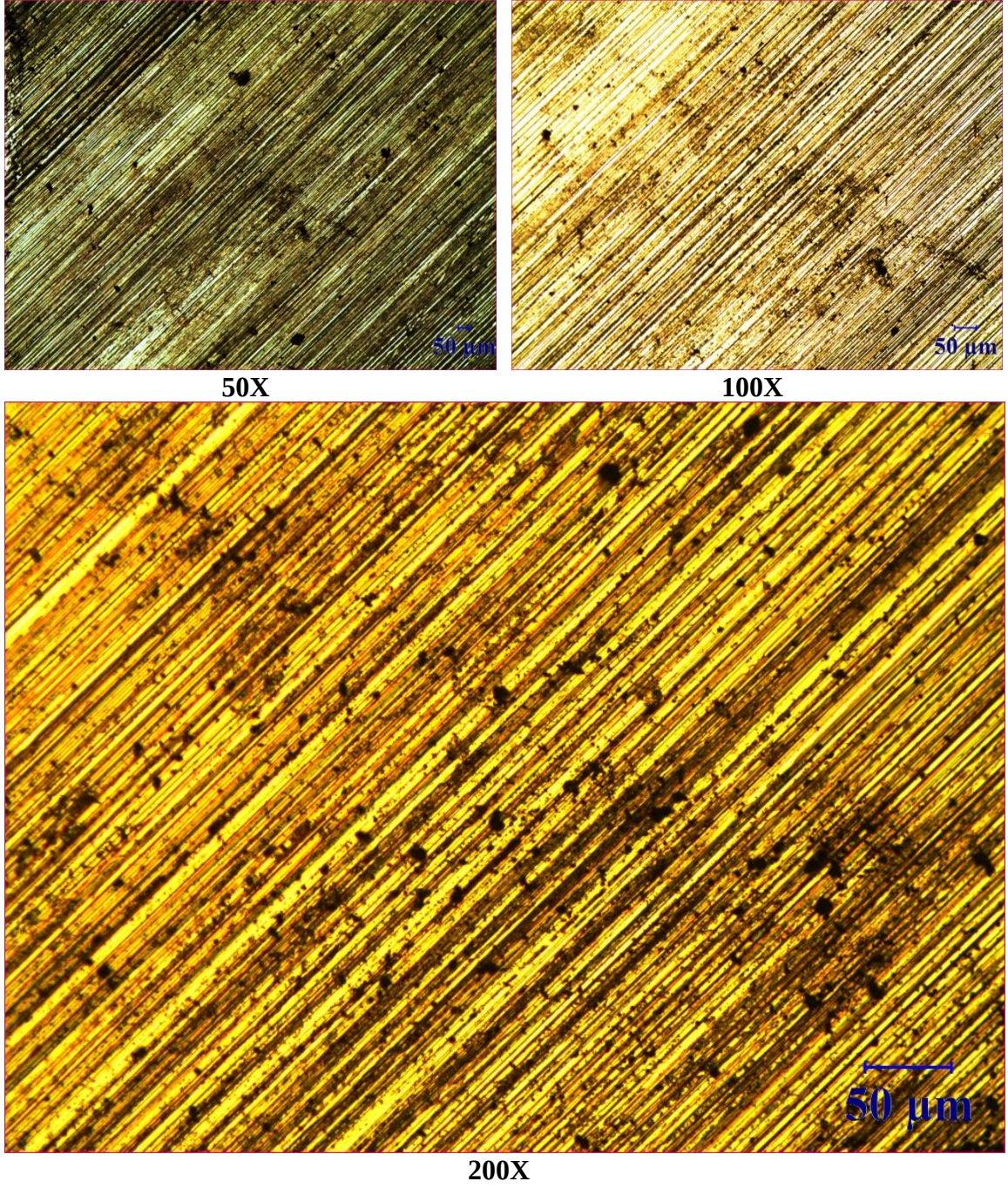
200X

Şekil 4.33. B2 numunesine ait optik mikroskop görüntüleri

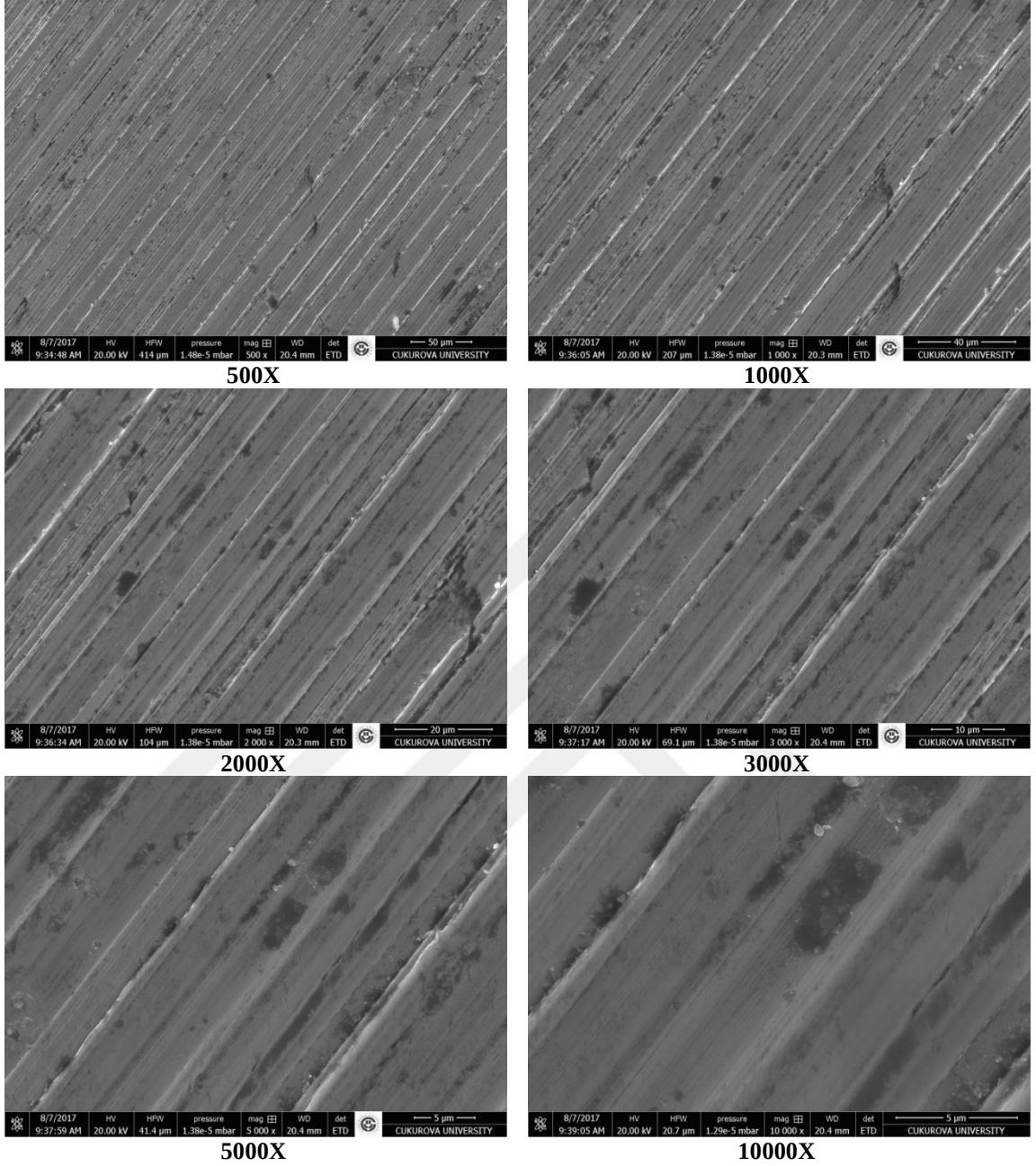


Şekil 4.34. B2 numunesine ait SEM görüntüleri

20MPa’lık yük, 600 devir/dakika kayma hızı ve 4000 metre kayma yolunda aşınma testine tabi tutulan B2 numunesine ait SEM ve optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde kırmızı-kahverengi oksit tabakasının yüzeydeki dağılımının nispeten azaldığı ve yüzeyde oluşan aşınma oluşumlarının derinlik ve kalınlıklarının artması ve oranı yükselen parçacık kopmaları adhesiv aşınma düzeyinin arttığını göstermektedir.

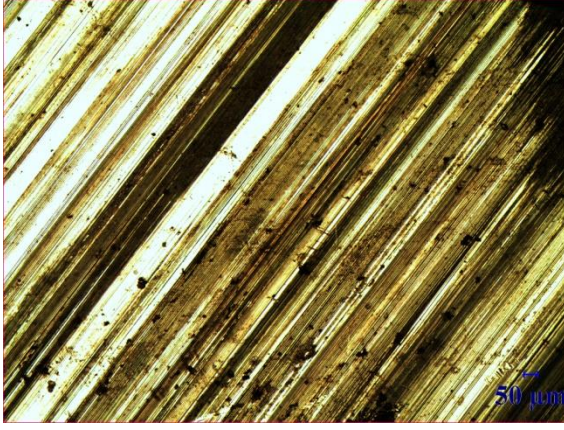


Şekil 4.35. B3 numunesine ait optik mikroskop görüntüleri

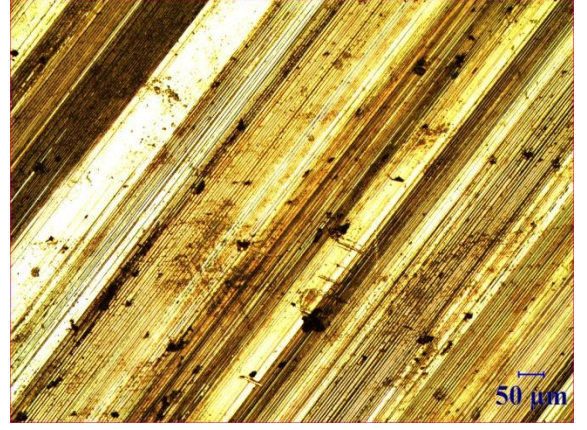


Şekil 4.36. B3 numunesine ait SEM görüntüleri

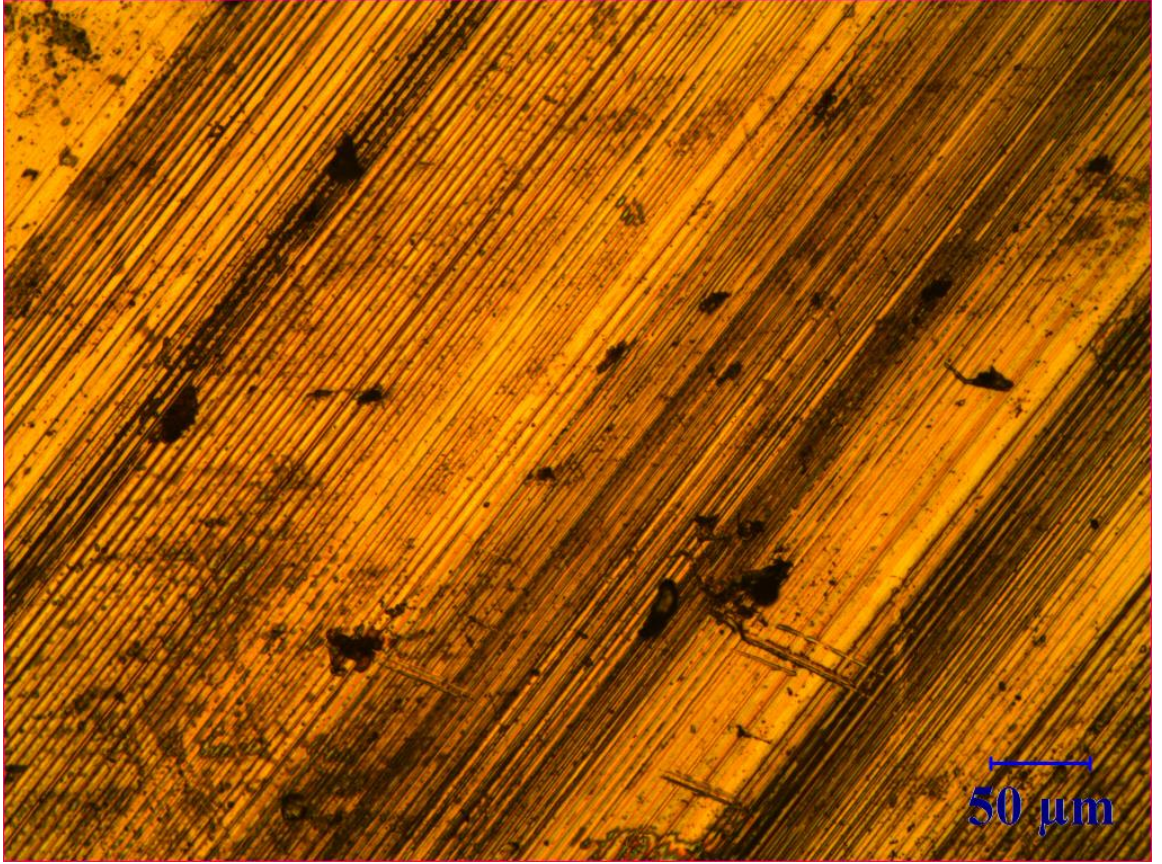
20MPa'lık yük, 900 devir/dakika kayma hızı ve 6000 metre kayma yolunda aşınma testine tabi tutulan B3 numunesine ait SEM ve optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde kırmızı-kahverengi oksit tabakasının yüzeyde azaldığı, aşınma izlerinin kalınlaştığı ve aşınma sonucunda daha fazla parçacık kopması gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum aşınma hızı ve aşınma mesafesi ile adhesiv aşınma arasında doğru orantı olduğunu gösterir.



50X

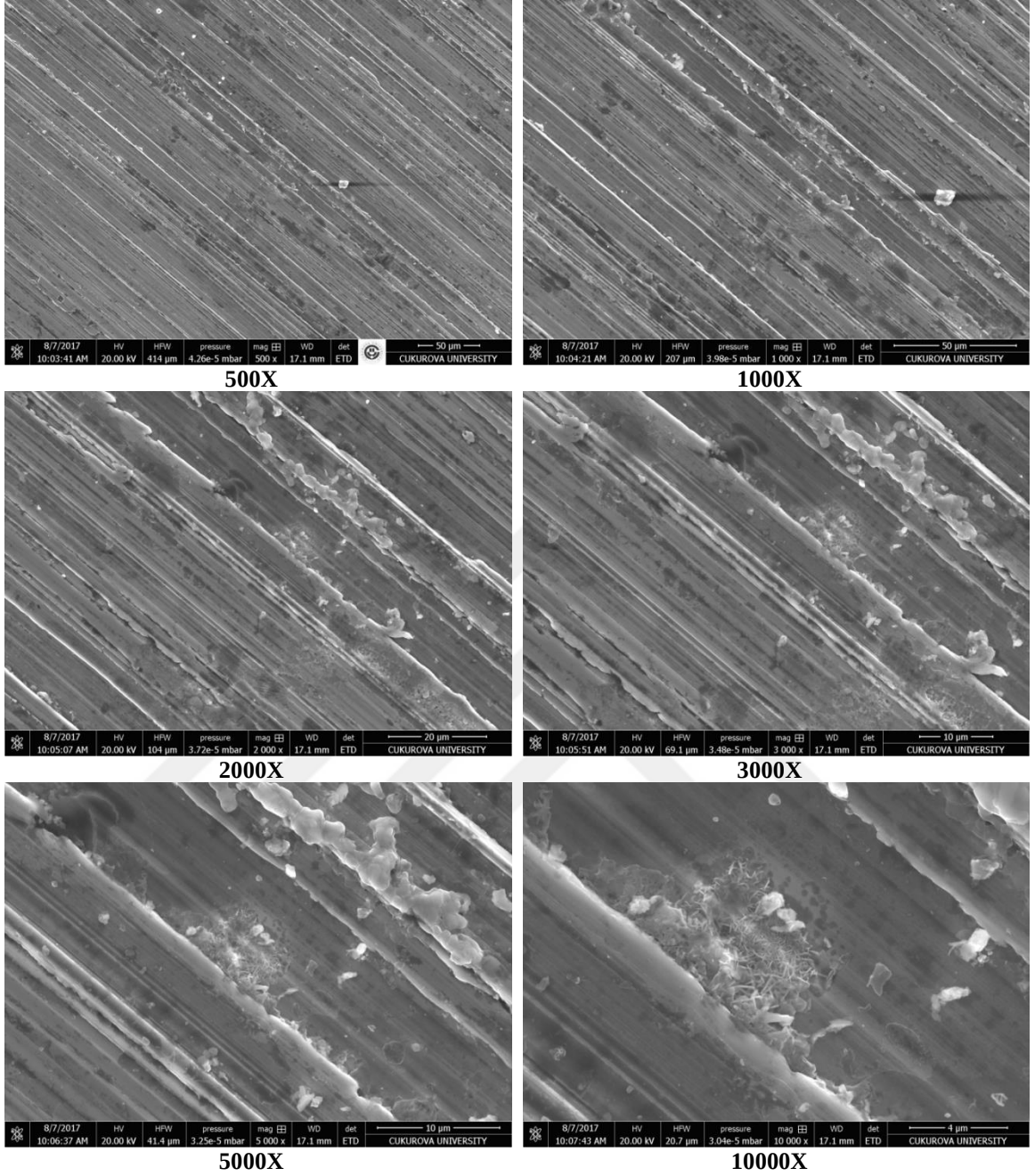


100X



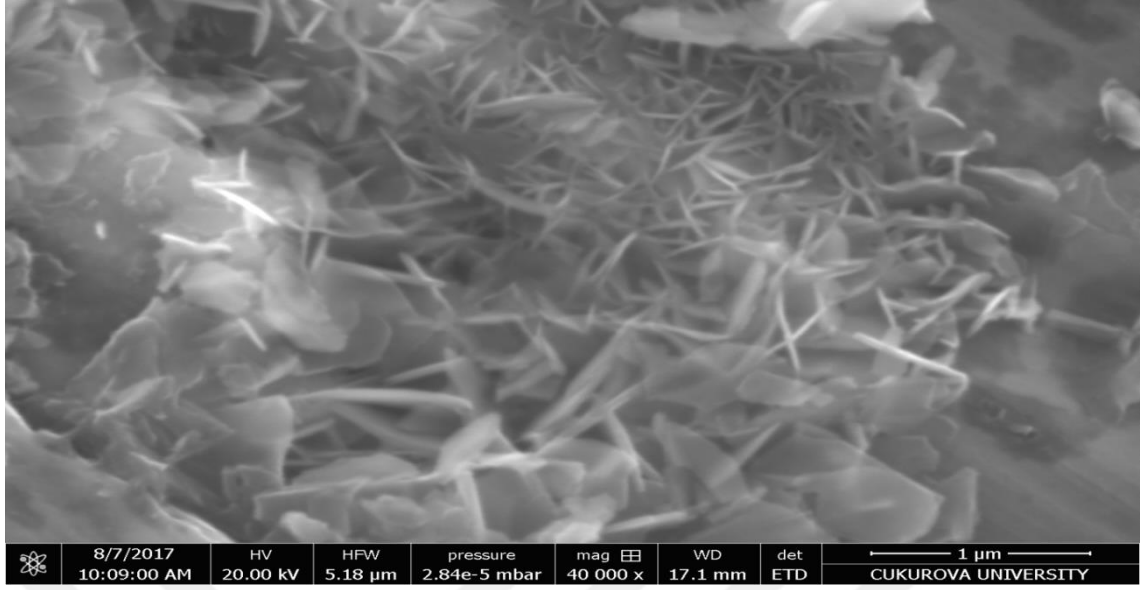
200X

Şekil 4.37. C1 numunesine ait optik mikroskop görüntüleri

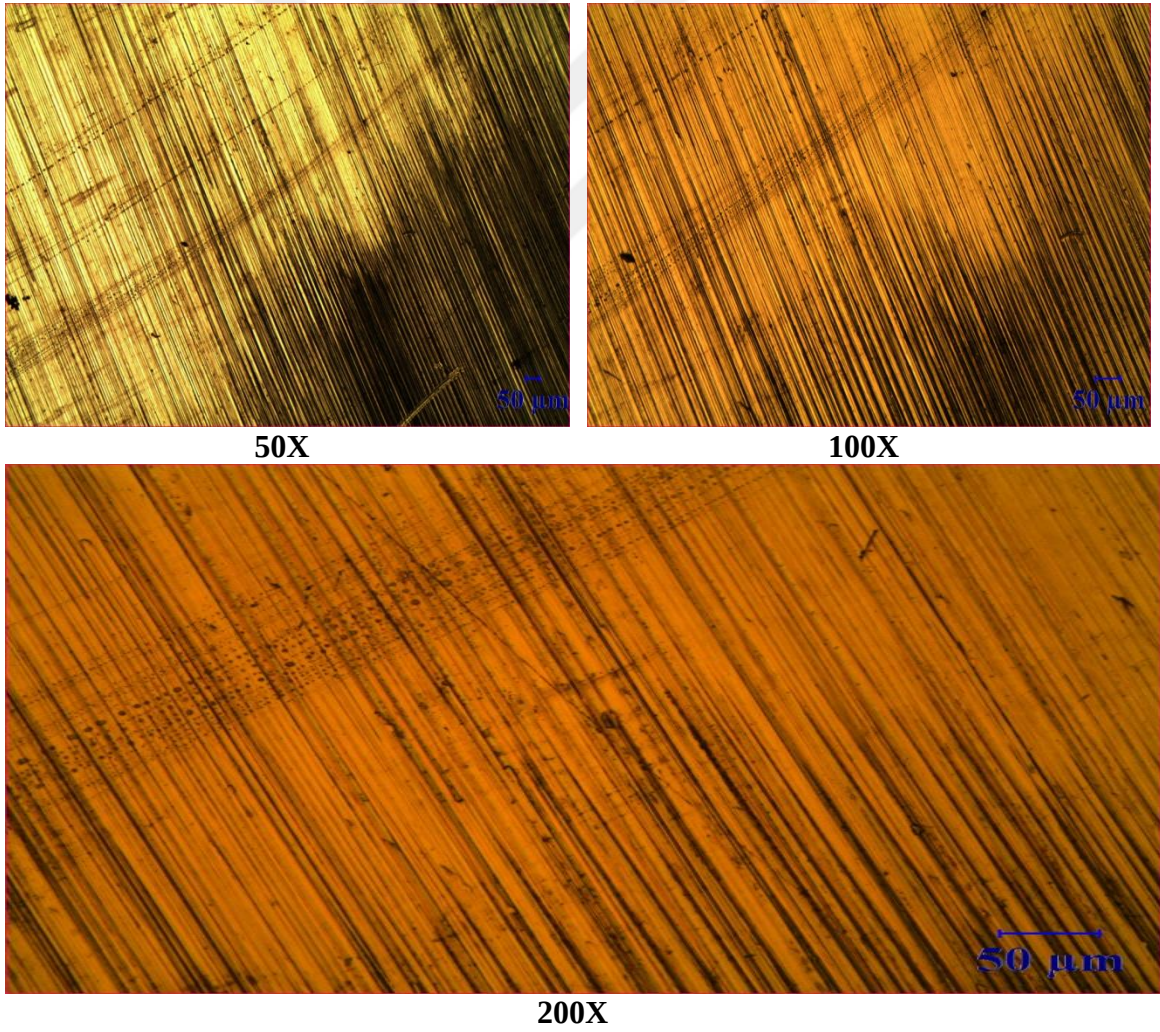


Şekil 4.38. C1 numunesine ait SEM görüntüleri

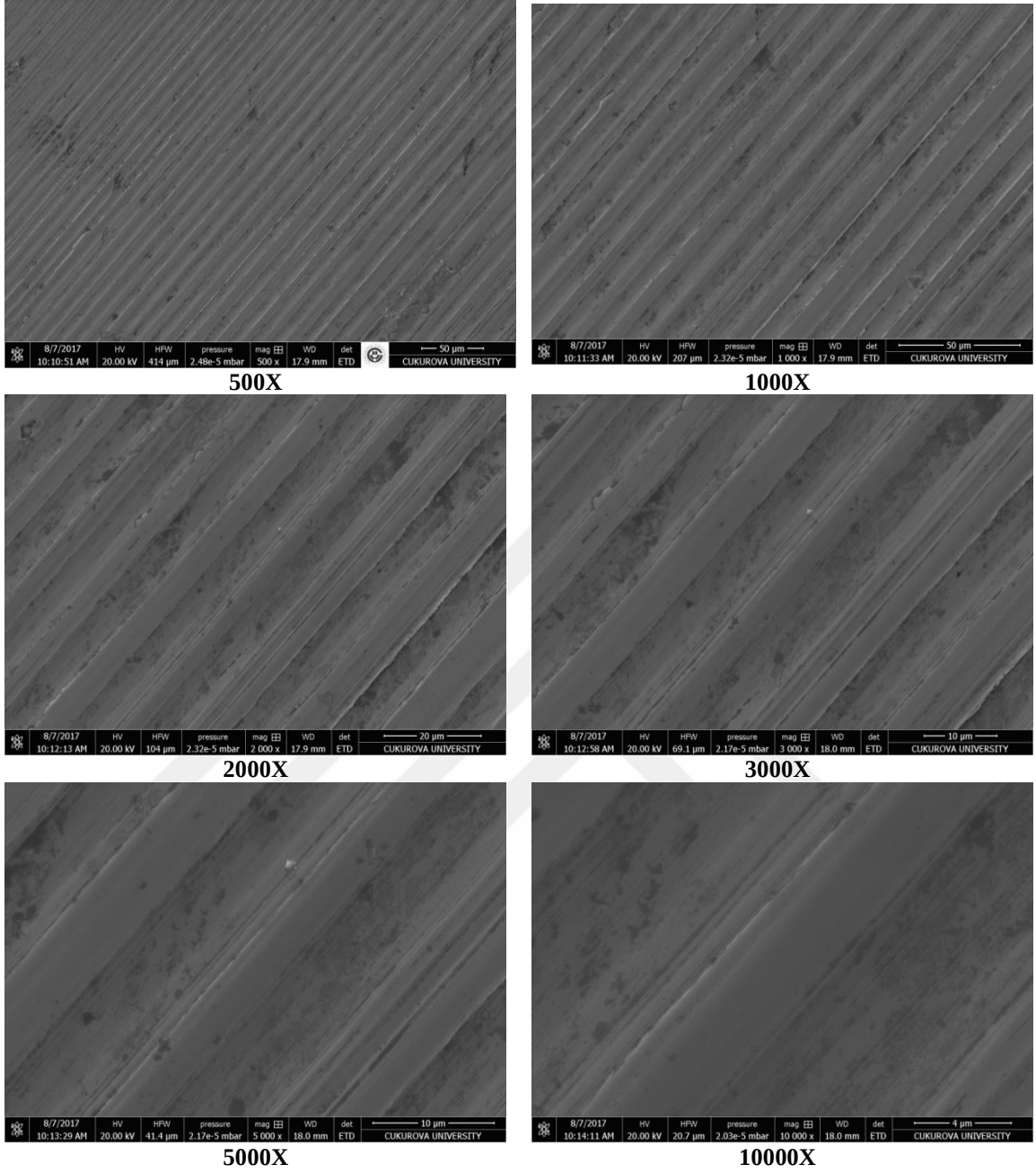
30MPa'lık yük, 300 devir/dakika kayma hızı ve 2000 metre kayma yolunda aşınma testine tabi tutulan C1 numunesine ait SEM ve optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde kırmızı-kahverengi oksit tabakasının dağılım yoğunluğunun azaldığı, derin aşınma izlerinin oluşumu ve aşınma sonucunda daha yüksek oranda ve büyük boyutlu parçacık kopmalarının gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca numunenin perlitik yapısı ve lamelleri 40000X'lik SEM görüntüsünde açıkça görülmektedir (Şekil 4.38).



Şekil 4.39. C1 numunesine ait perlitik yapı görüntüsü

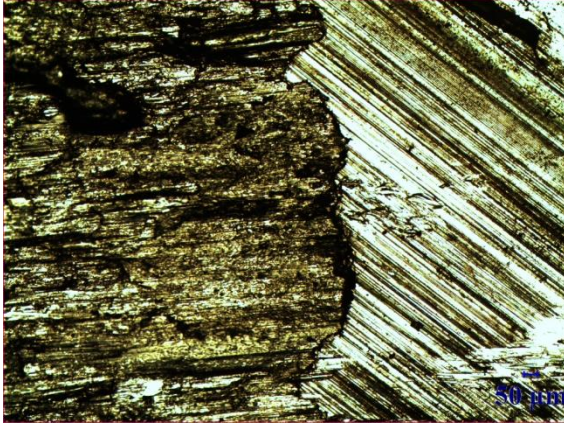


Şekil 4.40. C2 numunesine ait optik mikroskop görüntüleri

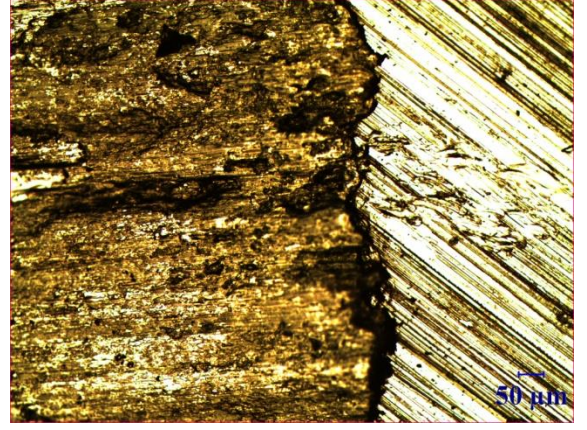


Şekil 4.41. C2 numunesine ait SEM görüntüleri

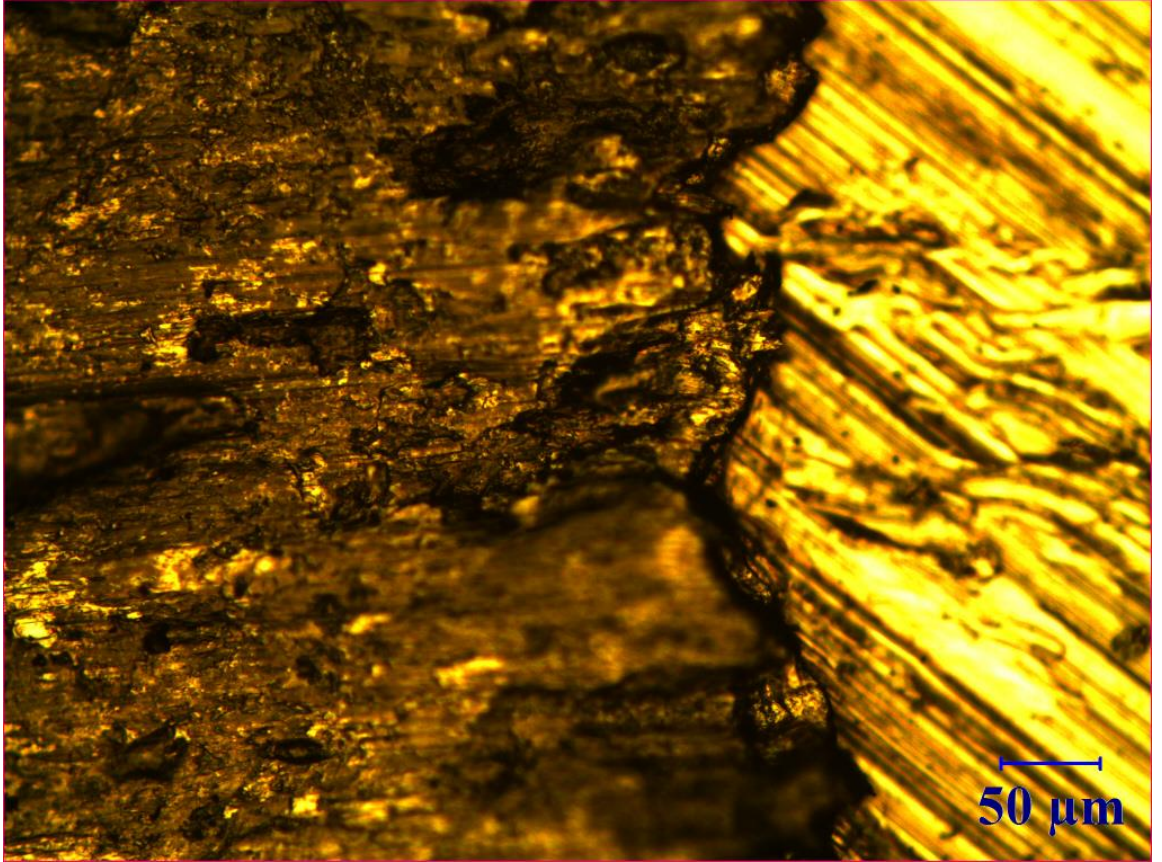
30MPa'lık yük, 600 devir/dakika kayma hızı ve 4000 metre kayma yolunda aşınma testine tabi tutulan C2 numunesine ait SEM ve optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde aşınma izlerinin derinleştiği ve aralıklarının sıklaştığı, kopan parçacıkların miktarının arttığı gözlenmektedir.



50X

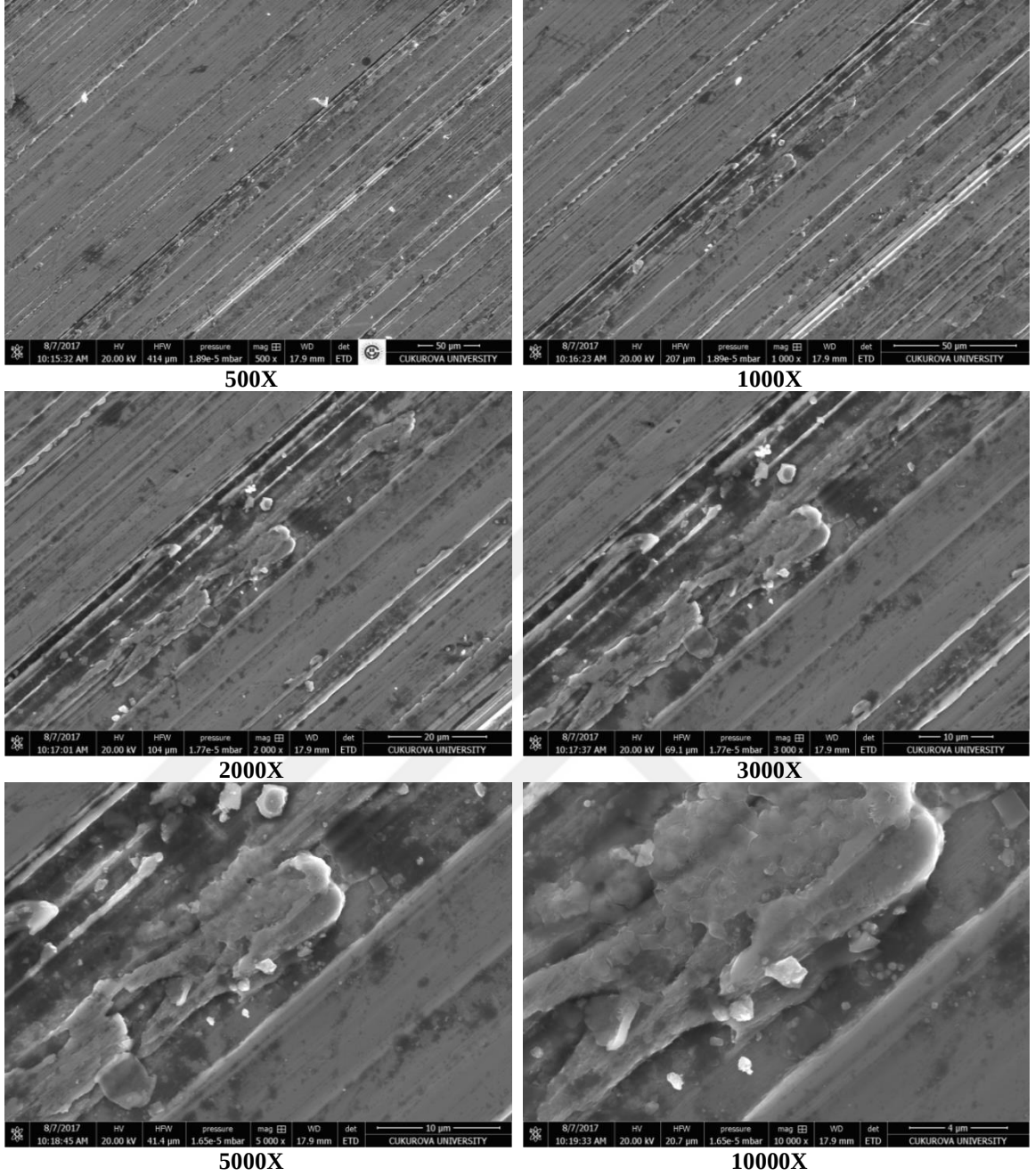


100X



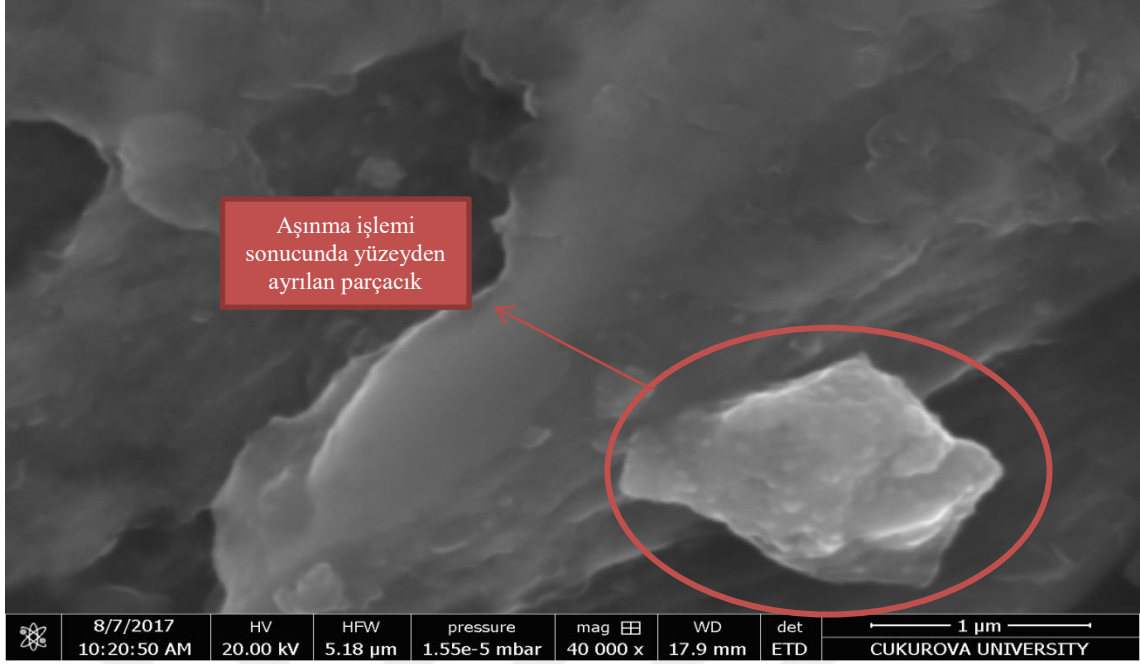
200X

Şekil 4.42. C3 numunesine ait optik mikroskop görüntüleri



Şekil 4.43. C3 numunesine ait SEM görüntüleri

30MPa'lık yük, 900 devir/dakika kayma hızı ve 6000 metre kayma yolunda aşınma testine tabi tutulan C3 numunesine ait SEM ve optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde derin aşınma izleri ve parçacık kopmaları gözlenmektedir.

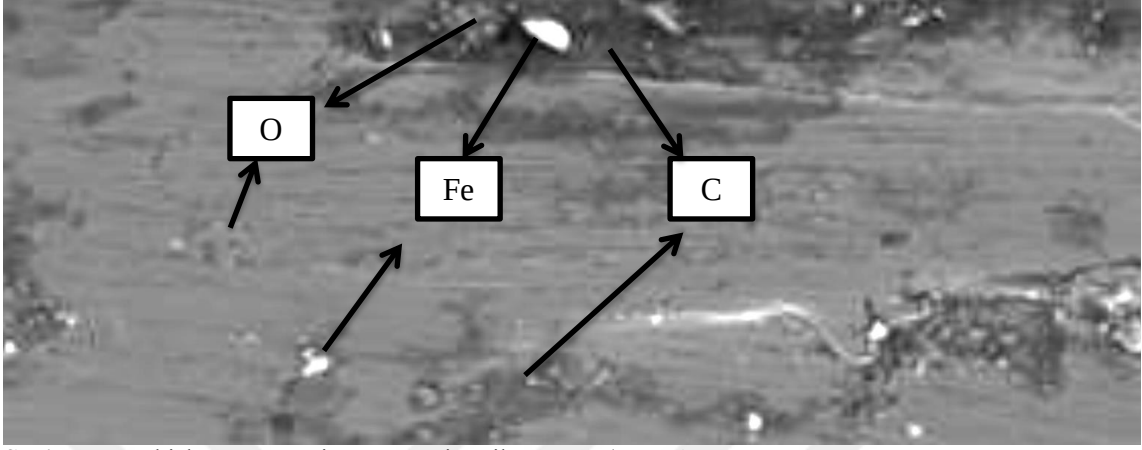


Şekil 4.44. C3 numunesinin 40000X SEM görüntüsü

Genel olarak SEM ve optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde düşük basınç altında zayıf adhesiv aşınmaların olduğu görülmektedir. Şekiller incelendiğinde numune yüzeylerindeki kırmızı-kahverengi renkteki oksit tabakalarının varlığı görülmektedir. Bu durum düşük düzeyde aşınma gerçekleştiği sonucunu ortaya koymaktadır. Şekiller incelendiğinde 10MPa'lık basınç altında aşındırılan A1-A2-A3 numunelerinin aşınma deneylerinin sonuçlarının çok fazla farklılaşmadığı görülmektedir. Numuneler üzerine uygulanan yük miktarı arttırıldıkça adhesiv aşınma düzeyinin arttığı Şekillerde görülmektedir. 30MPa'lık basınç ile aşındırma testine tabi tutulan C1-C2-C3 numunelerinin optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde adhesiv aşınma düzeyinin A1-A2-A3-B1-B2 ve B3 numunelerine göre daha yüksek düzeyde olduğu görülmektedir. Numunenin aşınma yönünde aşınmaların oluşması ve parçacıkların kopması aşınma şiddetinin yüksek düzeyde olduğunu göstermektedir. Aşındırmada numunelere uygulanan yük değerleri arttıkça aşınma şiddetinin de arttığı ve izlerin derinleştiği ayrıca derin parçacık kopmalarının da arttığı görülmektedir.

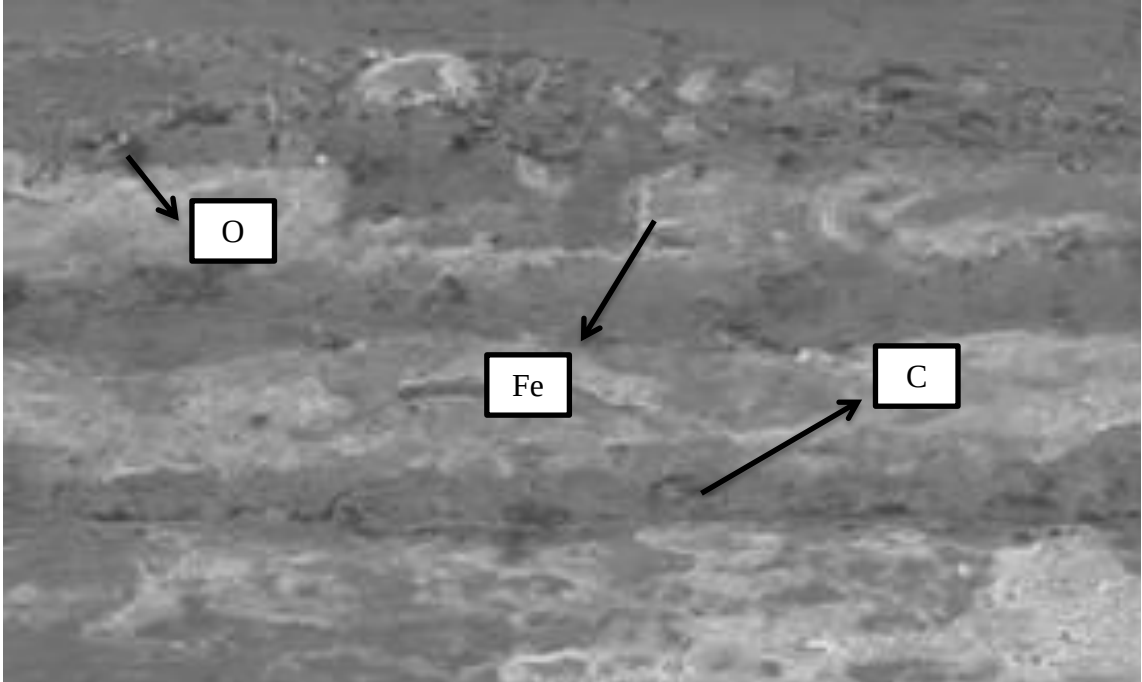
Numunelerin aşınma şiddetleri üzerinde kayma hızı ve kayma yolunun da etkili olduğu optik mikroskop görüntülerinde açık bir şekilde görülmektedir. 30 MPa'lık basınç altında aşınma testine tutulan C1-C2-C3 numunelerinde 2000m kayma yolunda izlerin daha yüzeysel olduğu ve parçacıkların kopma oranları daha düşükken 6000m

kayma mesafeli numunelerde aşınma oluşumlarının daha derin olduğu ve parçacık kopma oranlarının daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum adhesiv aşınma düzeyinin daha yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.45. Isıl işlem görmemiş numunenin mikroyapısı (x2000)

Isıl işlem uygulanmamış numunenin mikroyapısı incelendiğinde yoğun bir şekilde Fe elementine rastlanırken, C ve O elementlerinin varlığı da görülmektedir.

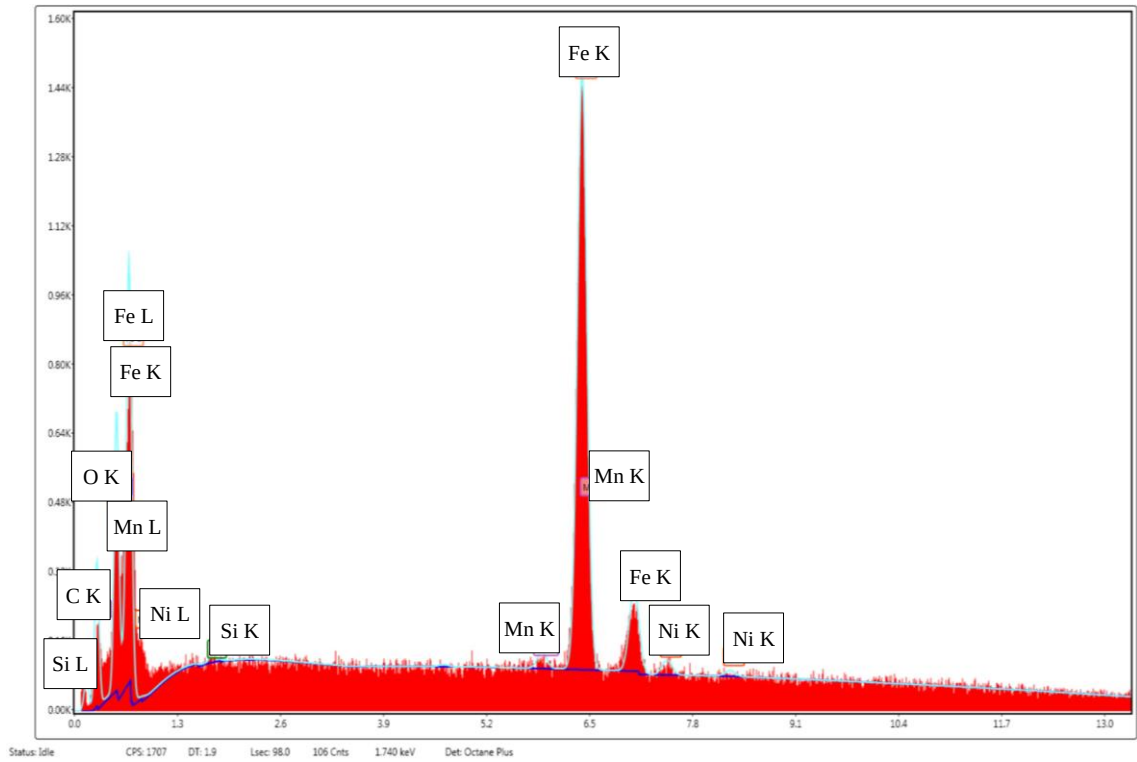
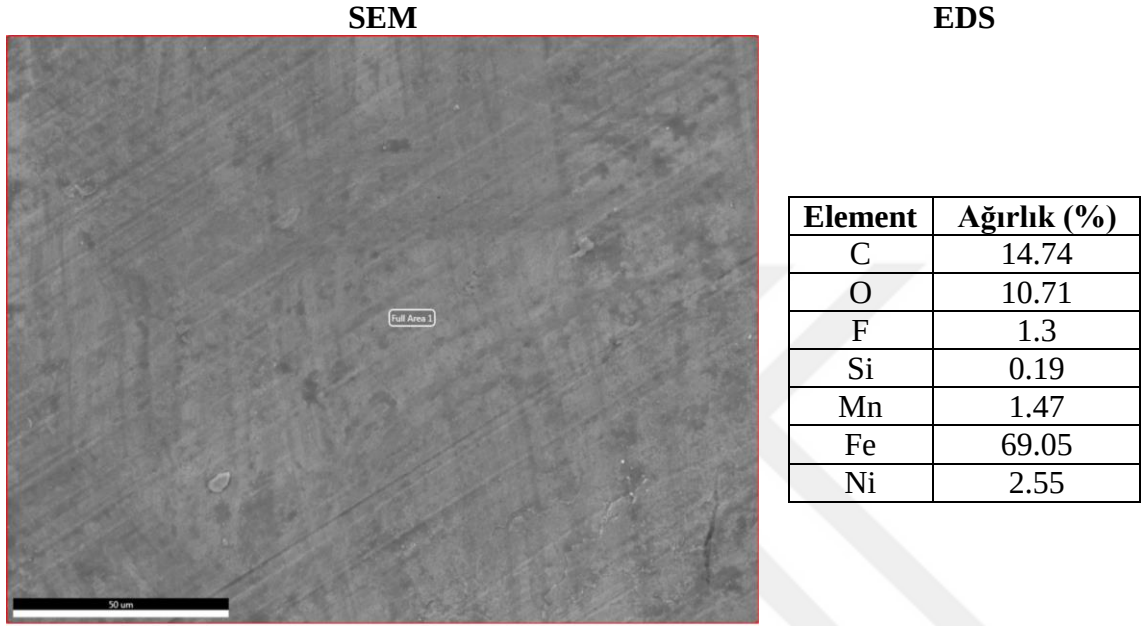


Şekil 4.46. 800 °C sıcaklığa kadar ısıl işlem uygulanmış numunenin mikroyapısı (x2000)

Isıl işlem uygulanmış numunenin mikroyapısı incelendiğinde C ve O yoğunluğunun azaldığı, Fe elementinin yoğun bir şekilde yer aldığı görülmektedir.

5.2. EDS Analiz Sonuçları

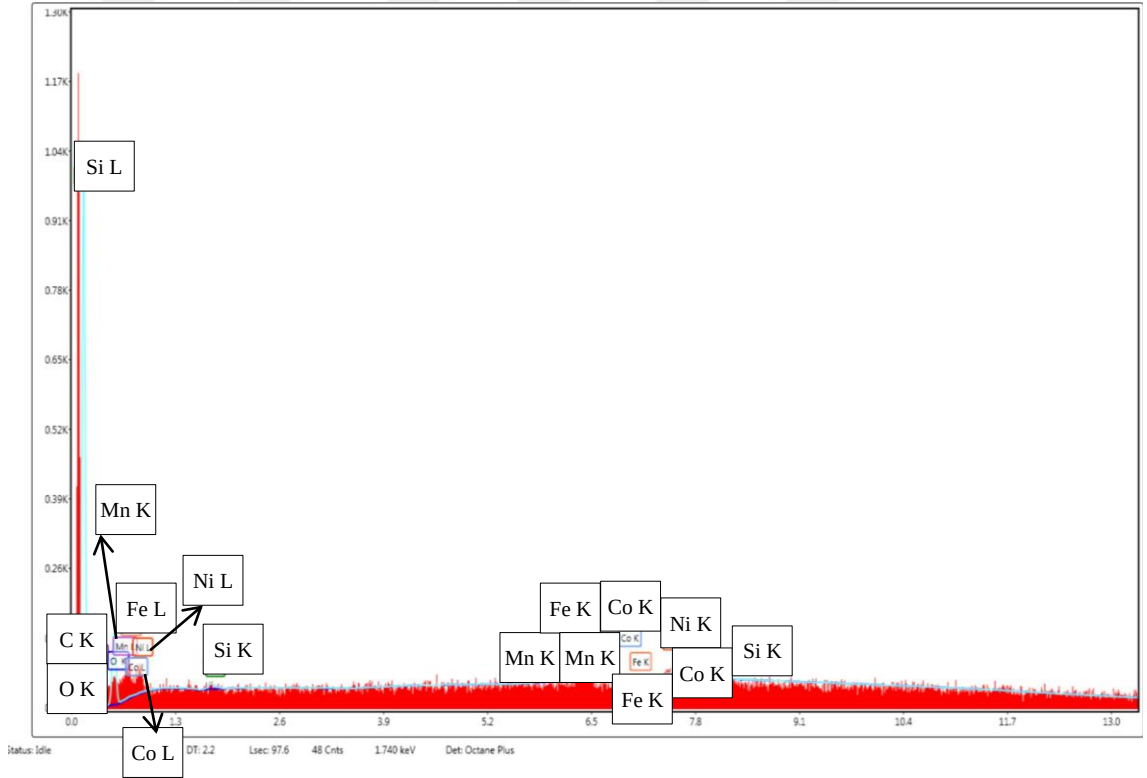
S49 çeliğinden üretilen R260 kalite ray numunelerinin mikroyapısında meydana gelen değişimleri belirlemek amacıyla C3 numunesinin ve ısıtıl işlem uygulanan numunenin EDS analizleri yapılmış, elde edilen değerler ve EDS grafiği aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.47. 8000C sıcaklığa kadar ısıtıl işlem uygulanmış numunenin 1. Bölge EDS sonuçları ve grafiği



Element	Ağırlık (%)
C	36.1
O	18.75
Fe	38.79
Si	0.5
Mn	1.27
Co	0.17
Ni	4.42



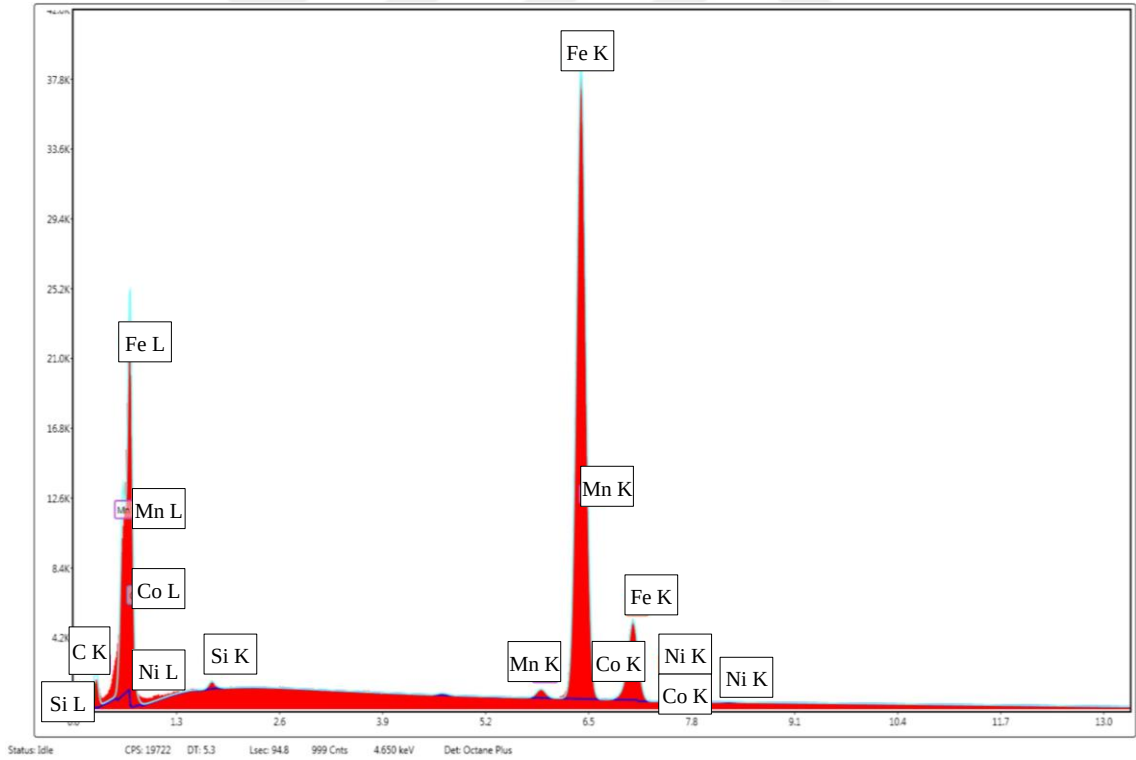
Şekil 4.48. 8000C sıcaklığa kadar ısıtılmış numunenin 2. Bölge EDS sonuçları ve grafiği

Bu şekillerde ısıtılmış numunelerin birleşimini oluşturan C, O, Fe, Si, Mn, Co ve Ni elementlerinin varlığı açık bir şekilde görülmektedir. S49 ray çeliğinin birleşimini oluşturan C oranının %36,1, O oranının %18,75 ve Fe oranının %38,79 olduğu yapılan EDS testi sonucunda tespit edilmiştir. Numunenin oksijen içeriğinin yüksek olması dış etkilere karşı yoğun bir oksit tabakası tarafından korunduğunu

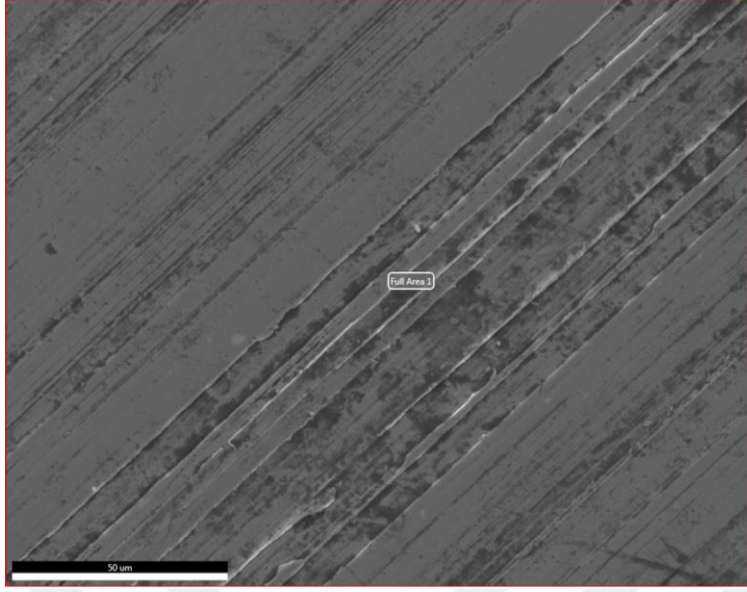
göstermektedir. Fe oranının çok yüksek olmaması rayın çekme mukavemetinin ve kırılma dayanıklılığının yüksek olduğunu göstermektedir.



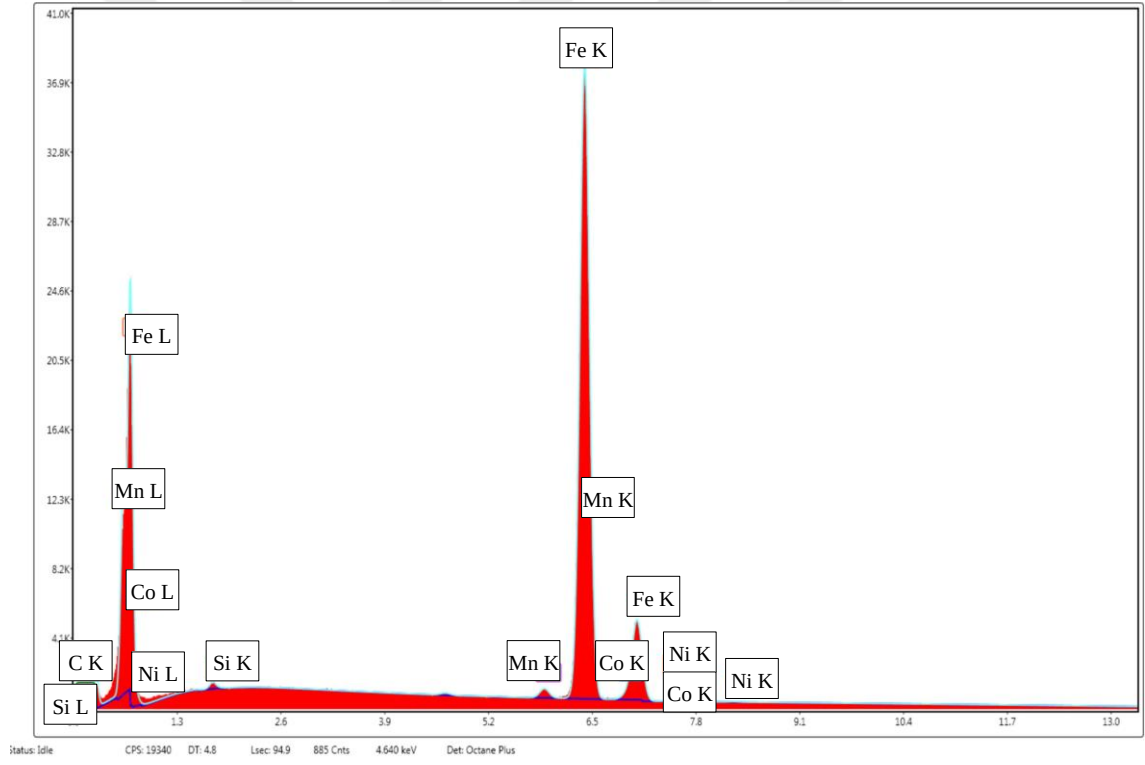
Element	Ağırlık (%)
C	6.76
Si	0.28
Mn	0.95
Fe	90.88
Co	0.93
Ni	0.2



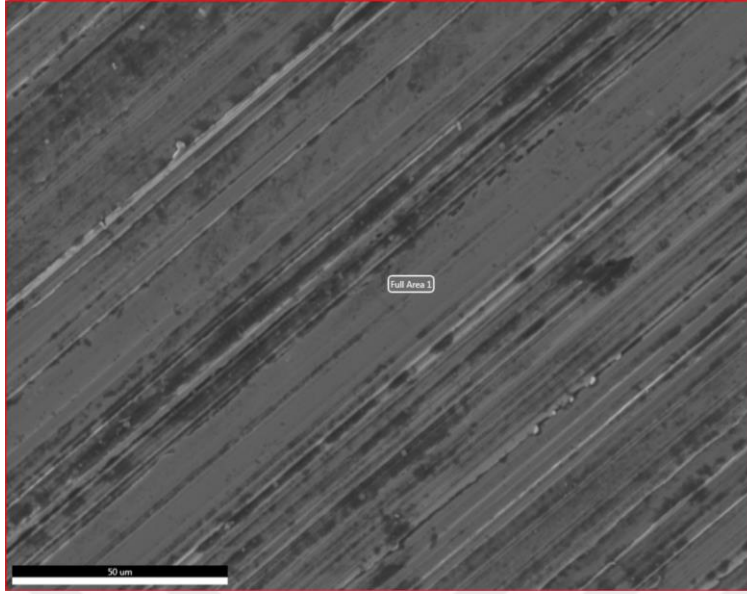
Şekil 4.49. 30MPa yük ve 6000 metre kayma yolunda aşındırılmış C3 numunesine ait 1. Bölge EDS sonuçları ve grafiği



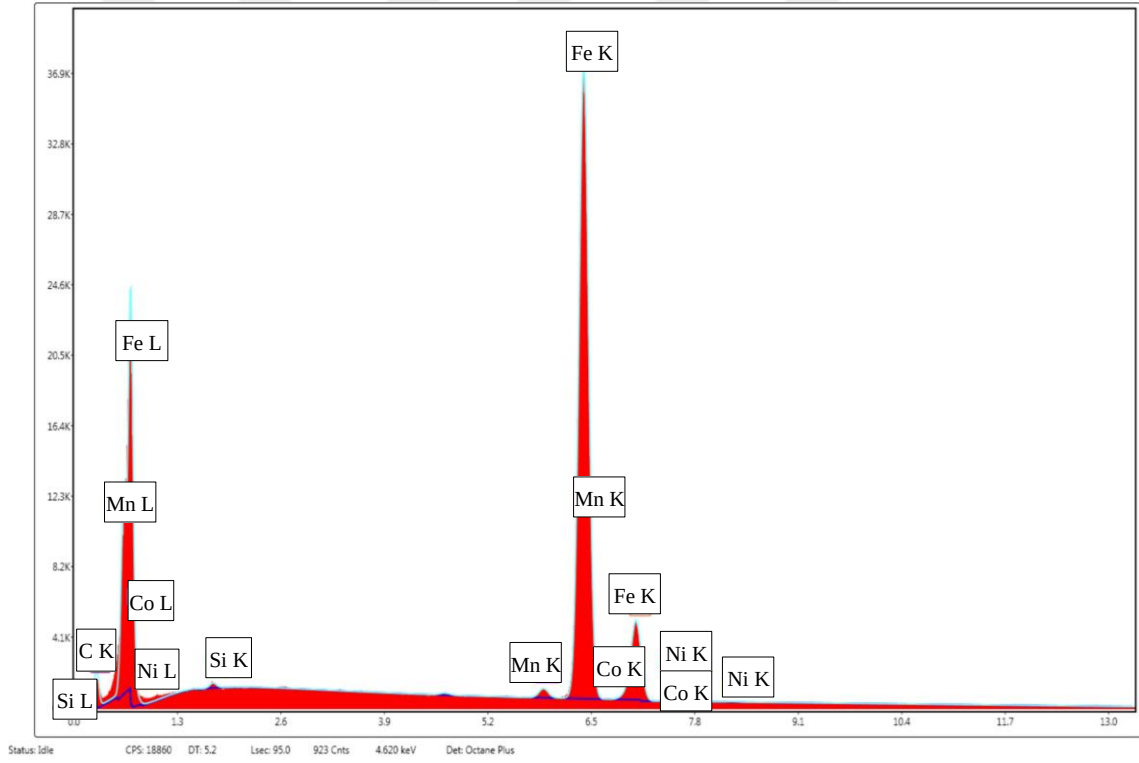
Element	Ağırlık (%)
C	5.62
Si	0.25
Mn	1
Fe	91.98
Co	0.97
Ni	0.18



Şekil 4.50. 30MPa yük ve 6000 metre kayma yolunda aşındırılmış C3 numunesine ait 2. Bölge EDS sonuçları ve grafiği



Element	Ağırlık (%)
C	6.72
Si	0.18
Mn	0.98
Fe	91.06
Co	0.87
Ni	0.19



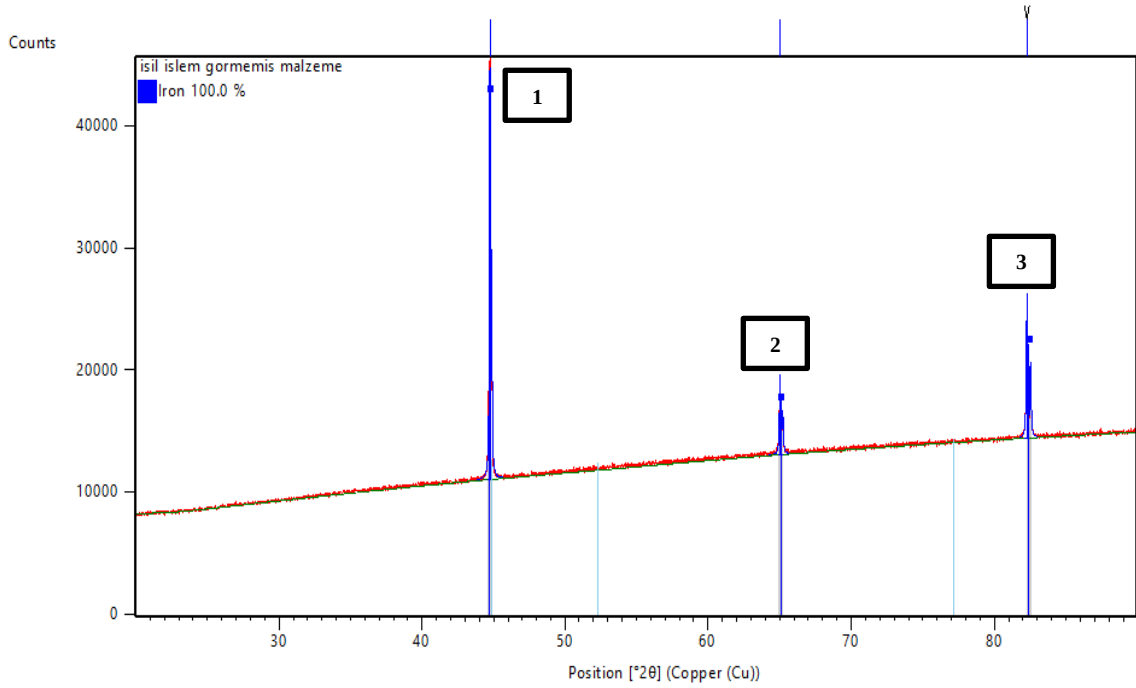
Şekil 4.51. 30MPa yük ve 6000 metre kayma yolunda aşındırılmış C3 numunesine ait 3. Bölge EDS sonuçları ve grafiği

Isıl işlem uygulanmış ve 30MPa yük ve 6000 metre kayma mesafeli aşındırma testine tabi tutulmuş numunelere ait SEM ve EDS sonuçları ile grafikleri Şekil 26, 27, 28, 29 ve 30'da gösterilmiştir. EDS sonuçlarına göre C3 numunesinin birleşiminde C, Si, Mn, Fe, Co ve Ni elementlerinin bulunduğu görülmektedir. EDS değerleri ve

grafiklerden de görüldüğü aşınma testine tabi tutulan C3 numunesinin oksijen içeriğinin tamamıyla yok olduğu EDS grafiğinden anlaşılmaktadır. Bu durum S49 ray çeliğinin doğal yapısında bulunan ve dış etkilere koruyan oksit tabakasının yok olmasına neden olmaktadır. C3 numunesinin Fe içeriğinin artması numunenin sertliğini arttırırken, aynı zamanda numunenin kırılganlığını da arttırdığı sonucunu ortaya koymaktadır.

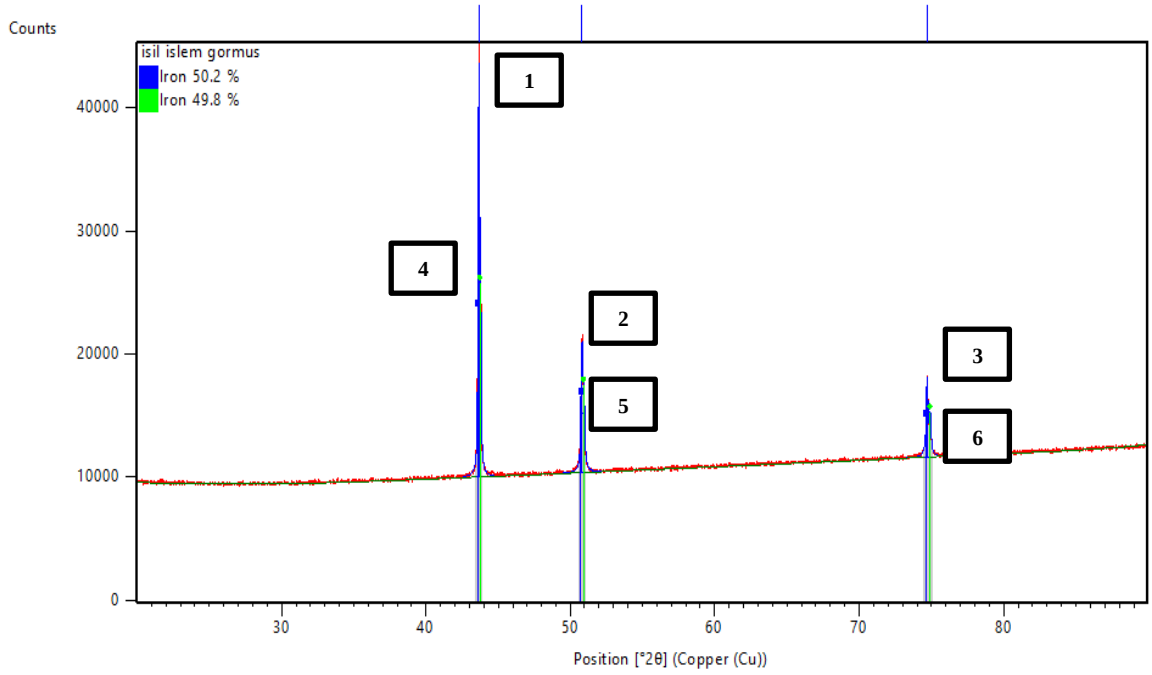
5.3. XRD Testi Sonuçları

Araştırma kapsamında incelenen S49 ray çeliği numunelerinde XRD testi ile birleşimlerini ve fazları Şekil 31 ve Şekil 32’de verilmiştir.



Şekil 4.52. Isıl işlem görmemiş numuneye ait XRD1 grafiği

S49 çeliğine ait ısıl işlem görmemiş orijinal numuneye ait XRD grafiği incelendiğinde 1 2 ve 3 nolu piklerin faz yapısının “ α -Fe” den ibaret olduğu görülmektedir.



Şekil 4.53. Isıl işlem görmüş numuneye ait XRD2 grafiği

S49 çeliğine ait ısıtılmış numuneye ait XRD grafiği incelendiğinde 1, 2 ve 3 nolu piklerin faz yapısının “ α -Fe”, 4, 5 ve 6 numaralı piklerin faz yapılarının da “Fe”den ibaret olduğu görülmektedir.

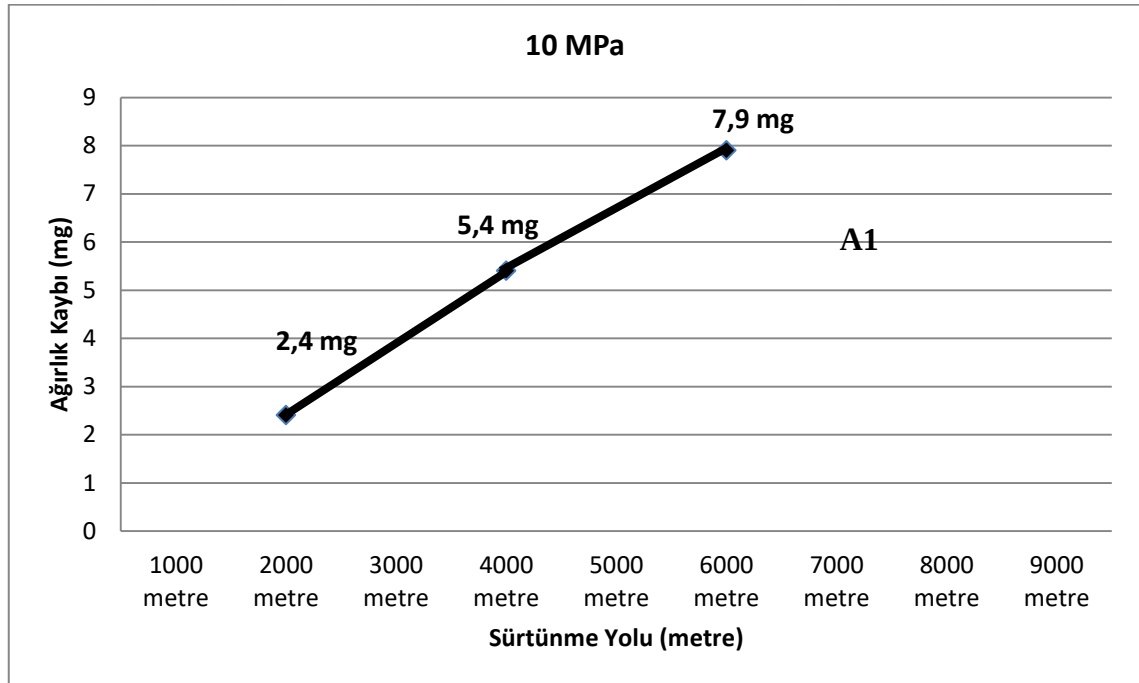
5.4. Aşınma Testi Sonuçları

S49 ray çeliğinden alınan numuneler 10 MPa, 20 MPa, 30 MPa olmak üzere üç farklı kuvvette, 300 devir/dakika, 600 devir/dakika ve 900 devir/dakika kayma hızlarında ve 2000 m, 4000m ve 6000m kayma mesafelerinde tek tip aşındırıcı kullanılarak oda sıcaklığında aşındırma testlerine tabi tutulmuştur. Numunelerin aşınma miktarları ağırlık kaybı tespit edilerek hesaplanmıştır. Numuneler aşındırma işlemine maruz bırakılmadan önce kütleleri hassas terazi ile ölçülerek belirlenmiştir. Numuneler aşındırma işlemine tabi tutulduktan sonra üzerinde kalan yabancı maddelerin ve çapakların giderilmesi amacıyla alkol ile temizlenip kurutulduktan sonra tekrar hassas terazide ağırlıkları ölçülerek ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Değişen yük, kayma yolu ve kayma hızlarına göre kütle kayıp oranları belirlenmiş ve Tablo 4’te verilmiştir.

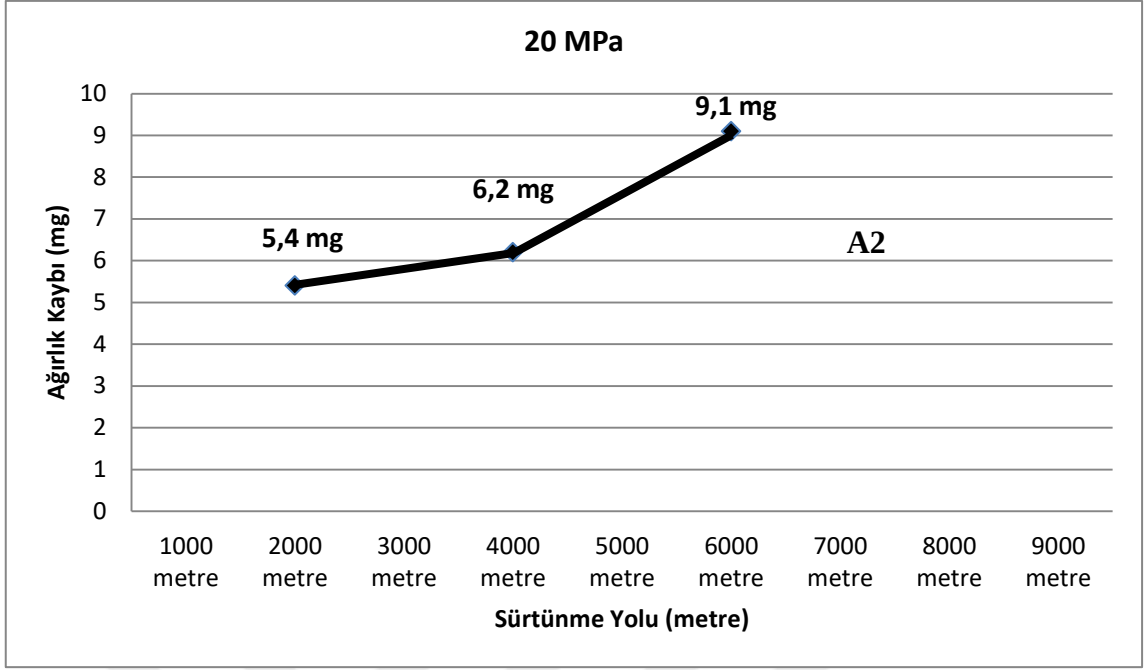
Tablo 4.2. Numunelerin aşındırma işlemi sonucundaki kütle kayıp değerleri

Numune Adı	Kayma Miktarı (m)	Aşınma Kaybı (mg)	Yük Miktarı (MPa)
A1	300 devir/dakika-2000 metre	2,4	10 MPa
	600 devir/dakika-4000 metre	5,4	
	900 devir/dakika-6000 metre	7,9	
A2	300 devir/dakika-2000 metre	5,4	20 MPa
	600 devir/dakika-4000 metre	6,2	
	900 devir/dakika-6000 metre	9,1	
A3	300 devir/dakika-2000 metre	7,9	30 MPa
	600 devir/dakika-4000 metre	9,1	
	900 devir/dakika-6000 metre	11,2	

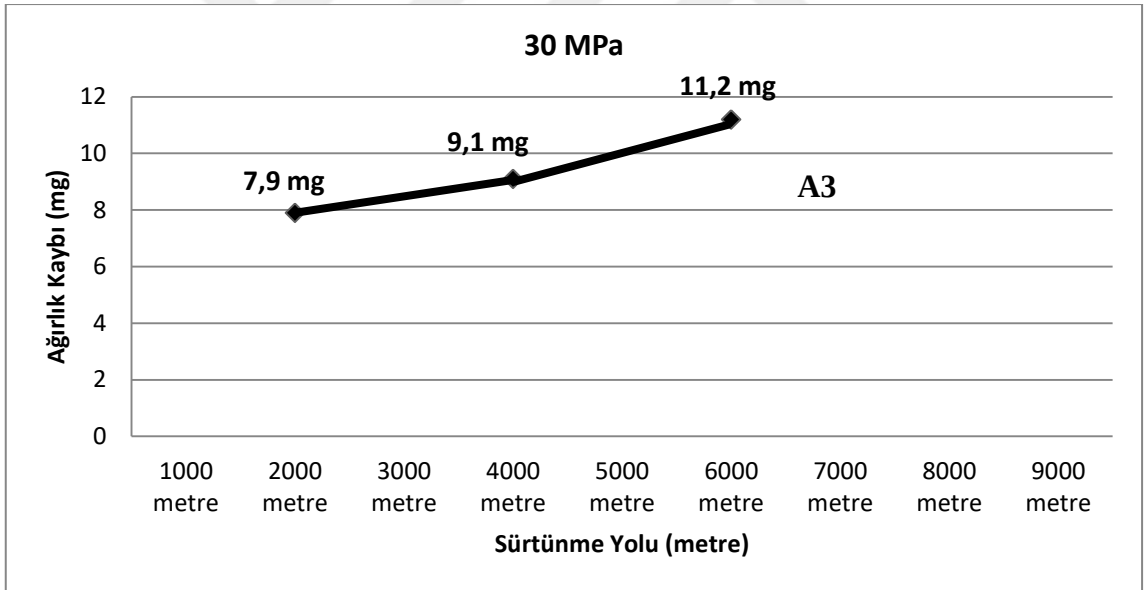
S49 ray çeliklerinin aşınma testi öncesindeki ve aşınma testi sonrasındaki kütleleri arasındaki farklar Tablo 4'te görülmektedir. Numunelere uygulanan yük değerleri, kayma yolu ve kayma hızı değerleri arttıkça numunelerdeki aşınma miktarının da aynı oranda arttığı aşınma testi sonucunda tespit edilmiştir.



Şekil 4.54. S49 ray çeliğinin 10 MPa yük altında değişen kayma yoluna göre aşınma miktarı



Şekil 4.55. S49 ray çeliğinin 20 MPa yük altında değişen kayma yoluna göre aşınma miktarı



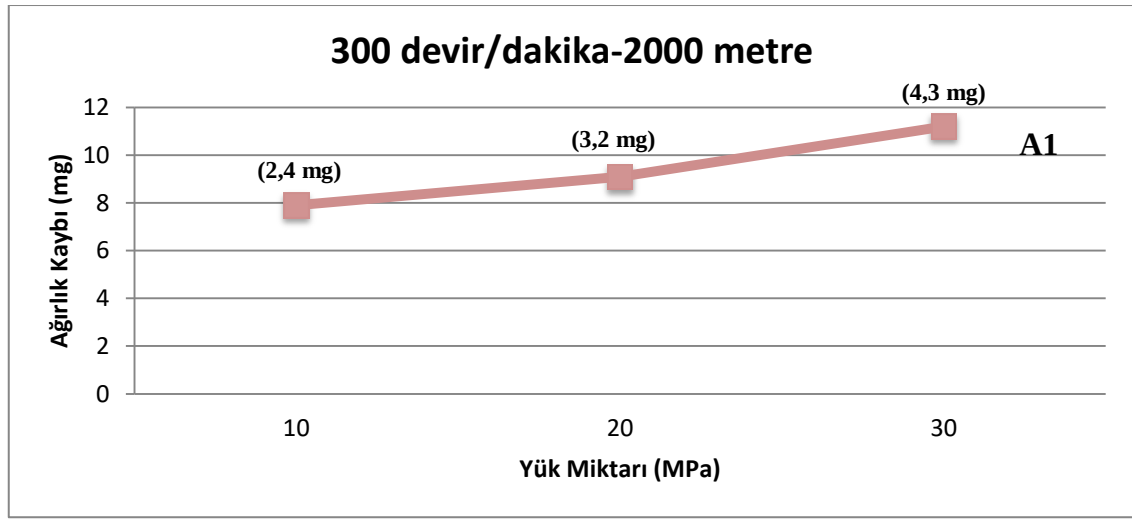
Şekil 4.56. S49 ray çeliğinin 30 MPa yük altında değişen kayma yoluna göre aşınma miktarı

Şekil 4.54, 4.55 ve 4.56'daki grafikler incelendiğinde yük miktarı sabit kalmak koşuluyla kayma yolu arttıkça numunelerin ağırlık kayıplarının da doğru orantılı olarak arttığı araştırma sonucunda tespit edilmiştir.

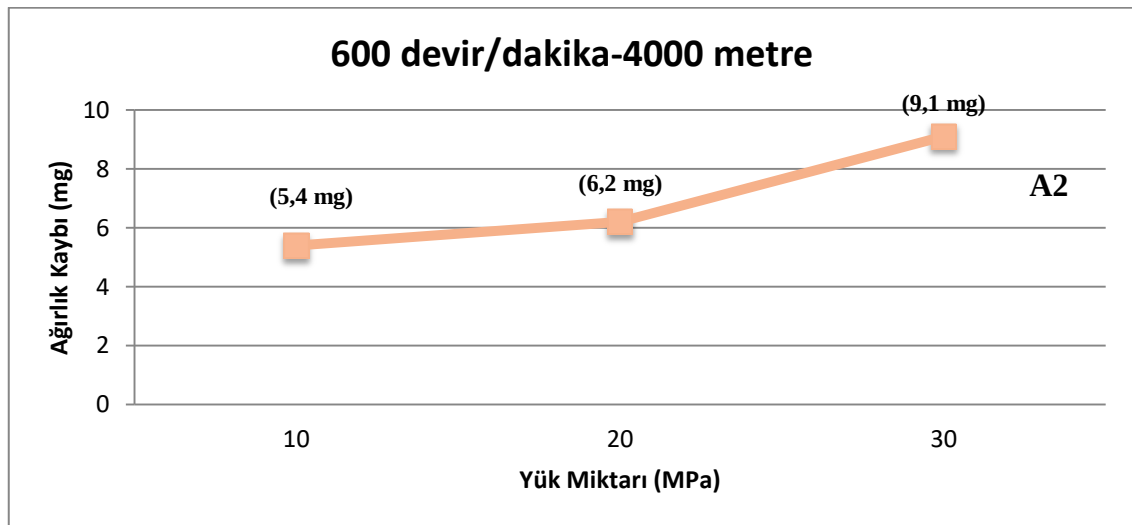
Numunelerin basınç değişimine göre aşınma miktarları Tablo 4.2 ve Şekil 4.54, Şekil 4.55 ve Şekil 4.56'da gösterilen grafiklerde verilmiştir.

Tablo 4.3. Numunelerin basınç değişkenine göre aşınma miktarları

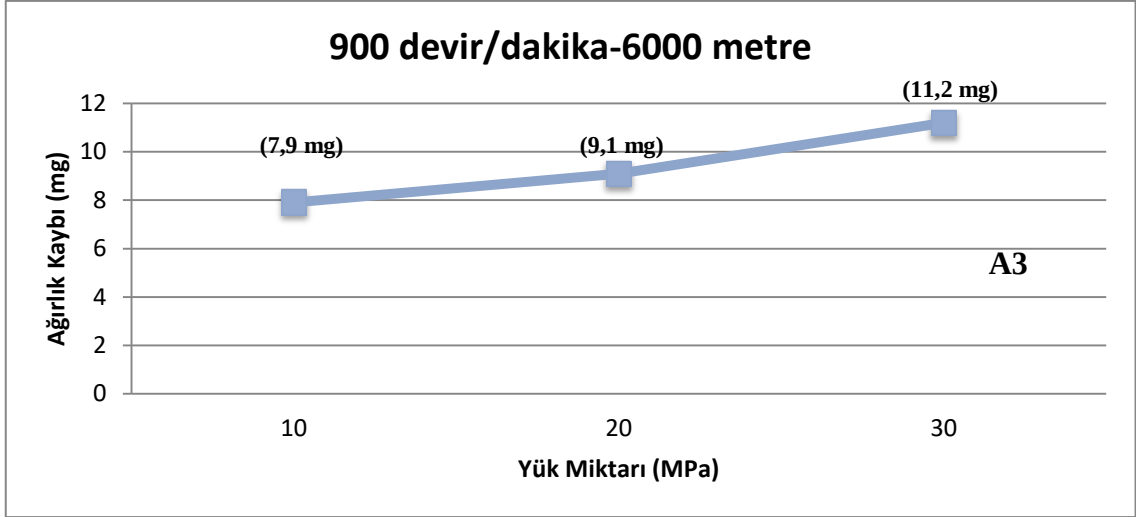
Numune Adı	Yük Miktarı (MPa)	Aşınma Miktarı (mg)	Kayma Hızı ve Mesafesi
A1	10	2,4	300 devir/dakika, 2000 metre
	20	3,2	
	30	4,3	
A2	10	5,4	600 devir/dakika, 4000 metre
	20	6,2	
	30	9,1	
A3	10	7,9	900 devir/dakika, 6000 metre
	20	9,1	
	30	11,2	



Şekil 4.57. S49 ray çeliğinin 300 devir/dakika kayma hızı ve 2000 metre kayma yolunda değişen yük değişkenine göre aşınma miktarı



Şekil 4.58. S49 ray çeliğinin 600 devir/dakika kayma hızı ve 4000 metre kayma yolunda değişen yük değişkenine göre aşınma miktarı



Şekil 4.59. S49 ray çeliğinin 900 devir/dakika kayma hızı ve 6000 metre kayma yolunda değişen yük değişkenine göre aşınma miktarı

S49 ray çeliklerinin yük değişkenine göre aşınma miktarında meydana gelen değişimler Şekil 4.57, Şekil 4.58 ve Şekil 4.59'daki grafiklerde de görülmektedir. Basınç değeri arttıkça numunelerde kopan parçacık miktarı artmakta ve daha yüksek miktarda kütle kayıpları görülmektedir. Tablo 4.3 ve şekiller incelendiğinde aşınma miktarının sadece değişen yük miktarına bağlı olmadığı aynı zamanda kayma yolunun ve kayma hızının da aşınma miktarını etkilediği açık bir şekilde görülmektedir. Numunelere uygulanan kayma hızı ve kayma yolu arttıkça numunelerde görülen kütle kayıplarının yani aşınma miktarının arttığı sonucu yapılan çalışma doğrultusunda ortaya çıkmıştır.

6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

S49 çeliği kullanılarak üretilen herhangi bir işleme tabi tutulmayan R260 kalite ray numunelerinin mikroyapısı “Fe” ve “ α -Fe” fazlarından oluşmuştur.

S49 ray çelikleri 550-575-600⁰C sıcaklıklara kadar ısıtılıp havada soğumaya işlemine tabi tutulmuştur. Uygulanan ısıtım işlemi neticesinde S49 ray çeliğinin lamelleri incelmış perlitik yapısı elde edilmiştir. Isıtım işlemi sonucunda S49 ray çeliklerinin sertlik değerlerinde artış meydana gelmiştir.

Isıtım işlemi uygulanan numunenin %3'lük nital ile dağlanma işlemi uygulanması sonucunda perlitik yapının belirginleştiği tespit edilmiştir. Isıtım işlemi ve dağlama işlemi neticesinde S49 ray çeliklerinin doğal yapısında bulunan ve dış etkilere koruyan kırmızı-kahverengi oksit tabakasının yüzeyde daha yoğun bir şekilde dağıldığı tespit edilmiştir.

S49 ray çeliklerinden elde edilen numunelere farklı yük, kayma mesafeleri ve kayma hızlarında aşınma testi uygulanmıştır. Aşınma testleri sonucunda yük, kayma yolu ve kayma hızlarına göre aşınma miktarının da farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.

Aşınma miktarının kütle kaybı yöntemiyle ölçüldüğü araştırmamızda numuneler 10 MPa, 20 MPa ve 30 MPa yükler altında aşındırılmıştır. Numuneler üzerine etki eden yük miktarı arttıkça numunelerdeki ağırlık kayıplarının da arttığı tespit edilmiştir. Bu durum yük miktarının artmasıyla S49 ray çeliklerinde görülen aşınma miktarının da arttığı sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Farklı yükler altında aşınan numunelere ait SEM ve optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde de yük miktarının numunelerin aşınma miktarları üzerinde etkili olduğu açıkça görülmektedir. 10 MPa yük altında aşındırılan numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma yönündeki aşınmaların yüzeysel olduğu ve kırmızı-kahverengi oksit tabakasının yüzeyde dağıldığı SEM ve optik mikroskop görüntülerinde görülmektedir. Bu durum düşük basınç altında numunelerde düşük düzeyde adhesiv aşınma görüldüğü sonucunu açığa çıkarmaktadır. 30 MPa'lık yük altında aşındırılan numunelerin yüzeylerinde aşınma yönünde oluşmuş derin aşınmaların varlığı ve kırmızı-kahverengi oksit tabakasının yok olması adhesiv aşınma düzeyinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Numunelerdeki kütle kayıplarının yük miktarlarının yanı sıra kayma hızı ve kayma yoluna göre değiştiği de araştırma sonucunda tespit edilmiştir. 300 devir/dakika ve 2000 metre kayma yolunda numunelerdeki ağırlık kayıplarının; 600 devir/dakika-4000 metre kayma yolu ve 900 devir/dakika-6000 metre kayma yolunda aşındırılan numunelerin ağırlık kayıplarından daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu durum kayma hız ve kayma yolu arttıkça numunelerin aşınma miktarlarının da arttığı sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

Farklı kayma hızı ve kayma mesafelerinde aşınan numunelere ait SEM ve optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde de kayma hızı ve kayma yolunun numunelerin aşınma miktarları üzerinde etkili olduğu açıkça görülmektedir. 300 devir/dakika kayma hızı ve 2000 metre kayma yolunda aşındırılan numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma yönündeki aşınmaların yüzeysel olduğu ve kırmızı-kahverengi oksit tabakasının yüzeyde dağıldığı SEM ve optik mikroskop görüntülerinde görülmektedir. Bu durum düşük kayma hızı ve kayma mesafelerinde, düşük düzeyde adhesiv aşınma görüldüğü sonucunu açığa çıkarmaktadır. 900 devir/dakika kayma hızı ve 6000 metre kayma yolunda aşındırılan numunelerin yüzeylerinde aşınma yönünde oluşmuş derin aşınmaların varlığı ve kırmızı-kahverengi oksit tabakasının azalması adhesiv aşınma düzeyinin yüksek olduğunu göstermektedir.

S49 ray çeliklerinin mikroyapılarındaki değişimleri belirlemek amacıyla 30 MPa yük, 900 devir/dakika kayma hızı ve 6000 metre kayma yolunda aşındırılan C3 numunesinin ve ısıtıl işlem görmüş numunenin EDS analizi yapılmıştır. EDS sonuçlarına göre C3 numunesinin birleşiminde C, Si, Mn, Fe, Co ve Ni elementlerinin bulunduğu görülmektedir. EDS değerleri ve grafiklerden de görüldüğü aşınma testine tabi tutulan C3 numunesinin oksijen içeriğinin tamamıyla yok olduğu EDS grafiğinden anlaşılmaktadır. Bu durum S49 ray çeliğinin doğal yapısında bulunan ve dış etkilerden koruyan oksit tabakasının yok olmasına neden olmaktadır. C3 numunesinin Fe içeriğinin artması numunenin sertliğini artırırken, aynı zamanda numunenin kırılganlığını da arttırdığı sonucunu ortaya koymaktadır.

Numunelerin mikroyapılarındaki değişimleri belirlemek amacıyla S49 ray çeliklerinden elde edilen ısıtıl işlem görmüş ve herhangi bir işleme maruz bırakılmamış (orijinal) numunenin XRD analizleri yapılmıştır. XRD analizleri sonucunda ısıtıl işlem

görmemiş numunenin yapısının Fe elementinden oluştuğu görülürken, ısıtıl işlem görmüş numunenin yapısının “ α -Fe” fazı ve “Fe” elementinden oluştuğu tespit edilmiştir.

Araştırma sonucunda elde edilen bulgulara dayanarak şu önerilerde bulunulabilir:

1. S49 ray çeliklerinin diğer mekanik etkiler karşısında mikroyapısında ve aşınma davranışlarında meydana gelen değişimler incelenebilir.
2. Farklı aşınma deney cihazlarında aşınma işleminin gerçekleştirilmesi farklı cihazlarla denenebilir.
3. S49 ray çeliğinin yapısını oluşturan elementlerin oranları değiştirilerek ya da S49 ray çeliği alaşımına farklı elementler eklenerek mekanik özelliklerindeki değişimler incelenebilir.
4. Ray numunelerinin aktif demiryolu hatlarında aşındırılması denenebilir ya da ölçülebilir.

KAYNAKLAR

- Ağlan, H.A., Hassan, M.F., Fateh, M., Liu, Z.Y.,** 2004, Beynitli Ray eliklerinin Me- Kanik zellikleri ve Kırılma Davranışları. Journal of Materials Processing Technology. 1(3): 268–274.
- Akbulut, H.,** 2006, “Malzemelerin Sürtünme Ve Aşınma Ders Notları”, Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 1-22.
- Akpınar, B.,** 2009, Ray Hattı Geometrik Değişimlerinin Belirlenmesine Yönelik Ölçme Sistemi Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Arslan, M.,** 1996, Rayların Aşınma Analizi ve Aşınmayla İlgili Formülasyon Çalışması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- ASM International,** 2005, High-Carbon Steels: Fully Pearlitic Microstructures and Applications, Steels: Processing, Str. and Perf., 281-295.
- Ay, İ.,** 2012, Aşınma Hasarları, Hasar Analizi Ders Notları, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- Balcı, B.,** 2008, AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çelik Malzemenin İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün İncelenmesi, Bilim Uzmanlığı Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Başkonuş, M. ve Tekin, E.,** 2012, Yüksek Hızlı Tren Olgusu, Mantarı Sertleştirilmiş ve Beynitli Ray Çelikleri, International Iron & Steel Symposium, Nisan 2012, Karabük, s. 234-240.
- Bayrak, M.,** 2002, Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi ve Uzman Sistemle Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-35.
- Blau, P.J. and Budinski, K.G.,** 1999, “Development and use of astm standards for wear testing”, Oak Ridge National Laboratory, 225 (2): 1159-1170.
- Bozkurt, F.,** 2016, Ray. Anadolu Üniversitesi. https://www.academia.edu/3685810/RAY_%C3%B6dev (Erişim Tarihi: 01.08.2017)
- Büyükkelleci, Ü.,** 2008, Yeni Bir Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve Bazı Metallerin Aşınma Davranışlarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

- Candemir, İ.**, 2005, Hızlı Raylı Sistemlerde Taşlama Çalışmasının Önemi, Değerlendirilmesi ve Türkiye’deki Örnekleri, 6. Ulaştırma Kongresi, 426-439.
- Çakmak, İ. ve Yalçın, Y.**, 2005, Ray Çeliğinin Kuru Yuvarlanma-Kayma Aşınma Davranışının İncelenmesi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 1: 17-23.
- Çelikyürek, İ.**, 2006, “Demir Alüminantların Borlanması ve Aşınma Özelliklerinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 107-108.
- Çetin, M., Gül, F.**, 2006, Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Abrasiv Aşınma Davranışına Östemperleme İşleminde Soğutma Etkisi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt:21 No:2, 359-366.
- Çiçek, B.**, 2011, Mg₂Si Partikül Takviyeli Mg Alaşımlarının Aşınma Ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Erdemir, A.Ş.**, 2006, “Çelik Yüzeylerinin Kaplanması”, Erdemir Yayınları, Karadeniz. Ereğli, 9-11.
- Erel, A.**, 2009, Raylı Sistemlerde Dalgalı Aşınma, Kent ve Demiryolu Dergisi, 3-12.
- Eryürek, B.İ.**, 1993, Hasar Analizi, Birsen Kitabevi, İstanbul.
- Evin, E., Aksoy, M.**, 1999, Farklı Isıl İşlemlerle Sertleştirilmiş Küre Grafitli Dökme Demirin Aşınma Davranışının İncelenmesi, Bilim Günleri, 2, 8.
- Kalaycıoğlu, O.**, 2006, Kardemir’de ray üretiminde iyileştirmeler. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Kamlesh, K. J. and Murthy, R.**, 2002, “Improvements in rail steel metallurgy for 32.5 T axle load”, N.E.Railway Southern Railway Publish, Project Report No:721, 1-27.
- Kapoor, A., Franklin, F.J., Wong, S.K. and Ishida, M.**, 2002, Surface Roughness and Plastic Flow in Rail Wheel Contact, Wear, 253: 257–264.
- Kesti, E.**, 2009, Ç-4140 Çeliğinin, Mikro Yapı Ve Mekanik Özelliklerine Su Ver-me Ortamının Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Klaasen, H. Vainola, V. and Kübarsepp, J.**, 2006, “Abrasive Wear And Mechanical Properties Of Carbide Composites”, Materials Science, 12 (1): 520-526.

- Korkut, M.H.**, 1991, Sürtünmeye Maruz Metalik Disklerin Aşınmış Bölgelerinde Dolgu Kaynak İşleminde Sonra Aşınma Özelliklerinin Değişiminin Deneysel Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Korkut, M.H.**, 1997, Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapısı ve Aşınması Üzerine Karbür Yapıcı Elementlerin Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Koymatçık, H.**, 2012, R260 Kalite Rayların Optimum Mantar Sertleştirme Parametrelerinin Belirlenmesi Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük.
- Kuş, H.**, 2007, Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2,5,22-35,70,73.
- Liu, Q.Y., Zhang, B. and Zhou, Z.R.**, 2003, An Experimental Study of Rail Corrugation, Wear, 255: 1121–1126.
- MEGEP**, 2015, Raylar ve Bağlantılar, Milli Eğitim Bakanlığı Mesleki Eğitim Ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, <http://megep.meb.gov.tr> (Erişim Tarihi: 08.07.2017).
- Neşeli, S.**, 2006, Tornalamada Takım Geometrisi ve Tırlama Titreşimlerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Onay, M.**, 2011, Demiryollarında Aluminotermite Kaynak İle Yakma Alın Kaynak Yöntemlerinin Teknik ve Ekonomik Yönden Karşılaştırılması, Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Osmanoğlu, T.**, 2012, A1sı 304 Ve 430 Kalite Paslanmaz Çeliklerin Mikro yapılarına, Mekanik Özelliklerine Ve Korozyon Davranışlarına Soğuk Deformasyonun Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özden, M.**, 2011, Demiryolu Raylarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Özsaraç, U. ve Durman, M.**, 2000, “Aşınma deney yöntemleri” Makine Magazin, 46: 40-46.

- Özsaraç, U.,** 2005, Raylı Taşıtlarda Teker Bandajı-Ray Sisteminde Dolgu Kaynağı ve Sabo Parçaların Aşınma ve Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Öztürk, Z., Arlı, V.,** 2009, Demiryolu Mühendisliği, ATM Dijital Baskı ve Matbaacılık, İstanbul.
- Palabıyık, O.,** 2013, Soğuk Deformasyonun AISI 304 Ve AISI 204Cu Kalite Paslanmaz Çeliklerin Mikro Yapılarına, Mekanik Özelliklerine Ve Korozyon Davranışlarına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Rovira, A., Roda, A., Marshall, M.B., Brunskill, H. and Lewis, R.,** 2011, Experimental and Numerical Modelling Of Wheel–Rail Contact and Wear, *Wear*, 271: 911– 924.
- Sarı, Y.N., Yılmaz, M.,** 2000, Ni-Esaslı Kaplamaların Abrasif–Erozif Aşınma Direncinde Isıl Püskürtme Yönteminin ve WC İlavesinin Etkisi, *Mühendis ve Makina*, 46 (541): 16.
- Schleiner, G. ve Fischer, F.D.,** 2000, Demiryolu raylarında doğrultma sonucunda oluşan kalıntı gerilmeleri. *International Journal of Mechanical Sciences*, Mart 2000, Leoben-Austria s. 2281–2295.
- Soydan, Y., Ulukan, L.,** 2003, Triboloji: Sürtünme, Aşınma, Yağlama Bilimi ve Teknolojisi, Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Merkezi Teknolojik Yayınlar Serisi No: 1, Sakarya.
- Soydaş, S.,** 2006, Üiversal Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Suda, Y., Komine, H., Iwasa, .T and Terumichi, Y.,** 2002, Experimental Study On Mechanism Of Rail Corrugation Using Corrugation Simulator, *Wear*, 253: 162-171.
- Taşgın, Y. ve Kaplan, M.,** 2007, “Dubleks Tekniğiyle Üretilen FeCrC Katkılı Malzemenin Abrasif Aşınma Davranışlarının Araştırılması”, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, (7): 217-224.
- Thakur, R.C., Topno, R., Krishna, B., Roy, B., Murty, G.M.D.,** 2006, Raylarda kalıntı gerilmelerinin ölçülmesi. *Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation*, Aralık 2006, Indian, s. 7-9.

- Turan, M.E.**, 2015, R260 Kalite Tren Raylarında Kalıntı Gerilmenin Belirlenmesi Ve Bunun Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları**, 2010, “Konvensiyonel Hatların Yol Bilgileri”, T.C. Devlet Demiryolları İstatistik Yıllığı 2006-2010, (24), s. 1-39.
- Uğur, İ.**, 2012, Maden Makinaları, İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Ders Notları, İstanbul.
- Ünlü, B.S., Köksal, N. S. ve Atık, E.**, 2003, “Bakır Esaslı Bronz ve Pirinç Yatakların Tribolojik Özelliklerinin Karşılaştırılması”, Denizli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 5 (2): 103-108.
- Yıldızlı, K., Odabaş, D. ve Nair, F.**, 2003, “Borlanmış AISI 1020 Çeliğinin Eroziyon Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 131-139.
- Yiğit, O., Dilmeç, M., Halkacı, S.H.**, 2008, Tabaka Kaldırma Yöntemiyle Kalıntı Gerilmelerin Ölçülmesi ve Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması. Mühendis ve Maki-ne Dergisi, 49 (579): 20–27.
- Yücel, H.**, 2009, “Hızlı Demiryolu Üstyapı Elemanlarının Kabul ve Uygunluk Ölçütleri: Ankara-Eskişehir Hızlı Tren Projesi Örneği”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zhan, X. and Wang, S.**, 2005, “Research On The Improvement Of Rail Head Hardening Technology On Railway”, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 5: 263 – 271.

ÖZGEÇMİŞ

Erkan YÜKSEL

01.05.1988 tarihinde Adana’da doğdu. İlk ve ortaöğrenimini Adana’da okudu. 2009 yılında Elazığ Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Öğretmenliği bölümünde başladığı lisans öğrenimini 2013 yılında tamamladı. Akabinde 2013 yılında başladığı Sosyal Bilimler Enstitüsü İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalında Tezsiz Yüksek Lisans eğitimini 2014 yılında tamamladı. 2014 yılında Tunceli Üniversitesi’nde Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde fark derslerini vererek 2015 yılında Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu.