

Ağır Hizmet Dizel Motoru Silindir Gömleğine Uygulanan Farklı Kaplamaların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

Onur Bıyıklıoğlu

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Raylı Sistemler Anabilim Dalı

Ađustos 2018

Investigation of Wear Behavior of Different Coatings Applied to Heavy Duty Diesel
Engine Cylinder Liner

Onur Bıyıklıoğlu

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Railway System Engineering

Aug 2018

Ağır Hizmet Dizel Motoru Silindir Gömleğine Uygulanan Farklı Kaplamaların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

Onur Bıyıklıoğlu

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliđi Uyarınca

Raylı Sistemler Anabilim Dalı

Raylı Sistemler Araç Tasarım Mühendisliği Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. M. Ertunç Tat

Ađustos 2018

ONAY

Raylı Sistemler Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Onur BIYIKLIOĞLU'nun YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Ağır Hizmet Dizel Motoru Silindir Gömleğine Uygulanan Farklı Kaplamaların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. M. Ertunç TAT

İkinci Danışman : —

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Doç. Dr. M. Ertunç TAT

Üye : Doç. Dr. Mustafa ULUTAN

Üye : Doç. Dr. Önder TURAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Mustafa Ertunç Tat danışmanlığında hazırlamış olduğum “Ağır Hizmet Dizel Motoru Silindir Gömleği’ne Uygulanan Farklı Kaplamaların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. .../.../....

Onur BIYIKLIOĞLU

ÖZET

Dizel elektrikli lokomotiflerde işin yapılmasını ve sonuçlanmasını sağlayan enerjinin temel kaynağı ağır hizmet dizel motorlarıdır. Dolayısıyla dizel motorların verimini arttırmak, bakım ve onarım maliyetlerini en aza indirmek büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada Raylı Sistemlerde kullanılan bir ağır hizmet dizel motorunun silindir gömleği aşınma davranışı kaplamalı ve kaplamasız olarak incelenmiştir.

Motor içi sürtünme ve aşınma kayıplarının önemli bir bölümünü oluşturan silindir gömleği aşınma mekanizması irdelenerek, farklı kaplama malzemeleri kullanılarak silindir gömleği aşınma davranışlarının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda, silindir gömleğinden numuneler alınarak üç farklı kaplama malzemesi (Cr_3C_2 -NiCr, NiCr, Al_2O_3 - TiO_2) ile termal sprey kaplama yöntemiyle kaplanmıştır.

Aşınma testine tabi tutulan kaplanmış numunelerin sürtünme katsayıları ve aşınma oranlarının hesaplanması ve aşınma yüzeylerinin metalografik olarak incelenmesi neticesinde bütün kaplanmış malzemelerin aşınma dayanımlarının kaplanmamış malzemeye oranla daha yüksek olduğu saptanmıştır.

Aşınma deneyleri neticesinde, Al_2O_3 - TiO_2 kaplanmış numunenin aşınma oranı $0,03 (\text{mm}^3/\text{Nm}) \times 10^{-3}$, Cr_3C_2 -NiCr kaplanmış numunenin aşınma oranı $0,04 (\text{mm}^3/\text{Nm}) \times 10^{-3}$, NiCr kaplanmış numunenin aşınma oranı $0,06 (\text{mm}^3/\text{Nm}) \times 10^{-3}$ ve kaplamasız numunenin aşınma oranı ise $0,09 (\text{mm}^3/\text{Nm}) \times 10^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Aşınma oranları hesaplamaları sonucunda, Al_2O_3 - TiO_2 ve Cr_3C_2 -NiCr kaplanmış silindir gömleği numunelerinin en iyi aşınma direncini gösterdiğini, NiCr kaplanmış numunenin ise diğer iki kaplanmış numuneye göre daha düşük bir aşınma direnci göstermesine rağmen kaplamasız numuneden daha iyi bir aşınma direnci gösterdiği ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Raylı Sistemler, Triboloji, Dizel Motor Aşınması, Kaplama, Silindir Gömleği

SUMMARY

The main source of energy that enables the work to be performed and resulted in diesel electricity locomotives is heavy duty diesel engines. Therefore, to increase the efficiency and to minimize the maintenance and repair cost of diesel engines are very important. In this study, the wear behavior of coated and uncoated cylinder liner of heavy duty diesel engine that is used in Railway Systems is examined.

It is aimed to improve the wear behaviors of cylinder liners by using various coating materials and examining wearing mechanism of cylinder liner that constitutes big part of friction and wear losses in the engine. In this scope, samples were taken from cylinder liner and they were coated with three different coating materials ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, NiCr , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$) by using thermal spray coating process.

Following the calculation of the friction coefficient and the wear rate, and the metallographic examination on wearing surfaces of the samples that were subject to wear test, it is detected that wear resistance of all coated materials are higher than uncoated materials.

Following the wear tests, the wear rate of the sample coated with $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ has been calculated as $0,03 (\text{mm}^3/\text{Nm}) \times 10^{-3}$, and the wear rate of the sample coated with $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ has been calculated as $0,04 (\text{mm}^3/\text{Nm}) \times 10^{-3}$, and the wear rate of the sample coated with NiCr has been calculated as $0,06 (\text{mm}^3/\text{Nm}) \times 10^{-3}$, and the wear rate of the uncoated sample has been calculated as $0,09 (\text{mm}^3/\text{Nm}) \times 10^{-3}$. The wear test calculations indicate that samples coated with $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ and $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ have the highest wear resistance and the sample coated with NiCr has lower wear resistance compared to other two coated samples, which is still higher than the wear resistance of uncoated sample.

Keywords: Railway Systems, Tribology, Diesel Engine Wear, Coating, Cylinder Liner

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum bu çalışmamda ve tüm eğitim öğretim hayatım boyunca bana her türlü imkanı ve desteklerini sağlayan canım ailem başta olmak üzere, tez danışmanlığımı yapmakta olan hocam Doç. Dr. Mustafa Ertunç TAT'a ve diğer emeği geçen tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmamda bize her türlü imkanı sağlayan TÜLOMSAŞ Genel Müdürü Sayın Hayri Avcı ve diğer tüm çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Değerli görüşleri ile bana ışık tutan sayın jüri üyelerim Doç. Dr. Mustafa ULUTAN, Doç. Dr. Önder TURAN ve bölüm başkanımız Prof. Dr. H. Hüseyin ERKAYA hocalarıma da emeklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. TRİBOLOJİ	3
2.1. Sürtünme Mekanizmaları.....	3
2.2. Aşınma Mekanizmaları.....	6
2.2.1. Adhesif Aşınma.....	6
2.2.2. Abrasif Aşınma.....	8
2.2.3. Korozyif Aşınma.....	9
2.2.4. Yorulma Aşınması.....	10
2.3. Dizel Motor Aşınması.....	11
2.3.1. Silindir Gömleği Aşınması.....	12
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	15
4. MATERYAL VE YÖNTEM	18
4.1. Deney Numunesi Hazırlama.....	18

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.2. Kaplama Uygulaması.....	20
4.3. Optik Mikroskop İncelemeleri.....	21
4.4. Sertlik ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri.....	21
4.5. Aşınma Deneyleri.....	22
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	25
5.1. Optik Mikroskop İnceleme Sonuçları	25
5.2. Sertlik ve Yüzey Pürüzlülük Değerleri.....	27
5.3. Aşınma Test Sonuçları.....	28
5.4. SEM ve EDS Analiz Sonuçları.....	32
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	40
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	42

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Statik sürtünme katsayısı ölçüm düzeneği.....	4
2.2. Statik sürtünme katsayısı hesaplamasında kullanılan eğimli yüzey metodu.....	5
2.3. 303 paslanmaz çelik şaft yüzeyinin adhesif aşınma SEM görüntüsü.....	8
2.4. Abrasif aşınma mekanizmaları.....	9
2.5. Dizel motor enerji kayıpları, (a) Motor içi enerji kayıplarının oranları, (b) Mekanik sürtünme kayıpları dağılımı.....	12
4.1. Silindir gömleği optik mikroskop görüntüsü.....	18
4.2. Deneylede kullanılan sertlik ölçüm cihazı.....	21
4.3. Ölçümlerde kullanılan yüzey profilometre cihazı.....	22
4.4. Deneylede kullanılan aşınma test cihazı.....	24
5.1. Kaplanmış numunelerin x 100 büyütmede ön kesit optik mikroskop görüntüleri (a) Al ₂ O ₃ -TiO ₂ kaplama, (b) Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplama, (c) NiCr kaplama.....	26
5.2. Kaplamasız ve kaplanmış numunelerin mesafeye bağlı ortalama sürtünme katsayısı değerleri	28
5.3. Kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin aşınma izleri genel SEM görüntüsü, (a) kaplamasız numune(x150 büyütme), (b) NiCr kaplama(x100 büyütme), (c) Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplama(x100 büyütme), (d) Al ₂ O ₃ -TiO ₂ kaplama(x75 büyütme).....	30
5.4. Kaplamasız numunenin aşınma testi sonucu SEM görüntüsü ve EDS analiz grafiği(a)	31
5.5. Kaplamasız numunenin aşınma testi sonucu SEM görüntüsü ve EDS analiz grafiği (b).....	32
5.6. Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplanmış numunenin aşınma testi sonucu SEM görüntüsü ve EDS analiz grafiği(a).....	33
5.7. Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplanmış numunenin aşınma testi sonucu SEM görüntüsü ve EDS analiz grafiği (b)	34
5.8. NiCr kaplanmış numunenin aşınma testi sonucu SEM görüntüsü ve EDS analiz grafiği(a).....	35
5.9. NiCr kaplanmış numunenin aşınma testi sonucu SEM görüntüsü ve EDS analiz grafiği(b).....	36
5.10. Al ₂ O ₃ -TiO ₂ numunenin aşınma testi sonucu SEM görüntüsü ve EDS analiz grafiği(a).....	37
5.11. Al ₂ O ₃ -TiO ₂ numunenin aşınma testi sonucu SEM görüntüsü ve EDS analiz grafiği(b).....	38

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Çeşitli metallerin demire karşı adhezyon kuvveti	7
2.2. Dökme demir silindir gömleklerinin tipik malzeme bileşimleri.....	13
4.1. Silindir gömleği kimyasal bileşimi.....	19
4.2. Silindir gömleği mekanik özellikler.....	19
4.3. Atmosferik plazma kaplama işlemi parametreleri.....	20
4.4. HVOF kaplama işlemi parametreleri.....	20
4.5. Aşınma deneyi parametreleri.....	23
5.1. Ortalama numune sertlik ölçüm değerleri	27
5.2. Ortalama yüzey pürüzlülük değerleri	27
5.3. Aşınma deneyine tabi tutulan bütün numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri.....	29

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de yük ve yolcu taşımacılığında Raylı Sistemler Teknolojisi kullanma eğilimi gün geçtikçe artmakta ve bu teknolojiyi en gelişmiş haliyle, en verimli şekilde ve insan ihtiyaçlarını olabilecek en optimum koşullarda karşılayacak şekilde kullanmanın önemi hızla artmaktadır.

Raylı Sistemler alanında dizel elektrik lokomotiflerin sevki için gerekli olan itici gücün çok büyük bir kısmı dizel motorlardan sağlanmaktadır. Bu sebeple kullanılan dizel motorun daha verimli hale getirilmesi kullanılan yakıt enerjisinin maksimum verimle kullanılabilmesini sağlamakla beraber bakım ve onarım giderlerini azaltarak lokomotif sistemini daha verimli bir hale getirecektir.

Dizel motorlarda kullanılan enerjinin önemli bir kısmı motor aksanları arasındaki sürtünme ve aşınma mekanizmalarının etkisiyle kaybolmakta ve motor verimini düşürmektedir. Bu durumda da motorun ve/veya parçaların kullanım ömürleri düşmekte, malzeme bakım ve onarım maliyetlerinde arzu edilmeyen artışla karşılaşabilmektedir.

Bu sebeple bu aşınma ve sürtünme mekanizmalarının doğru bir şekilde irdelenip araştırılabilmesi meydana gelen enerji verimsizliğinin ve maliyetlerin azaltılabilmesi açısından çok büyük önem taşımaktadır. Ayrıca bu mekanizmaların doğru bir şekilde anlaşılabilmesi motorda kullanılan aksanın mümkün olan en uzun süre kullanılmasını sağlayarak bakım ve onarım periyotlarında da daha uzun bir süreye çıkılmasının yolunu açacaktır.

Dizel motorlarda motor içi sürtünmenin en önemli etkenlerinden biri piston grubudur. Silindir gömleği-piston ve piston segmanı sürtünmesi piston grubu sürtünmesinin yaklaşık tamamıdır. İçten yanmalı dizel motorlarda birlikte çalışan piston grubu malzemeleri arasındaki sürtünme ve aşınmanın olumsuz etkilerini azaltmak için malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmek çok önemlidir. Bu bağlamda, piston grubu elemanlarına çeşitli yöntemlerle yapılacak kaplama işlemi bu malzemelerin sürtünme ve aşınmaya karşı direncini olumlu yönde etkileyecektir. Bu noktada önemli olan doğru

kaplamayı doğru yöntemle uygulayarak malzemelerin aşınma direncini mümkün olan en yüksek seviyeye ulaştıracak çalışmayı yapabilmektir.

Bu çalışmada temel amaç; Raylı Sistemler Taşımacılığı'nda kullanılan bir ağır hizmet dizel motoru silindir gömleği iç yüzeyinin aşınmasını minimuma indirerek bakım onarım sürecini uzatmak ve maliyet tasarrufu sağlamaktır. Yüzey özelliklerini istenen düzeye getirebilmek için yüzey, termal spreyci kaplama yöntemiyle, üç farklı ($Al_2O_3-TiO_2$, Cr_3C_2-NiCr , $NiCr$) kaplama malzemesiyle kaplanacaktır. Kaplama prosesinin ve deneylerin ardından aşınma karakteristiklerini kıyaslamak için SEM ve EDS analizleri sonuçları yorumlanarak kaplanmış malzemeler ile gri dökme demirden imal edilmiş esas malzemenin kıyaslanabilmesini sağlamaktır.

Burada ulaşılmak istenen en temel sonuç ise silindir gömleği piston çiftinin bir arada çalışabilme kabiliyetlerini önemli ölçüde arttırarak, sürtünme ve aşınma kayıplarını minimum düzeyde tutabilecek en iyi kaplama yöntem ve malzemesini tespit etmektir.

2. TRİBOLOJİ

Triboloji, kaydedilen insanlık tarihinin başlangıcından itibaren var olmuştur. Sürtünme, aşınma ve etkileşimli bir biçimde çalışan yüzeylerin, hareket halindeki yağlanmasına odaklanan triboloji, 1967'de Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı'nın bir komitesi tarafından tanımlanan yeni bir bilim alanıdır (Stachowiak ve Batchelor, 2005).

Sürtünme ve sürtünmeye bağlı olarak meydana gelen aşınma, bir arada ve etkileşim halinde çalışan sistemlerde enerji israfının temel nedenidir. Dünyadaki enerji kaynaklarının yaklaşık olarak üçte birine sürtünmeyi ve olumsuz etkilerini aşmak için ihtiyaç duyulduğu tahmin edilmektedir. Bu sebeple, sistemlerde sürtünme kontrolünün geliştirilmesi çok önemli ölçüde enerji tasarrufu yapılmasını sağlayabilir (Stachowiak ve Batchelor, 2005).

Triboloji, kullandığımız en ilkel el aletlerinden, en karmaşık çalışma prensibine sahip modern makine sistemlerine kadar uzanan teknik ekipmanların güvenilirliği, bakımı ve aşınması gibi büyük ekonomik öneme sahip sorunlara operasyonel bir analiz uygulayan bir bilim alanıdır. Makine arızalarının çok önemli bir kısmı hareketli parça kaynaklıdır. Görece hareketli ve bir arada çalışan malzemelerin, katı katı teması neticesinde bir film tabakası meydana gelebilir. Tribolojik çalışmalar bu film tabakası oluşumunu ve ya oluşmaması durumunun sonuçlarını bilimsel yöntemler ışığında açıklamaya çalışmaktadır. Dolayısıyla, tribolojinin pratik amacı; katı-katı temasının iki temel dezavantajını en aza indirmektir: sürtünme ve aşınma (Stachowiak ve Batchelor, 2005; Bhushan, 2013).

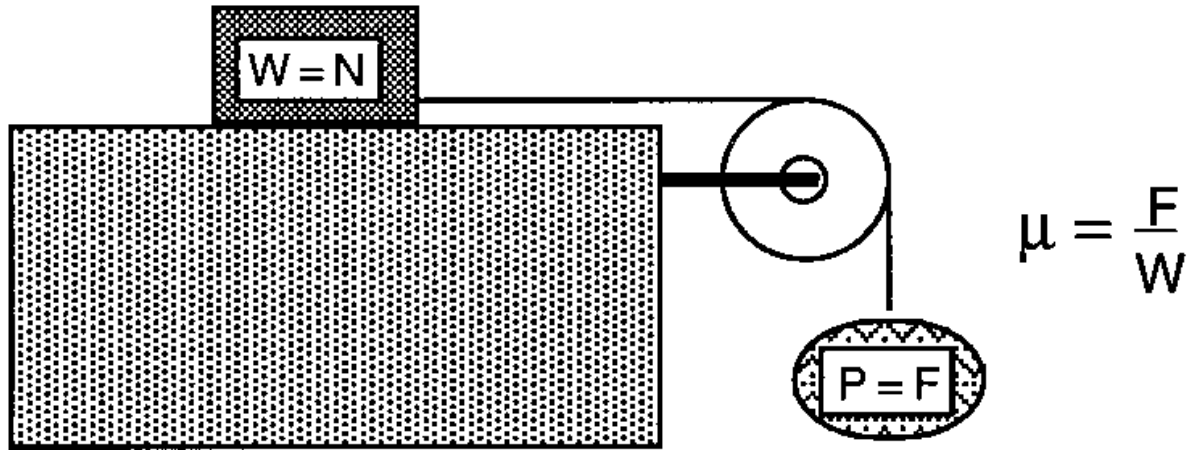
2.1. Sürtünme Mekanizmaları

Birbiriyle temas halindeki iki yüzey arasında, temas yüzeyi boyunca ve bu iki katıyı birbirinden ayırmak için gerekli olan kuvvete eşit büyüklükte bir adhezyon kuvveti meydana gelir. İki katının temas yüzeyi boyunca meydana gelen adhezyon kuvveti, malzeme iç yapı bağ kuvveti olan kohezyon kuvvetinin tersiniri olarak çalışır. Kohezyon katı madde kafes yapısı içerisindeki atomlar ya da moleküller arası bağların gücünü ifade eder (Bhushan, 2013)

Sürtünmeyi, temas halindeki iki yüzey arasında meydana gelen, kayma ya da yuvarlanmaya karşı oluşan direnç olarak tanımlayabiliriz. Hareket yönünün tam tersi yönünde hareket eden direnç kuvveti sürtünme kuvvetidir. İster düşük, ister yüksek sürtünme talep ediliyor olsun, sürtünme nihai sistemin çalışma prensibini olumsuz etkilememesi açısından öngörülebilir olmalıdır (Bhushan, 2013, 2001).

Adhezyon kavramı, karışık film ya da sınır film yağlanmasını açıklamak için kullanılır. Genel kanı yağ filmi tabakasının, temas halindeki iki yüzeyin pürüzlülük tepe noktalarının temas etmesine izin vermeyecek kadar kalın olması gerektiğidir. Fakat pürüz tepe noktalarının bir kısmı, hala birbirleriyle temas edebilecek kadar yüksektir. Böylece sürtünme temas eden pürüzlülük çıkıntılarının adhezyonu ve temas halinde olmayan bölgelerin viskoz sürüklenmesi terimleriyle açıklanabilir (Bhushan, 2001).

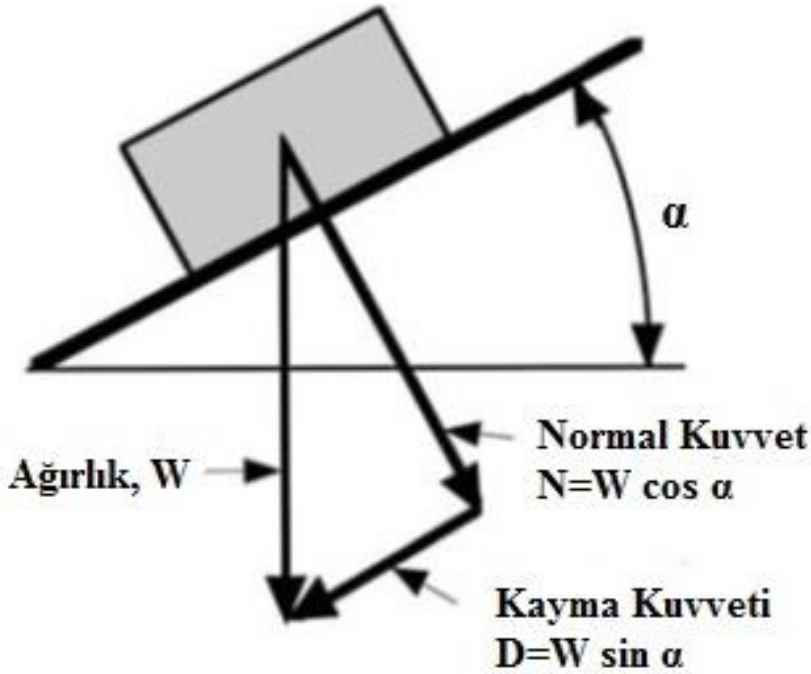
Sürtünme katsayısının hesaplanması için, kaymayı başlatmak ve / veya sürdürmek için gereken kuvveti(F) ve iki yüzeyi bir arada tutan normal kuvveti (N) bilmek gerekmektedir. Statik sürtünme katsayısını hesaplamak için Şekil 2.1.'de gösterilen kasknaklar ve ağırlıklar kullanılmıştır. Sistemde kayma başlangıcı olana kadar artan yük (P) uygulanır ve statik veya başlangıç sürtünme katsayısı hesaplanır: $\mu_s = P_s/N = F_s/W$ (Bhushan, 2001).



Şekil 2.1. Statik Sürtünme Katsayısı Ölçüm Düzeneği (Bhushan, 2001).

Kinetik sürtünme katsayısını hesaplayabilmek için; ipe, cismin uniform bir hızla sürdürülebilir bir şekilde hareket etmesini sağlayıncaya kadar yük uygulanır. Bu durumda kinetik sürtünme katsayısı $\mu_k = P_k/N = F_k/W$ formülüyle hesaplanır (Bhushan, 2001).

Sürtünme katsayısını hesaplamak için kullanılan bir diğer sistem de şekil 2.2.'de verilmiştir. Bu sistemde, cisim kaymaya başlayıncaya kadar sistemin eğim açısı artırılır. Cismin kaymaya başladığı α açısının tanjantı, $\tan \alpha$, statik sürtünme katsayısını verir (Bhushan, 2001).



$$\mu = \frac{D = W \sin \alpha}{N = W \cos \alpha}$$

Şekil 2.2. Statik sürtünme katsayısı hesaplamasında kullanılan eğimli yüzey metodu (Bhushan, 2001).

Bu sistemde kinetik sürtünme katsayısını hesaplamak içinse; sistem daha önceden belirlenen açılara kadar yükseltilir. Kaymanın uniform bir hızla, duraksama olmaksızın gerçekleştiği α açısının tanjantı kinetik sürtünme katsayısını verecektir. Veriler kayma hızının uniformluğunu tayin eden kişinin yargılarına bağlı olarak değişkenlik gösterecektir. (Bhushan, 2001).

Basit bir el kantarından, uygulanan yük miktarına orantılı olarak elektrik üreterek ölçüm yapılmasına olanak sağlayan dönüştürücüye varıncaya değin çok çeşitli sürtünme kuvveti hesaplama yöntem ve cihazları mevcuttur. Ayrıca sürtünme katsayısı ölçümünde kullanılan, döner ve ya doğrusal geometride hız ve/ve ya yük değişim verilerini kullanarak ölçüm yapan, çok çeşitli varyasyonlarda ölçüm cihazları mevcuttur (Bhushan, 2001).

2.2. Aşınma Mekanizmaları

Aşınma, bir yüzeyden başka bir yüzeye etkileşimi sonucu malzeme kopması olarak tanımlanabilir. Aşınma problemleri neredeyse bütün makinelerin doğru ve sağlıklı bir şekilde çalışmasını olumsuz yönde etkiler. Aşınmanın kontrol altında tutulması sürdürülebilir ve geliştirilebilir bir makine teknolojisi sağlanabilmesi bakımından çok önemlidir. Çalışma koşullarına göre doğru tasarım yapmak ve doğru malzeme seçimi aşınma etkilerini kontrol altına alabilmek için çok önemli faktörlerdir (Bhushan, 2001).

Aşınma mikro çatlaklar nedeniyle malzeme kopması, kimyasal çözünme ya da temas ara yüzeyinde meydana gelen ergimenin bir sonucudur. Adhesif, abrasif, yorulma aşınması, korozyon aşınma gibi çok çeşitli tipte aşınma oluşma olasılığı vardır. Bir sistemde baskın olan aşınma türü, yüzey özelliklerine, film tabakasına, malzeme özelliklerine ve çalışma dinamiklerine bağlı olarak farklılıklar gösterebilir. Aşınma mekanizmaları sürtünme sırasındaki karmaşık değişimler göz önünde bulundurularak tanımlanmıştır. Aşınma genellikle tek bir mekanizma olarak gerçekleşmez. Dolayısıyla her bir yıpranma koşulundaki aşınma mekanizmasının anlaşılabilmesi çok önemlidir (Bhushan, 2001).

2.2.1. Adhesif Aşınma

Katı katı temasında uygun koşullar altında çoğunlukla adhezyon oluşumu gözlenir. Temas eden yüzeyler arasındaki oksijen, yağ filmi tabakası, su gibi bileşenlerin varlığı adhesif etkiyi azaltıcı faktörlerdir. Ayrıca, temas eden yüzey sertlik değerlerinin artması ile de adhezyon azalır (Stachowiak ve Batchelor, 2005).

Altın ve platin gibi soy metaller haricindeki metal malzeme yüzeyleri havayla temas ettikleri her ortamda ince bir oksit film tabakasıyla kaplanır. Bu oksit film tabakası

adhezyon kuvvetini düşürücü etki yarattığından, iki metal arasındaki adhezyon kuvveti ölçümleri vakum altında yapıldığı zaman çok daha gerçekçi sonuçlara ulaşılabilir. Çizelge 2.1.'de 0,2 Nm temas yükü altında iğne uçlu demir numunenin, diğer metallere ayrılması için gerekli gücün hesaplanmasıyla elde edilen adhezyon kuvvetleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Çeşitli metallere demire karşı adhezyon kuvveti (Stachowiak ve Batchelor, 2005).

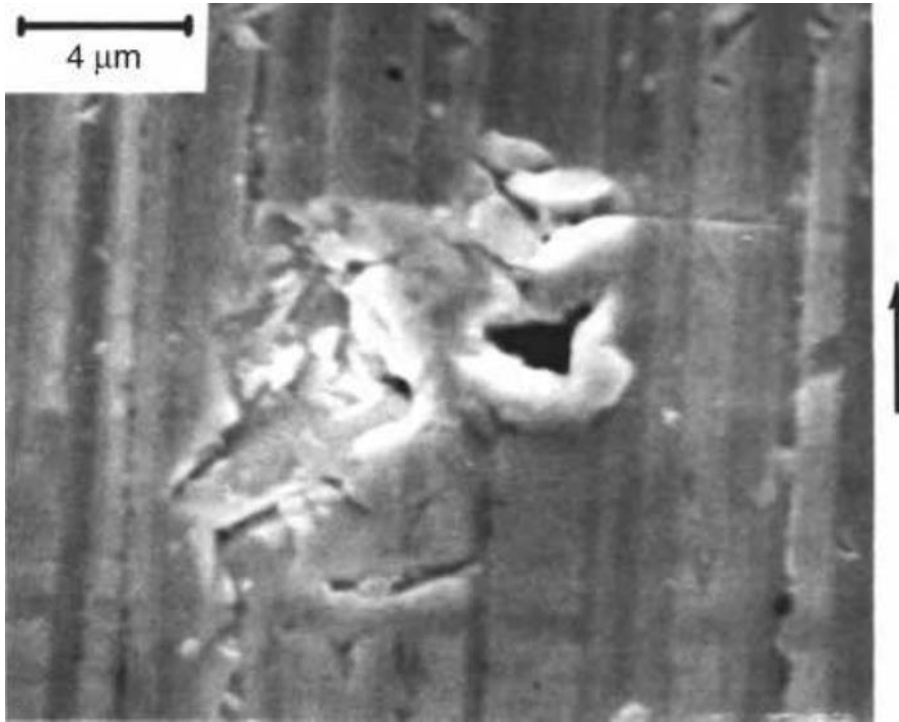
Metal	Demirde Çözünürlük (%)	Adhezyon Kuvveti (Nm)
Demir		> 4,0
Kobalt	35	1,2
Nikel	9,5	1,6
Bakır	< 0,25	1,3
Gümüş	0,13	0,6
Altın	< 1,5	0,5
Platinyum	20	1,0
Aluminyum	22	2,5
Kurşun	Çözünemez	1,4
Tantalyum	0,20	2,3

Çizelgede de görüldüğü gibi adhezyon kuvvetleri her zaman uygulanan yükten büyüktür. Demir-demir gibi birbirine benzer metallere adhezyon kuvveti çok yüksek olmakla beraber, benzemeyen metal kombinasyonları da çok yüksek adhezyon gösterebilmektedir (Stachowiak ve Batchelor, 2005).

Adhezyon kuvveti arttıkça zayıf metalin kuvvetli metale aktarımı da o kadar artacaktır. Metaller arası elektron geçişi bağ kuvvetini artırarak adhezyonu arttıracaktır. Yüksek sertlik ve geniş elastisite modülü adhezyon kuvvetini düşüren etkenlerdir. Kimyasal olarak aktif metallere soy metallere oranla daha fazla adhezif davranış sergilerler. Ayrıca sıkı paket hegzagonal yapıdaki metallere diğer kristal yapısındaki metallere oranla daha az adhezivdirler (Stachowiak ve Batchelor, 2005).

İki katı cismin kayma teması sırasında, cisimlerin pürüzlü yüzeylerinin teması sırasında, yağlama olsun ya da olmasın adhezyon meydana gelir. Kayma hareketi adhezyonun kesilmesine ve bir yüzeyden diğerine parça transferine neden olur. Kayma

hareketinin devamında bu parça koptuğu malzemeye tekrar bağlanabilir ya da aşınma partikülü oluşturabilir. İki yüzey arasında plastik deformasyonun etkisiyle meydana gelen çatlağın temas yüzeyine ulaşmasıyla, aşınma parçacığı oluşumu ve adhesif transferin tamamlanmasıyla adhesif aşınma meydana gelir. Şekil2.3.'de 303 paslanmaz çelikten imal edilmiş bir şaft yüzeyinin yağlama olmayan ortamda düşey kayma yönlü hareketi neticesinde adhesif aşınmaya uğraması sonucu SEM yüzey görüntüsü verilmiştir (Bhushan, 2013, 2001).



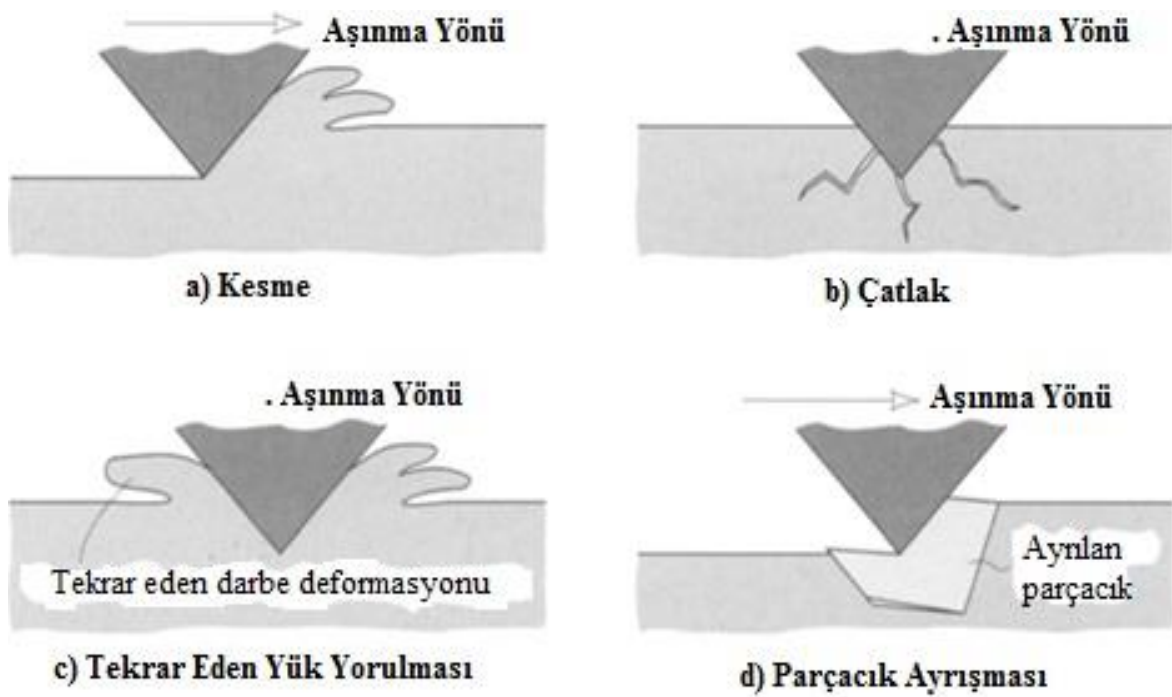
Şekil 2.3. 303 paslanmaz çelik şaft yüzeyinin adhesif aşınma SEM görüntüsü (Bhushan, 2013)

2.2.2. Abrasif Aşınma

Bir katı madde, kendisiyle eşit sertlikte ya da daha sert bir malzemeyle temas halinde kayma hareketi yaparsa abrasif aşınma meydana gelir. Abrasif aşınmada iki genel durum vardır. İlk durumda sert olan malzemenin, yumuşak malzemeyi plastik deformasyona uğratarak çizik oluşturması ve doğrudan aşındırması söz konusudur. İkinci durumda ise adhezyon sonucu yüzeyden kopan sert bir partikülün de dahil olduğu, bu

partikülün yumuşak malzeme yüzeyinde sebep olduğu üç elemanlı bir aşındırma mekanizması söz konusudur (Bhushan, 2001).

Abrasif aşınma, sadece sert aşındırıcı partikül ya da yüksek pürüzlülük kaynaklı tek bir mekanizmadan meydana gelmemektedir. Bir çok farklı mekanizmanın dahil olduğu kompleks bir yapıya sahiptir. Parçacıklar ya da aşındırıcılar mikro çizik, mikro çatlak, yüzeyden partikül ayrılması ya da yorulma deformasyonu mekanizmalarıyla yüzeyden malzeme ayrılmasına neden olabilir (Şekil 2.4) (Bhushan, 2001).



Şekil 2.4. Abrasif aşınma mekanizmaları (Bhushan, 2001).

2.2.3. Korozi Aşınma

Korozi aşınma kuru ya da yağlı ortamlarda bir çok farklı şekilde meydana gelebilir. Kayma işinin korozi bir ortamda meydana gelmesi sonucu havadaki oksijenle sürekli etkileşim halinde olan aşınma elemanlarında korozi aşınma meydana gelir. Temas yüzeyinde tribokimyasal bir reaksiyon sonucu meydana gelen film tabakasının oluşma ve

kayma sonucu bozunma hızı korozif aşınma oranını etkileyen en önemli faktörlerdir (Stachowiak ve Batchelor, 2005).

Eğer yüzeyde bir koruyucu film tabakası oluşmuş, aynı zamanda da temas halindeki yüzeyler arasında kayma işi devam ediyorsa aşağıdaki dört farklı korozif aşınma mekanizmasından biri meydana gelir:

- Korozyon, adhezyon ve buna bağlı aşınmayı engelleyen bir koruyucu film tabakası oluşmuş olabilir. En ideal durum budur.
- Temas yüzeyinde zayıf bir film tabakası oluşur ve kayma esnasında sürekli bozunup geri oluşmaya devam eder. Bu durum önemli kayıplara neden olabilir. Pratikte bu durumla çoğunlukla karşılaşılır.
- Koruyucu film tabakasının bir kısmı aşınır ve kalan film tabakasıyla aşınan malzemenin galvanik bir çift oluşturursa anodik çözünme sonucu çok yoğun malzeme kayıpları yaşanabilir.
- Kontrol edilemeyen, film tabakasını kaldıran ve ana malzemede kayıplara neden olan adhesif aşınma neticesinde yüzeydeki korozyon hızı ve aşınma kaybı birbirine bağlı olarak artabilir (Stachowiak and Batchelor, 2005; Ulutan, 2007).

2.2.4. Yorulma Aşınması

Titreşimler halinde tekrar eden yükün sert karşı malzemede çatlak, yumuşak karşı malzemede plastik deformasyon meydana getirmesi neticesinde meydana gelen aşınmaya yorulma aşınması denir. Tribolojik zorlamalar genel olarak tekrar eden mekanik gerilmeler neticesinde olduğu için yorulma aşınması bir çok sistemde meydana gelir. (Ulutan, 2007).

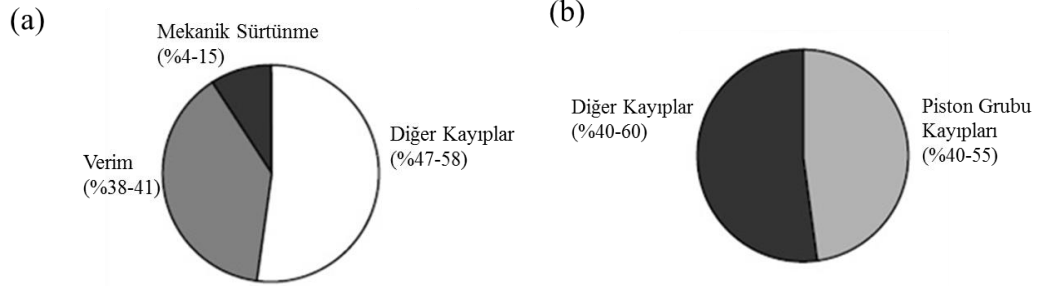
2.3. DİZEL MOTOR AŞINMASI

Aşınma zamanla motor içinde meydana gelen malzeme kaybıdır. Motor yapısındaki tek bir bileşenin aşınma ömrü bütün sistemin çalışma kapasitesi ve ömrüne etkidiği için dizayn aşamasında ele alınması gereken en önemli konulardan biridir. Motor dizayn edilirken aşınmayı etkileyen tüm parametrelerin dikkate alınması motordan beklenen verim ve ömrün karşılanabilmesi açısından çok önemlidir. Motor bileşenlerinin aşınma mekanizmalarının üç evreden oluştuğu söylenebilir. Bunlar:

- Aşınma oranının yüksek olduğu rodaj periyodu
- Stabilize bir çalışma periyodu devam ederken, çok değişken olmayan oranlarda devam eden aşınma periyodu
- Yüksek aşınma oranının sürekli arızalara yol açtığı aşırı aşınma periyodu

Dizel motorlarda en sık rastlanan aşınma tipleri adhesif, abrasif, korozif ve darbe aşınmasıdır. Adhesif aşınma en sık rastlanan aşınma türüdür. Yüksek kontak teması ve sürekli kayma hareketinin görüldüğü motor içi bileşenlerde sıkça görülür. Adhesif aşınmanın en iyi indikatörü yağ filmi tabakası olmasından dolayı yağlama rejimi önlenmesi açısından çok önemlidir. Metal bileşenlerin yüzey pürüzlülüğü tepe noktalarının temas ettiği sınır ve karışık yağlama koşullarında adhesif aşınma meydana gelir. Abrasif aşınma ise sert pürüzlü yüzey ya da sert partiküller daha yumuşak bir yüzeyle temas halinde hareket ettiğinde meydana gelir. Motor yağındaki partiküllerin hidrodinamik yağlama esnasında daha yumuşak yüzeylere temas etmesiyle oluşabilir. Korozyon aşınması ise motor içi bileşenleri sülfürik asit gibi korozif bir yanma bileşenine maruz kaldığında ortaya çıkar. Darbe aşınması ise valf yatağı gibi darbeye maruz kalan bileşenlerde ortaya çıkar (Quianfan, 2011; Lakshminaranayan, P. A,2011).

Dizel motorda üretilen enerjinin %4-15'i mekanik sürtünme nedeniyle kaybolmaktadır (Şekil 2.5) Mekanik sürtünme nedeniyle meydana gelen enerji kaybının %40-55'ini de piston grubu sürtünmeleri meydana getirir (Şekil 2.5) (Bhushan, 2001).



Şekil 2.5. Dizel motor enerji kayıpları: a) Motor içi enerji kayıplarının oranları b) Mekanik sürtünme kayıplarının dağılımı (Bhushan, 2001).

Aşırı yağ tüketimi ve kompresyon kaçakları motor içi kompresyon segmanı, silindir gömleği üst ölü noktası aşınmasının bir sonucu olarak ortaya çıkar ve motor revizyon çalışması gerektirir. İyi tasarlanmış bir dizel motorda segman-silindir gömleği arasında sürekli ve uygun bir yağ filmi tabakası bulunması gereklidir. Segmanın yağ filmi tabakasını kırdığı anlarda düşük sürtünme sağlayan silindir gömleği yüzey kaplamaları aşınmanın zararlı etkilerini minimuma indirebilmektedir (Bhushan, 2001).

2.3.1. Silindir Gömleği Aşınması

Silindir gömlekleri dökme demir (alaşım elementi olarak P, Mn, Cr, Mo, V, Ti içeren), çelik ya da alüminyumdan imal edilirler. Dizel motorlarda en yaygın olarak kullanılan silindir gömlekleri dökme demirden imal edilmiş silindir gömlekleridir. Dökme demir silindir gömlekleri için farklı standartlardaki tipik kimyasal kompozisyonlar Çizelge 2.2' de verilmiştir. Silindir gömleği yüzeylerine aşınma dayanımını arttırmak amacıyla sert Cr kaplama uygulanabilir. Gri dökme demirlerin yağlanma etkisi sayesinde gösterdikleri aşınma dayanımı etkisiyle silindir gömleği malzemesi olarak kullanımı oldukça yaygındır (Andersson vd, 2002)

Çizelge 2.2. Dökme demir silindir gömleklerinin tipik malzeme bileşimleri (Andersson vd, 2002)

	Alaşım Elementi Oranı (%)							
	C	Si	Mn	P	Cr	S	Mo	Ni
Standart 45	2,8-3,2	1,7-2,4	0,5-0,8	0,4-0,45	0,25-0,4	<0,03	-	-
Standart P	2,8-3,2	1,7-2,4	0,5-0,8	0,6-0,8	0,25-0,4	<0,3	-	-
HE G40	2,6-2,8	1,1-1,6	<0,8	<0,08	-	<0,08	1,0-1,5	1,0-1,5
ASTM 247	3,1-3,4	1,85-2,3	-	<0,12	<0,35	<0,18	0,25	0,50

Silindir gömleğinin dizel motor içindeki görevleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yanma gazı kaçaklarını önlemek
- Piston ve segmanlardaki ısıyı soğutma sıvısına iletmek
- Soğutucu sıvıyı korumak
- Pistonu desteklemek
- Piston ve segmanlara yataklık etmek
- Motor çalışma başlangıcı için yağın yüzeyde tutunmasını sağlamak

Silindir gömlekleri yüksek kırılma aşınma ve sürtünme direncine sahip olmalıdır. Bu sebeple mukavemetli bir yüzey kaplamasına sahip olmalıdır. Aynı zamanda honlama çizgilerinde yeterli yağ barındırabilecek kapasiteye ve iyi bir ısı iletim katsayısına sahip olmalıdır (Bhushan, 2001).

Silindir gömleği aşınması büyük oranda segman silindir gömleği kontak yüzeyi sürtünmesi kaynaklıdır. Yapılan pratik ve teorik çalışmalar silindir gömleğinde en fazla aşınmanın termal, kimyasal, erozif ve korozyon şartların en sert gerçekleştiği gömlek üst ölü noktasına en yakın bölgede meydana geldiğini ortaya çıkarmıştır. Özellikle düşük yüzey sıcaklıklarında, yakıt sülfür muhteviyatı da yüksekse silindir gömleği tribokimyasal aşınma oranı dramatik bir şekilde artmaktadır. Segman üzerinde yanma artığı olarak katı karbon

birikmesi ve ya motor içine alınan havadaki toz partikülleri de silindir iç yüzeyi abrasif aşınmanın artmasına neden olabilir (Andersson vd, 2002).

Silindir çap ölçüsündeki genişleme silindir gömleği aşınmasının en açık belirtisidir. Bu çap genişlemesini hafif, orta ve ağır aşınma olarak üç gruba ayırabiliriz. Aşınma sonucu hafiften ağıra doğru ilerleyen çap ölçü kaybı honlama izlerinin kaybolmasına neden olur, bu sebeple meydana gelecek yetersiz yağ tutunması durumu ise daha hızlı bir aşınma mekanizması ortaya çıkmasının en önemli nedenlerinden biri olacaktır (Andersson vd, 2002).

Silindir gömlekleri kompresyon ve yağ segmanlarıyla sürekli sürtünme halinde çalıştıkları için; dayanıklı, mukavemeti yüksek ve kararlı bir kaplamayla kaplanmış olmaları aşınma oranını önemli ölçüde azaltarak kompresyon ve yağ kaçaklarını minimuma indirecek ve ekipman ömrünün uzamasında da çok önemli bir rol oynayacaktır (Bhushan, 2001).

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Dizel motor silindir gömleklerinin aşınma davranışlarını iyileştirebilmek için kaplama prosesinin kullanılması, bir çok bilimsel çalışmanın araştırma konusu olmuştur. Bu çalışmaların temel amacı, gömlek iç yüzey özelliklerini geliştirerek, gömlek segman temas yüzeyinde meydana gelen aşınmayı minimum düzeye indirmek için doğru kaplama metodu ve malzemesini tayin edebilmektir.

Uozato vd., 2005 araştırmalarında (Fe-C-Ni-Cr-Cu-V-B) içeren bir toz bileşimini Atmosferik Plazma Sprey yöntemiyle silindir iç yüzeyine kaplamış ve aşınma davranışlarını kaplanmamış silindir gömleği numunesiyle kıyaslamışlardır. Araştırma kapsamında 17x15x70 mm boyutlarındaki silindir gömleği numunesi toplam kaplama kalınlığı 250-300 mikron arasında olacak şekilde kaplanmıştır. Aşınma deneylerinde karşı malzeme olarak Cr kaplı bir pim kullanılmıştır. 240 m / dk kayma hızı, 50 mm çalışma aralığı ve 98 N yük altında numuneler 20 saat aşınma testine tabi tutulmuşlardır. Aşınma testinin ardından yapılan ölçümler sonucunda termal spreyle kaplanmış numunenin aşınma derinliği kaplamasız gömlek malzemesinin aşınma derinliğinin yarısından daha az çıkmıştır.

Johansson vd., 2011 yaptıkları çalışmada Nano3, Cr₃C₂-NiCr, TiO₂-TiC ve MMC kaplanmış dört farklı silindir gömleği numunesinin ve kaplamasız numunenin aşınma davranışlarını birbirleriyle karşılaştırmıştır. Yapılacak aşınma deneyleri için motorun gerçek çalışma verilerinden yola çıkarak 150-473(N) arasında değişen yüklerde, 79-112(°C) arasında değişen sıcaklıklarda, 180 dakikalık 1 adım 60'ar dakikalık 10 adım toplam 11 adımda gerçekleştirilen deney parametreleri belirlenmiş ve 5 ayrı numune bu teste tabi tutulmuştur.

Beş farklı silindir gömleğiyle yapılan deneyler esnasında yapılan ölçümler neticesinde en düşük sürtünme katsayısını CrC-NiCr kaplanmış malzeme, en yüksek sürtünme katsayısını ise TiO₂/TiC kaplanmış malzeme vermiştir. Aşınma deneyleri sonucu yüzey profil ölçümleri neticesinde ise bütün kaplanmış malzemelerin kaplanmamış

malzemeye göre aşınma derinliklerinin daha düşük olduğu gözlenmiş olup en düşük aşınma derinliği ölçümü TiO_2/TiC kaplanmış malzemeden elde edilmiştir. Bütün silindir gömleği numuneleri, kaplamasız silindir gömleği numunesinden daha az aşınmıştır. TiO_2/TiC kaplı silindir gömleği numunesi kaplamasız numunenin %1' inden daha az aşınmıştır.

Hazar, 2004 çalışmasında 1 silindirli bir dizel motor silindir gömleğini PVD yöntemi kullanarak 1,8 mikron kaplama kalınlığına ulaşacak şekilde CrN kaplama işlemine tabi tutmuştur. Ardından deneyde kullanılan motoru belirli yük ve devir değerlerinde 200 saat boyunca kaplamalı ve kaplamasız silindir gömlekleriyle çalıştırmıştır. Deney sonucunda kaplamalı gömleğin, kaplamasız gömleğe göre çok daha az aşınmaya uğradığı, kaplamasız gömlek yüzeyinde gözlemlenen aşınma izi derinliklerinden anlaşılmıştır.

Kapsız, 2011 çalışmasında, dökme demir segman yüzeyini HVOF yöntemiyle NiCrBSi ve WC - NiCrBSi tozlarıyla ve elektrokimyasal kaplama yöntemiyle sert Cr kaplama uygulanmış ve kaplama yapılmış segmanlara karşı çalışan silindir gömlekleri aşınma davranışları karşılaştırılmıştır. Aşınma oranları ağırlık kaybı ölçümleriyle belirlenmiştir. 30 °C sıcaklık ve 60 N sabit yük altında farklı devirlerde yapılan deneyler neticesinde elde edilen aşınma oranları hesaplanmıştır. Silindir gömleklerinde en fazla aşınmanın 30 d/dk ' da, en az aşınmanın ise 150 d/dk da meydana geldiği gözlenmiştir. 30 d/d'da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı en yüksektir. WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 6, NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin ise aşınma oranı Cr kaplı segmanla çalışan gömleğe göre % 30 daha düşük hesaplanmıştır.

150 d/d'da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı diğer iki gömleğe göre daha yüksek hesaplanmıştır. Cr kaplı segman ile çalışan gömleğe oranla WCNiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 4, NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 18 daha düşük hesaplanmıştır.

Kurgun, 2014 çalışmasında 60,80 ve 100 N yük altında, 40,60,80 °C sıcaklık değerlerinde ve 60,90,120 dev/dk parametrelerinde, HVOF yöntemiyle Mo kaplanmış segmanların silindir gömleğiyle beraber toplam 1000 m. yol almak suretiyle aşınma

deneyini gerçekleştirmiştir. Yük, sıcaklık ve devir parametrelerinden oluşan üç değişkenli aşınma deneyleri neticesinde bu üç bileşenin değişimi ve birbirlerine göre durumlarını içeren ve gömleğin aşınma kaybını veren aşınma haritaları oluşturmuştur. Elde edilen aşınma haritaları incelendiğinde, sıcaklık artışı ile aşınma kaybında önemli değişiklikler gözlenmiştir. Yük arttıkça ise silindir gömleğinin aşınma kaybının tırmanarak arttığı gözlenmiştir. Ayrıca devir arttıkça yüzeyler arasında meydana gelen hidrodinamik yağlama rejiminin de etkisiyle aşınma oranının azaldığı gözlenmiştir.

Jayakumar vd., 2016, yaptıkları çalışmada; iki silindirli bir deniz motoru silindir gömleğine Cr kaplama uygulaması yapmışlardır. Cr kaplanmış silindir gömleği ve kaplama uygulanmamış silindir gömleği çaplarını mikrometre yardımıyla 1200, 2232, 3312, 4392 saatlik motor çalışmasının ardından ölçerek iki silindir gömleği arasındaki aşınma farkını tayin etmişlerdir. Silindir gömleğin farklı aşınma miktarları gösterebileceği bütün noktalar için ayrı ayrı ölçümler alarak farklı noktalardaki aşınma miktarlarını kıyaslama olanağı elde etmişlerdir. Yapılan ölçümler sonucunda en fazla aşınmanın, yanma etkisiyle en çok sıcaklığa ve basınca maruz kalan silindir gömleğinin üst ölü noktasından itibaren ilk 1/3' lük kısmında olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca ölçüm sonuçlarından yola çıkarak Cr kaplanmış silindir gömleği ömrünün, kaplamasız silindir gömleğine oranla %50 artacağını ortaya koymuşlardır.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada Raylı Sistemler Taşımacılığı' nda kullanılan bir ağır hizmet dizel motorundan alınan numuneler 3 farklı kaplama malzemesiyle ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, NiCr , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$) termal sprey kaplama yöntemleri kullanılarak kaplanmıştır. Kaplama işleminin ardından yapılan aşınma deneyi, metalografik incelemeler, aşınma oranı tespiti, EDS analizleri, optik mikroskop ve SEM incelemeleri sonucunda söz konusu kaplamaların aşınma performanslarıyla ilgili değerlendirmeler yapılmıştır.

4.1. Deney Numunesi Hazırlama

Optik mikroskop görünümü Şekil 4.1.'de, kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Çizelge 4.1. ve Çizelge 4.2.'de verilen silindir gömleğinden CNC torna kullanılarak, 30 mm çapında, 25 mm yüksekliğinde silindirik numuneler çıkarılmıştır.



Şekil 4.1. Silindir gömleği optik mikroskop görüntüsü

Şekil 4.1.'deki optik mikroskop görüntüsünden de anlaşıldığı üzere silindir gömleği lamel grafitli gri dökme demir malzemedendir. Dökme demirler çok geniş bir skalada mekanik özellikler gösterebilirler. İzgiz'e (2006) göre dökme demirlerde mekanik

özelliklerin en önemli belirleyicisi ise ayrışan grafit yapısının şekli büyüklüğü ve miktarıdır. Grafit yapısı lamelden vermiküler ve küresele doğru gittikçe mukavemet özellikleri artar. Buna karşın ses sönümü ve ısı iletimi özellikleri lamel grafitli dökme demirlerde, diğerlerine nazaran daha yüksektir.

Çizelge 4.1. Silindir gömleği kimyasal bileşimi

C	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	V
3.00-3.40	0.60-0.90	0.15	0.12	0.25-0.40	0.40-0.60	0.75-1.00	0.05

Çizelge 4.1.' de silindir gömleği alaşım elementleri oranı verilmiştir. Döküm içerisindeki perlit oluşumunu arttıran ve inceliğini sağlayan Cr, V, ve Mo gibi karbürleştirici alaşım elementleri muhteviyatı silindir gömleği sertlik ve mukavemetini arttırır. Bileşimde bulunan Mn alaşım elementi de yine perlitik yapının incelmesi yönünde katkıda bulunur. Cr ve Mo alaşım elementleri ise uzun süreli yüksek sıcaklık dayanımları ve termal şok direncini arttırıcı yönde etki ederler.

Çizelge 4.2. Silindir gömleği mekanik özellikler

Mekanik Özellikler	Değerler
Çekme Dayanımı	37.000 psi
Sertlik	250 HB

Çizelge 4.2.' de ise silindir gömleğinin çekme dayanımı ve sertlik değerleri verilmiştir. Silindir gömleği, lamel grafitli dökme demirlerin tipik değerlerine çok yakın bir şekilde çekme dayanımı 37 000 psi (255N/mm^2), sertliği 250 HB'dir. Dökme demirlerin grafit geometrisi, şekli, miktarı ve dağılımına göre çekme dayanımı değerleri 700 N/mm^2 , sertlik değerleri ise 335 HB' ye çıkabilmektedir.

Lamel grafitli dökme demirin silindir gömlekleri için önemli özelliği aşınmaya karşı olan direncidir. Bu olgu grafitin yağlayıcı özelliğe sahip olmasıyla açıklanmaktadır. Grafitin düzenli bir dağılıma sahip olması ise aşınma dayanımı açısından çok önemlidir. Yapının ferritik olması ise aşınma dayanımı açısından istenen bir durumdur. Perlitik yapı düşük sertlik değeri ve mukavemet özellikleri nedeniyle belirli bir sınırın altında tutulmalıdır (İzgiz, 2006).

4.2. Kaplama Uygulaması

Numunelerin kaplama işlemi Plazma Teknik Sert Metal A.Ş.' de yapılmıştır. Al_2O_3 - TiO_2 ve NiCr kaplama için atmosferik plazma kaplama, Cr_3C_2 -NiCr kaplama için HVOF yöntemleriyle Termal Sprey Kaplama işlemi uygulanmıştır. Atmosferik Plazma Kaplama işlem parametreleri Çizelge 4.3.'te, HVOF Kaplama işlem parametreleri Çizelge 4.4.'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Atmosferik plazma kaplama işlemi parametreleri

Kaplama Malzemesi/Parametre	Püskürtme Mesafesi	Amper	Voltaj	Argon (SCFH)	Hidrojen (SCFH)	Besleme Oranı
Al_2O_3	6 cm	530-570	63-38	86-90	125	1,36 kg/saat
NiCr	7 cm	550-580	65-67	86-90	120	1,82 kg/saat

Plazma sprej kaplama prosesi iyonize olmuş bir gaz içinde erimiş olan toz kaplama malzemesinin kaplanacak malzeme yüzeyine 300 m/s' ye varan hızlarda ve 15000 °C' ye varan sıcaklıklarda püskürtülmesi prensibine dayanmaktadır. Bu kaplama yöntemiyle çok yüksek sıcaklıklara ulaşılabilirdiği için bilinen bütün kaplama malzemeleriyle çalışmaya imkan sağlamaktadır. Çok geniş bir çalışma esnekliğine sahip olması ve nispeten düşük maliyetli olması bu yöntemin en çok tercih edilme sebeplerindedir.

Çizelge 4.4. HVOF kaplama işlemi parametreleri

Kaplama Bileşimi/Parametre	Püskürtme Mesafesi	Azot Basıncı	Kerosen	Oksijen	Besleme Oranı
Cr_3C_2 -NiCr	33 cm	0,8 bar	26 l/dk	900 l/dk	50 gr/dk

HVOF en yeni termal sprej kaplama yöntemlerinden birisidir. Oksijen ve yakıt gazının (propan, propilen ve hidrojen) çok yüksek basınçlarda yanması ve çok yüksek bir hızla (2100m/s), aleve beslenen toz kaplama malzemesini kaplanacak yüzeye ulaştırma prensibine dayanır. HVOF termal enerji girişini minimize ederken sistemin kinetik enerjisini maksimuma ulaştırır. Böylece yoğun, porozitesi kısmen düşük ve yüksek mukavemetli kaplamalar elde edilir.

4.3. Optik Mikroskop İncelemeleri

Numunelerin kaplama proseslerinin tamamlanmasının ardından optik mikroskopta ön metalografik incelemeleri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

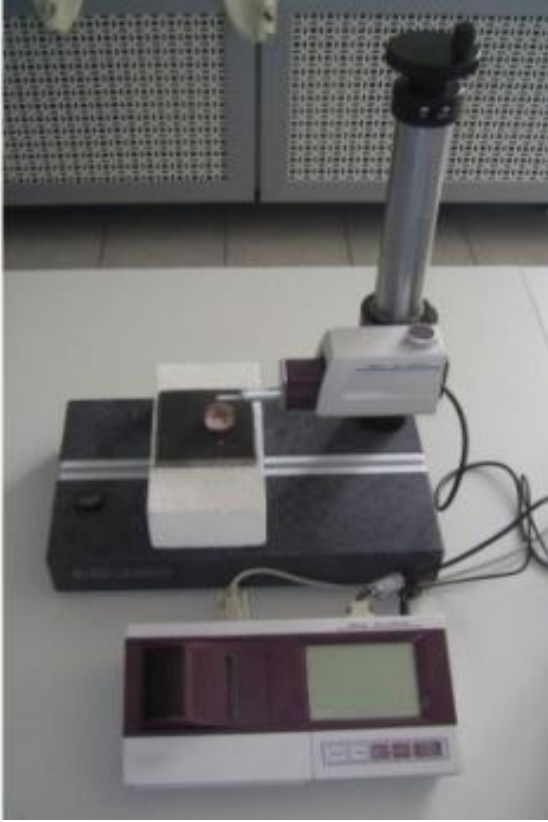
Kaplama yapısını inceleyebilme ve kalınlığını tayin edebilmek için numunelerden kesitler alınmıştır. Daha sonra bu kesit numuneler zımparalanmış ve çuhayla parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Parlatma işleminin ardından optik mikroskopla inceleme işlemine geçilmiştir.

4.4. Sertlik ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Kaplamasız ve kaplanmış numunelerin sertlik ölçümü Matsuzawa MXT30 marka vickers sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır (Şekil4.2). Yüzey pürüzlülük ölçümleri ise Mitutoyo SJ-400 marka cihaz kullanılarak yapılmıştır (Şekil 4.3)



Şekil 4.2. Deneyleerde kullanılan sertlik ölçüm cihazı



Şekil 4.3. Ölçümlerde kullanılan yüzey profilometre cihazı

4.5. Aşınma Deneyleri

Segman silindir yüzeyi bir arada çalışma kabiliyetlerini arttırabilmek adına yapılacak yüzey iyileştirme işlemlerinin ve işlem parametrelerinin seçimi çok önemlidir. Mevcut durumda bir çok motor üreticisi firma gerçek yol testini kullanarak aşınma oranını belirlemektedir. Bu yöntemle elde edilen sonuçlar oldukça gerçekçi olsa da deney maliyetleri, harcanan zaman ve iş gücü maliyetleri oldukça yüksektir. Bu sebeple, bu yöntem doğru yağlama rejimi, segman ve silindir gömleği malzemesi ya da kaplama prosesi geliştirebilmek için yeterli sayıda test yapmamıza müsaade etmemektedir.

Segman ya da silindir gömleği aşınma davranışlarını geliştirebilmek amacıyla denenen her yeni malzeme ve kaplama prosesi için deneyleri gerçek yol testi şeklinde

gerçekleştirmeye çalışmak deney maliyetleri göz önünde bulundurulacak olursa anlamsız ve gerçekçilikten çok uzaktır.

Bu sebeple ilk adım olarak maliyeti çok daha düşük olan laboratuvar deney yöntemlerinden birini kullanarak uygun olmayan kaplama malzemesi ve yüzey özelliklerini geliştirme proseslerini elemek, bizi hem yüksek maliyetlerden kurtaracak hem de çok fazla zaman kazanmamızı sağlayacaktır.

Bu sebeple en uygun kaplama malzemesinin en az maliyetli ve hızlı bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla Çizelge 4.5.' te belirtilen laboratuvar deney parametreleri belirlenmiştir. Segman-silindir gömleği çalışma prensibine uygun olarak gel-git geometrili aşınma deneyi tercih edilmiş olup aşındırıcı olarak 3 mm çapında, küre geometrili WC bilya tercih edilmiştir.

Çizelge 4.5. Aşınma deneyi parametreleri

Aşınma Şekli	Lineer	Veri Toplama	10 Hz
Aşınma Mesafesi	6 mm	Ortam	Hava
Maks. Lineer Hız	10 cm/s	Aşındırıcı Malzeme	WC
Yük	10 N	Aşındırıcı Boyutu	3 mm
Toplam Mesafe	200 m	Aşındırıcı Geometri	Küre

Cr_3C_2 -NiCr, Al_2O_3 -TiO₂ ve NiCr kaplama işlemine tabi tutulmuş 3 adet numune ve kaplanmamış 1 adet numunenin kuru ortamda lineer git-gel geometrisinde aşınma deneyleri ESOGÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan CSM marka tribometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.4). Aşınma deney parametreleri Çizelge 4.5.'te verilmiştir. Aşınma cihazı ve bağlı donanım ve yazılımlarından ortalama sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti verileri elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Deneilerde kullanılan aşınma test cihazı

CSM marka tribometre cihazında ana malzemedan alınan 30mm çapında 25 mm yüksekliğindeki silindir gömleği numunelerini, lineer geometride 10 cm/sn hızda 200 m 6mm toplam aşınma mesafesinde 200 m toplam yol aldılmak suretiyle aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

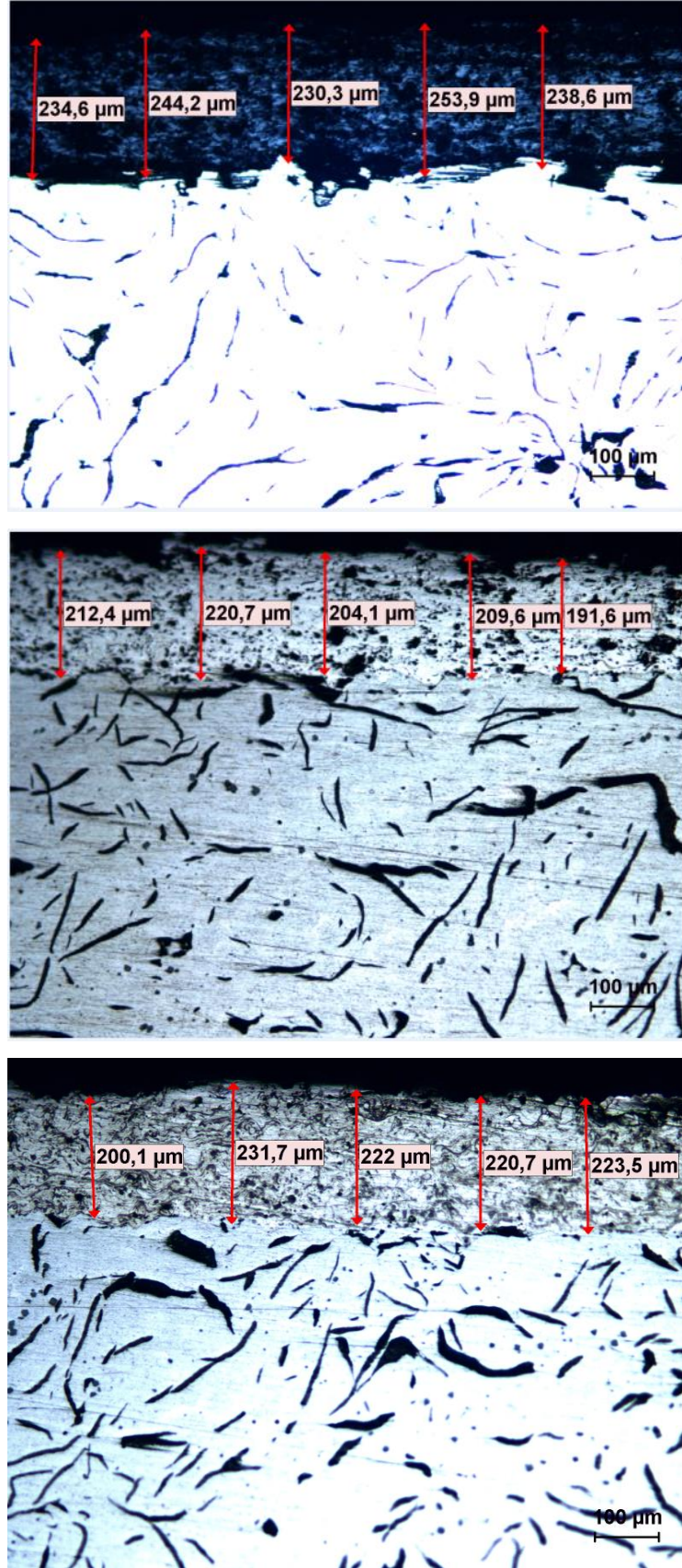
Yapılmış olan deney ve incelemelerin karşılaştırmalı olarak ayrıntılı bir analizi bu bölümde yer alacaktır. Öncelikle, kaplanan yüzeylerin ön kesitinden alınan optik mikroskop görüntüleri incelenerek değerlendirilecek olup daha sonraki bölümde numunelerin yüzey sertlik ve pürüzlülük değerleri tartışılacak ve aşınma testi sonucu yapılan hesaplamalardan çıkan sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenecektir. Son bölümde ise SEM görüntüleri analiz edilerek EDS analiz sonuçları sunulacaktır.

5.1. Optik Mikroskop İnceleme Sonuçları

Termal Sprey Kaplama yöntemiyle 200-300 µm arasında Cr₃C₂-NiCr, NiCr, Al₂O₃-TiO₂ kaplanmış ve kaplama işlemi uygulanmamış gri dökme demirden imal edilmiş olan silindir gömleği numuneleri metalografik inceleme için hazırlanmıştır. Hazırlık aşamasında numunelerden taşla kesme yöntemiyle örnekler alınmış, bu örnekler sırasıyla zımpara işlemlerine tabi tutulmuş ve son olarak çuhada parlatma işlemi uygulanmıştır. Numunelerin hazırlanmasının ardından optik mikroskopta inceleme işlemine geçilmiştir.

Şekil 5.1.'de lamel grafitli gri dökme demir üzerine kaplama yapılmış numunelerin x100 büyütme altında optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Optik mikroskop görüntülerinde lamel grafitli dökme demirin A tipi grafit yapısına sahip olduğu görülmektedir. Sağladığı yüksek mekanik özellikler nedeniyle A tipi grafit dağılımı lamel grafitli dökme demirlerde istenen bir durumdur. Görüntüler aynı zamanda kaplama malzemesinin yapısı ve kaplama ana malzeme geçiş noktasını da gözlemlemeyi mümkün kılmıştır. Kaplama yüzeylerinin kısmen porozlu yapıda ve kaplama yapılarının yer yer boşluklar barındırdığı gözlemlenmiştir.

Numunelerin kaplama kalınlıkları 100x büyütme altında 100 mikronluk kılavuz çizgiler kullanılarak ölçülmüştür. Her bir numune için yapılan toplam 5 kaplama kalınlığı ölçümler neticesinde Al₂O₃-TiO₂ kaplanmış numunenin ortalama kaplama kalınlığı 240 µ, Cr₃C₂-NiCr kaplanmış numunenin ortalama kaplama kalınlığı 208 µ, NiCr kaplanmış numunenin ortalama kaplama kalınlığı ise 220 µ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.1. Kaplanmış Numunelerin x 100 büyütmede ön kesit optik mikroskop görüntüleri:
a) Al₂O₃-TiO₂ kaplama, b) Cr₃C₂-NiCr kaplama, c) NiCr kaplama

5.2. Sertlik ve Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Sertlik ölçümleri için kaplama sertlik ölçümüne uygun bir yöntem olarak Vickers sertlik ölçme yöntemi tercih edilmiştir. Vickers sertlik ölçme yönteminde uygulanan yük diğer sertlik ölçüm yöntemlerine göre daha düşük olduğu için baskı ucu kaplama kalınlığını aşmış altlık malzemesine ulaşmadan yüzey sertliğini ölçebilmek için oldukça uygun bir yöntemdir. Vickers sertlik ölçüm cihazıyla her bir numunenin 5 kez sertlik ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen ortalama sertlik değerleri Çizelge 5.1.'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Ortalama numune sertlik ölçüm değerleri

Kaplama Malzemesi	Kaplanmamış Numune	Al ₂ O ₃ - TiO ₂ Kaplama	Cr ₃ C ₂ -NiCr Kaplama	NiCr Kaplama
Sertlik (HV)	279	940	772	423

Tablodan anlaşıldığı üzere kaplama işlemi, kaplanmamış numuneye oranla çok daha sert yüzeyler elde edilebilmesine imkan sağlamıştır. Bu durum yüzey sertliğinin artışıyla beraber aşınma dayanımının pürüzlülük ve diğer mekanik özelliklere de bağlı olarak artabileceğinin göstergesidir. Yapılan ölçümler sonucunda kaplanmamış numunenin sertlik değeri 279 HV Al₂O₃- TiO₂ kaplanmış numunenin sertlik değeri 940 HV Cr₃C₂-NiCr kaplanmış numunenin sertlik değeri 772 HV NiCr kaplanmış numunenin sertlik değeri ise 423 HV olarak tespit edilmiştir.

Bütün numunelerin yüzeyleri sırasıyla 160, 240, 400, 800, 1200 ve 2000 mesh aşındırıcılarla zımparalanmış ve çuhada parlatma işlemine tabi tutulduktan sonra yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Çizelge 5.2.'de yüzey profilometresi ile yapılan her numune başına 3 farklı ölçüm ortalaması alınarak elde edilen Ra değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.2. Ortalama yüzey pürüzlülük değerleri

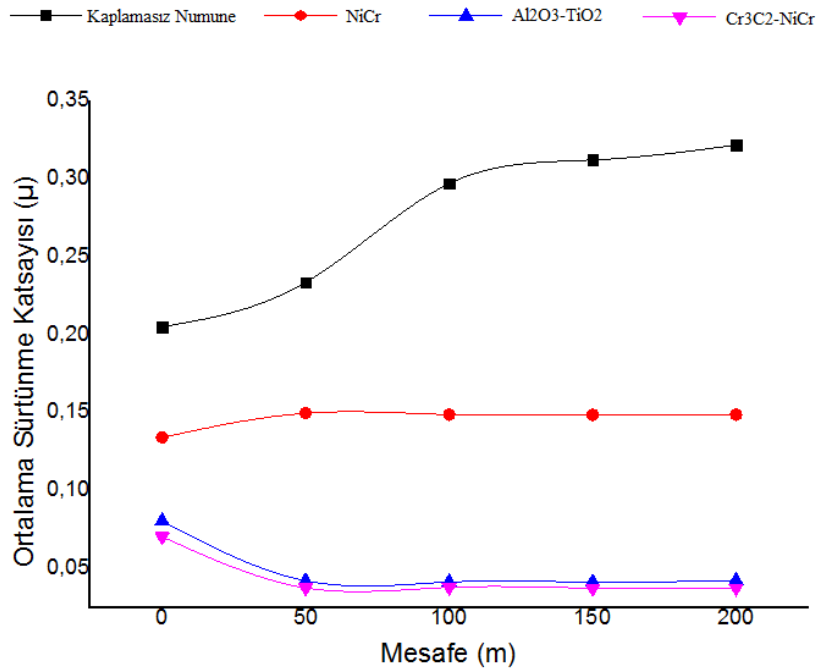
Kaplama Malzemesi	Kaplanmamış Numune	Al ₂ O ₃ - TiO ₂ Kaplama	Cr ₃ C ₂ -NiCr Kaplama	NiCr Kaplama
Ra	0.08	0.35	0.74	0.16

Yüzey pürüzlülüğü aşındırıcı etkisiyle yüzeyden partikül kopmasına ve üç elemanlı yoğun kopmaların yaşanabileceği bir aşınma etkisine yol açabileceği için, yüksek yüzey

pürüzlülüğü silindir gömleği malzemeleri çalışma yüzeylerinde istenmeyen bir durumdur. Tablodan da anlaşılacağı üzere, kaplama prosesinin ardından yapılan zımparalama ve parlatma işlemleri sonrası yüzey pürüzlülük değerleri en pürüzsüz yüzeyden en pürüzlü olana doğru; kaplanmamış numune, NiCr, Al₂O₃- TiO₂, Cr₃C₂-NiCr kaplanmış numuneler şeklinde sıralanmaktadır.

5.3. Aşınma Test Sonuçları

Dört farklı numune üzerinde aşınma testi cihazı yardımıyla lineer git gel hareketi geometrisinde aynı deney parametreleriyle aşınma deneyleri uygulanmıştır. Aşınma deneyleri akabinde yüzey profilometresi yardımıyla aşınma bölgesinin yüzey profili çıkarılmıştır. Deneyler neticesinde ortalama sürtünme katsayıları ve sürtünme kuvvetleri verileri bütün numuneler için hesaplanmıştır. Şekil 5.2.'de aşınma deneyleri neticesinde kaplamasız ve kaplamalı silindir gömleği numunelerinin mesafeye göre ortalama sürtünme katsayısı değerlerini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde kaplanmış numunelerin kaplanmamış numunelere göre daha düşük, mesafenin artışı doğrultusunda daha stabil sürtünme katsayısı değerleri verdiği görülebilir.



Şekil 5.2. Kaplamasız ve kaplanmış numunelerin mesafeye bağlı ortalama sürtünme katsayısı değerleri

Çizelge 5.3'te aşınma deneyine tabi tutulan bütün numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri verilmiştir. Çizelge 5.3.' te de görüldüğü gibi bütün kaplama malzemeleri kaplamasız numuneye göre daha düşük ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerine sahiptir. Aşınma oranlarını kıyasladığımızda kaplanmış malzemelerin kaplanmamış numuneye göre çok daha iyi performans göstermiş olduklarını görebiliriz. Aşınma deneyleri sonucu en düşük ortalama sürtünme katsayısı değerini Cr_3C_2 -NiCr kaplama malzemesi vermiştir. Al_2O_3 - TiO_2 kaplama malzemesi Cr_3C_2 -NiCr kaplama malzemesine çok yakın bir ortalama sürtünme katsayısı değeri verirken kaplamasız malzemedan sonra en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değerini NiCr kaplanmış malzeme vermiştir.

Çizelge 5.3. Aşınma deneyine tabi tutulan bütün numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri

Parametre / Malzeme	Kaplamasız	NiCr	Cr_3C_2 - NiCr	Al_2O_3 - TiO_2
Yüzey Prüzlülüğü (R_a)	0,08	0,16	0,74	0,35
Sertlik (HV)	279	423	772	940
Sürtünme Katsayısı(μs)	0,261	0,149	0,037	0,042
Aşınma Oranı (mm^3/Nm) $\times 10^{-3}$	0,09	0,06	0,04	0,03

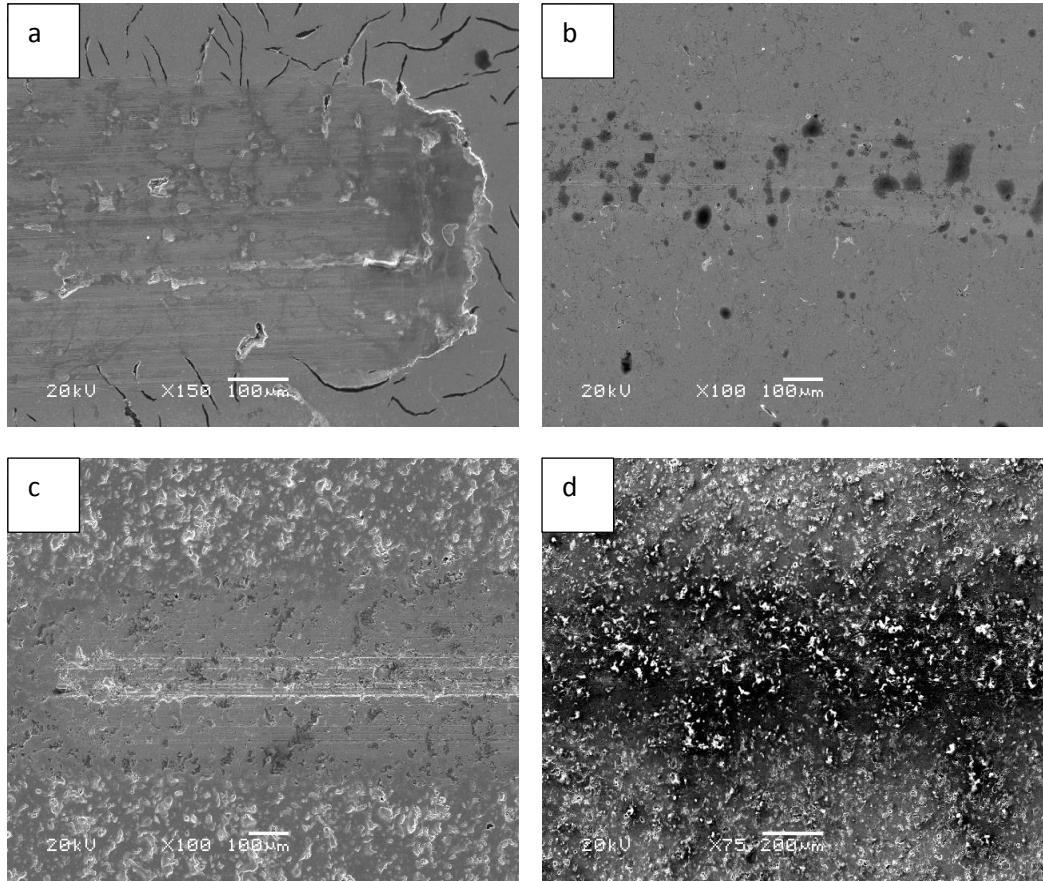
Aşınma oranları kıyaslandığında ise en düşük aşınma oranını Al_2O_3 - TiO_2 kaplanmış malzemenin verdiği, daha sonra Cr_3C_2 -NiCr kaplama malzemesinin, kaplanmamış malzemedan sonra en yüksek aşınma oranını ise NiCr kaplama malzemesinin verdiği görülmüştür. Cr_3C_2 -NiCr kaplama malzemesinin yüzey pürüzlülüğünün nispeten daha yüksek olması aşındırıcının yüzeyden partikül koparma ve aşınma mekanizmasına dahil etme olasılığını artırması aşınma oranı performansını olumsuz etkilemiş olabilir. Ayrıca sertlik değerleri kıyaslandığında, kaplama sertlik değerleri yükseldikçe aşınma oranının düştüğü, dolayısıyla aşınmaya karşı olan direncin yükseldiği görülmüştür.

Kaplanmış numunelerin kaplanmamış ana malzemeye göre aşınma dayanımlarındaki artış aşınan yüzeyin, kaplama prosesi aracılığıyla sertlik ve diğer mekanik özelliklerinin kaplanmamış numuneye göre çok daha fazla iyileştirilmiş olmasıyla açıklanabilir.

5.4. SEM ve EDS Analiz Sonuçları

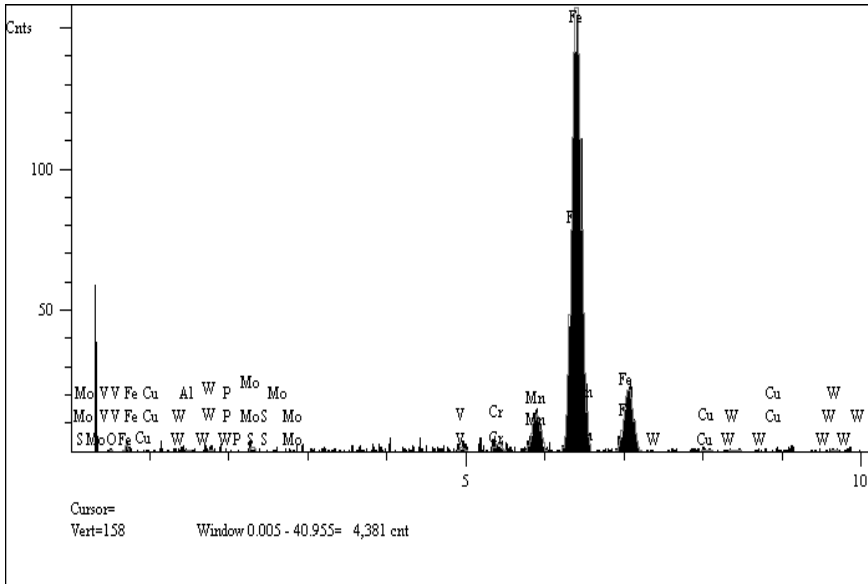
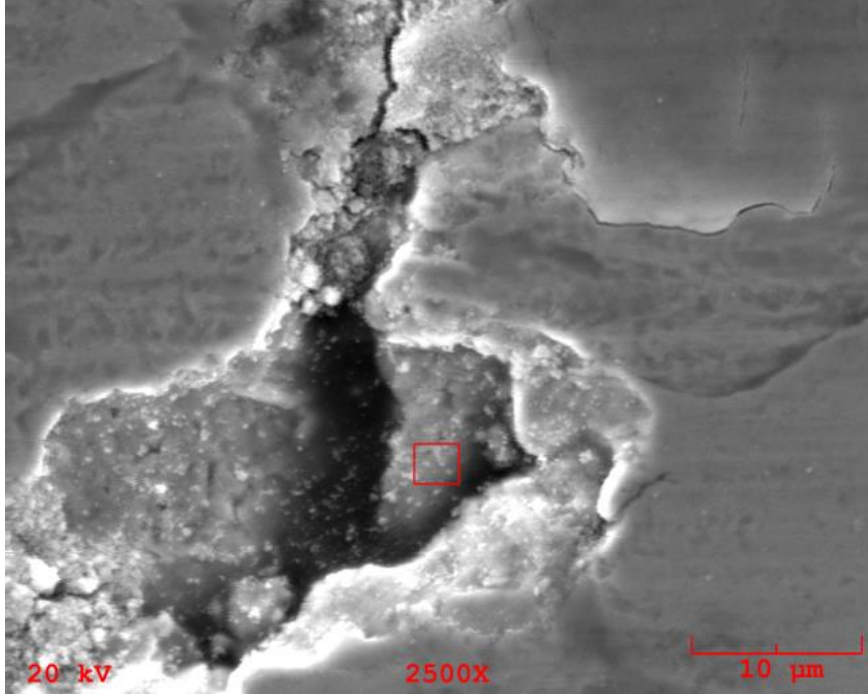
Yüzey profilinin ölçümü ve aşınma oranlarının hesaplanmasının ardından numuneler SEM görüntülü analizi ve EDS analizine tabi tutulmuştur. Analizler Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde JEOL JSM 5600 marka ve model SEM, EDS analiz cihazıyla gerçekleştirilmiştir.

Bütün numunelerde aşınan bölgelerin aşınma mekanizmalarının yorumlanabilmesi ve aşınma gerçekleşen bölgelerde oluşabilecek kimyasal etkileşim ve bileşen farklılaşmalarını gözlemleyebilmek adına SEM ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir.



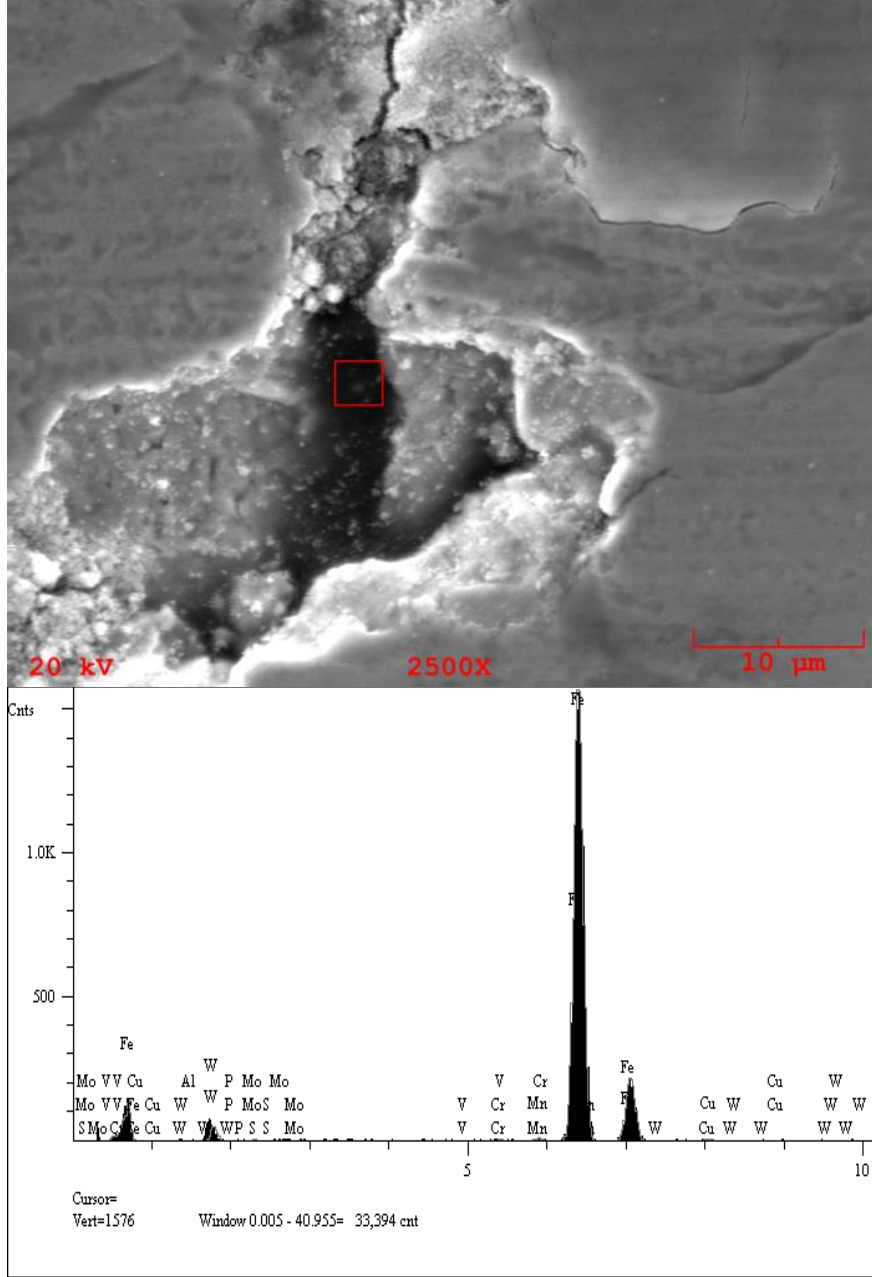
Şekil 5.3. Kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin aşınma izleri genel SEM görüntüsü: a) kaplamasız numune (x150 büyütme), b) NiCr kaplama (x100 büyütme), c) Cr_3C_2 -NiCr kaplama (x100 büyütme), d) Al_2O_3 - TiO_2 kaplama (x75 büyütme).

Şekil 5.3.' te kaplamasız NiCr kaplı, Cr_3C_2 -NiCr kaplanmış ve Al_2O_3 - TiO_2 kaplanmış silindir gömleği numunelerinin aşınma deneylerinin ardından meydana gelen aşınma izlerinin SEM görüntüleri verilmiştir.



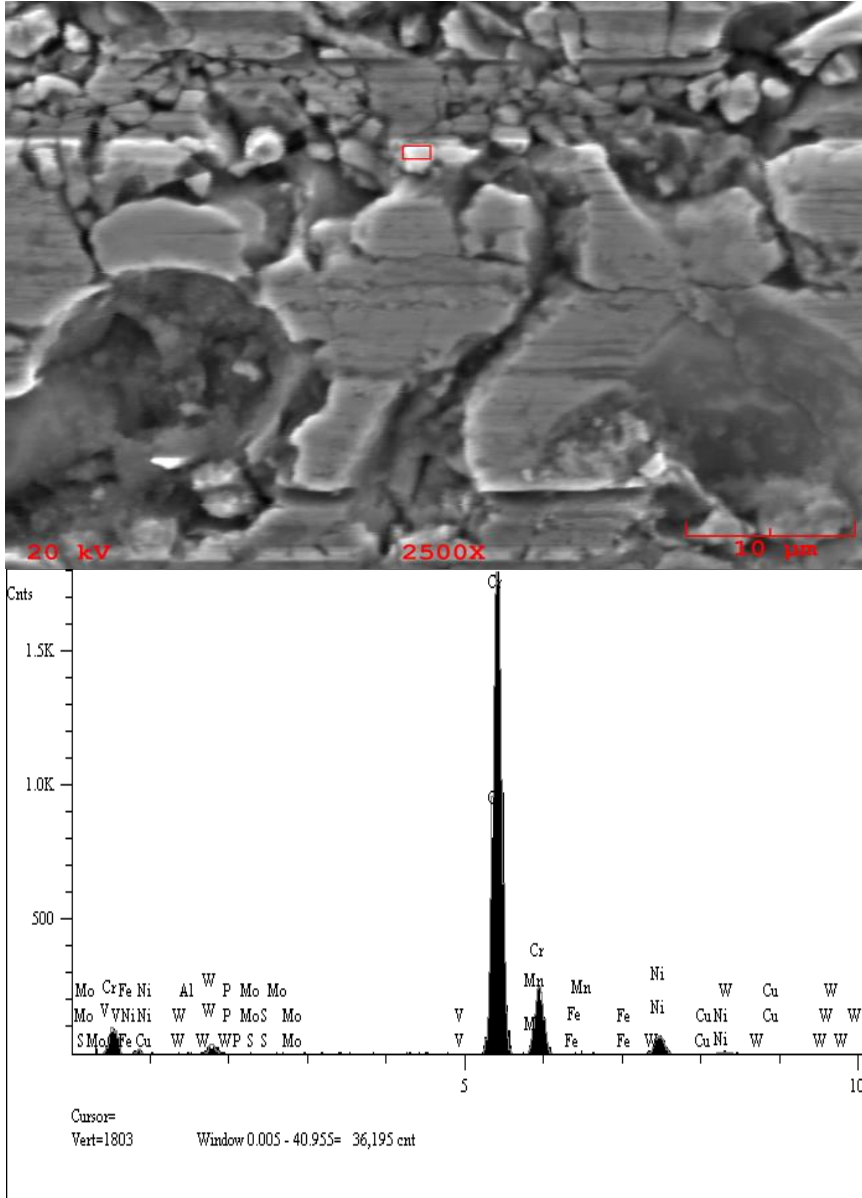
Şekil 5.4. Kaplamasız numunenin aşınma testi sonucu SEM görüntüsü ve EDS analiz grafiği (a)

Şekil 5.4. 'te kaplanmamış numunenin aşınma testi sonrası SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları verilmiştir. Şekilde işaretlenmiş olan (a) bölgenin EDS analizi neticesinde elemental yüzde dağılımı Fe %96, W %1.5, Mn %0.5, Cr %0.13, Mo %0.14, Cu %0.94, Al %0.08, V %0.05.



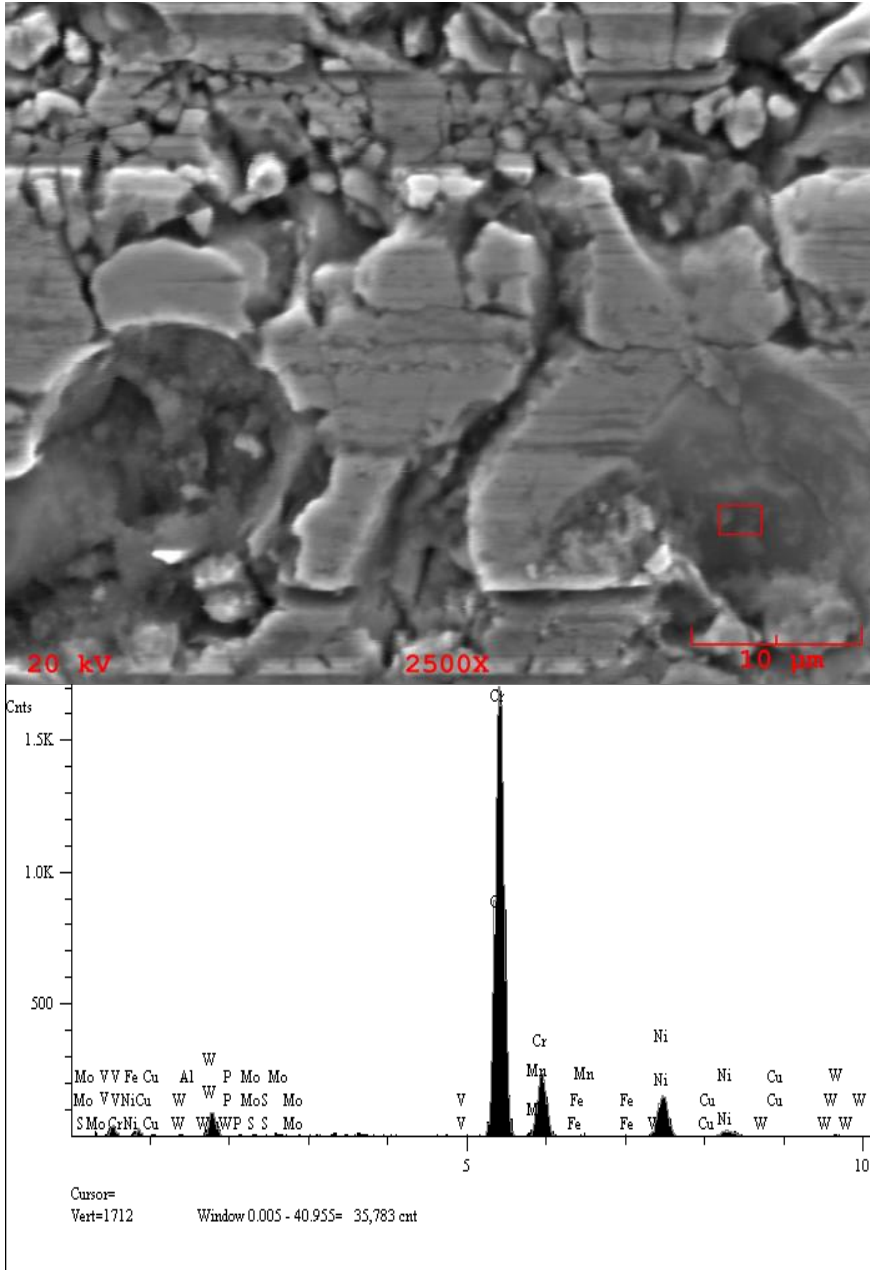
Şekil 5.5. Kaplamasız numunenin aşınma testi sonucu SEM görüntüsü ve EDS analiz grafiği (b)

Şekil 5.5. 'te kaplanmamış numunenin aşınma testi sonrası SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları verilmiştir. (b) bölgesinin elemental yüzde dağılımı Fe %83, W %7.61, Mn %5.60, Cr %0.8, Mo %0.48, Cu %1.39, Al %0.25, V %0.44' tür.



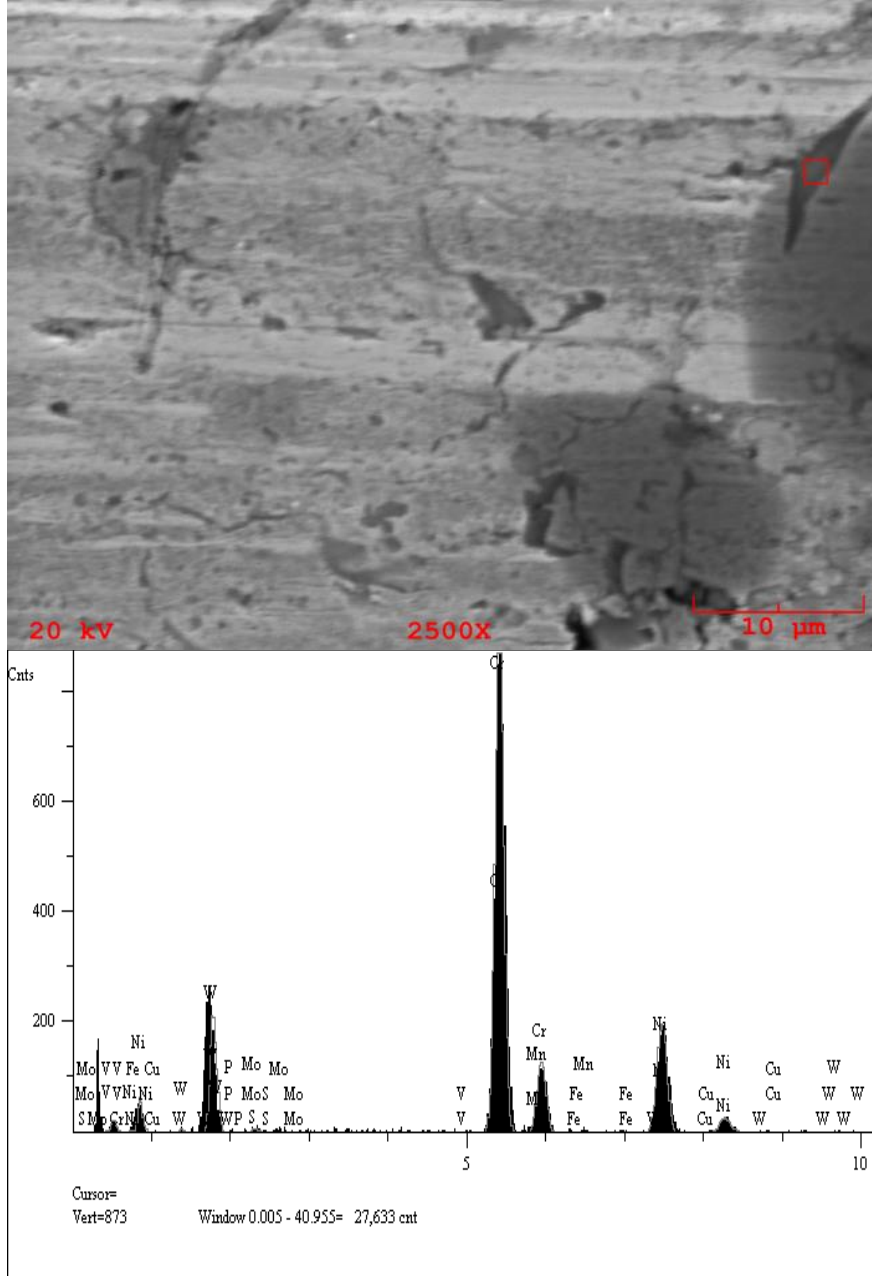
Şekil 5.6. Cr_3C_2 -NiCr kaplanmış numunenin aşınma testi sonucu SEM görüntüsü ve EDS analiz grafiği (a)

Şekil 5.6.'da Cr_3C_2 -NiCr kaplanmış numunenin aşınma testi sonrası SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları verilmiştir. EDS analizi neticesinde (a) bölgesinin elemental yüzde dağılımı Fe %0.28, W %4, Cr %88, Ni %7.38 şeklindedir.



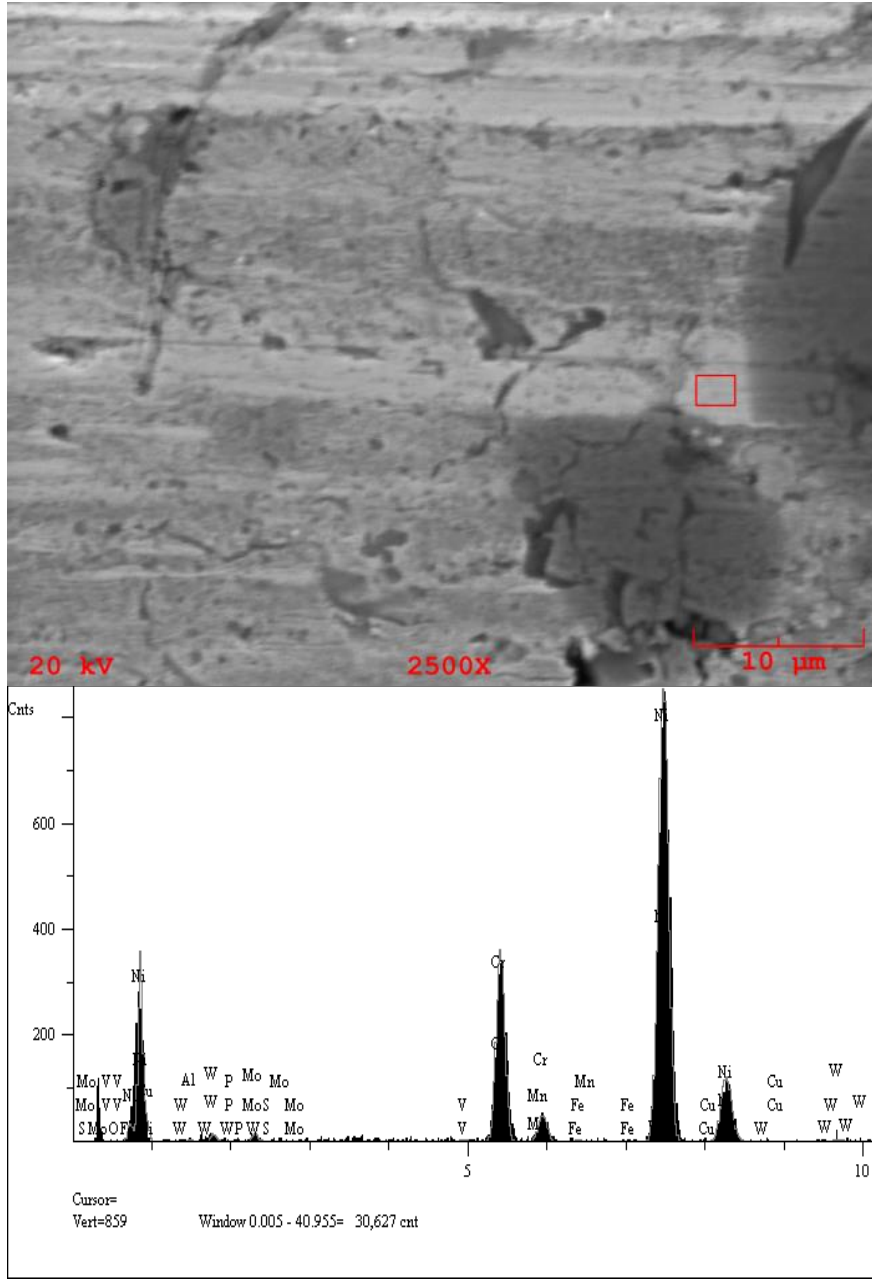
Şekil 5.7. Cr_3C_2 -NiCr kaplanmış numunenin aşınma testi sonucu SEM görüntüsü ve EDS analiz grafiği (b)

Şekil 5.7.'de Cr_3C_2 -NiCr kaplanmış numunenin aşınma testi sonrası SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları verilmiştir. EDS analizi neticesinde b bölgesinin elemental yüzde dağılımı Fe %0.31, W %6.40, Ni% 15, Cr %76.68'dir.



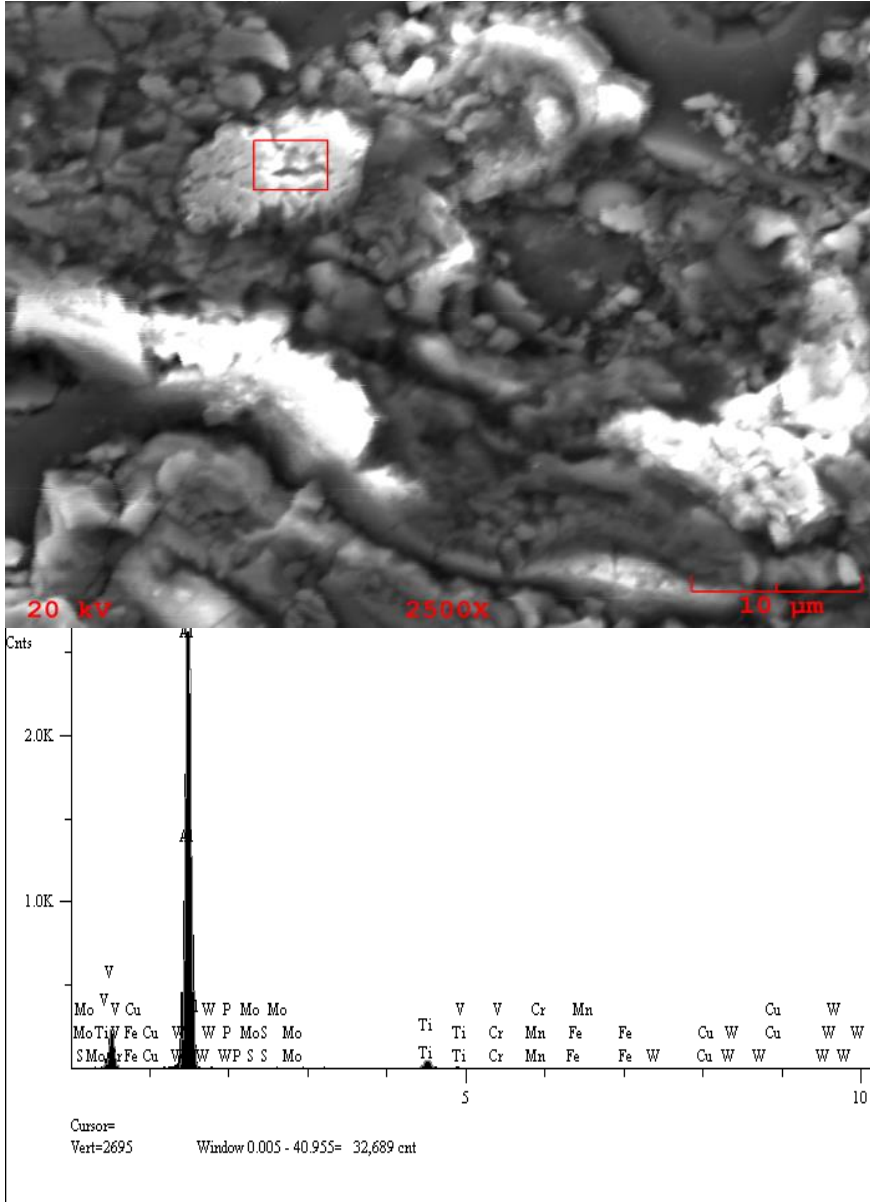
Şekil 5.8. NiCr kaplanmış numunenin aşınma testi sonucu SEM görüntüsü ve EDS analiz grafiği (a)

Şekil 5.8.'de NiCr kaplanmış numunenin aşınma testi sonrası SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları verilmiştir. EDS analizi neticesinde (a) bölgesinin elemental yüzde dağılımı Fe %0.36, W %4, Cr % 65, Ni % 29' dur.



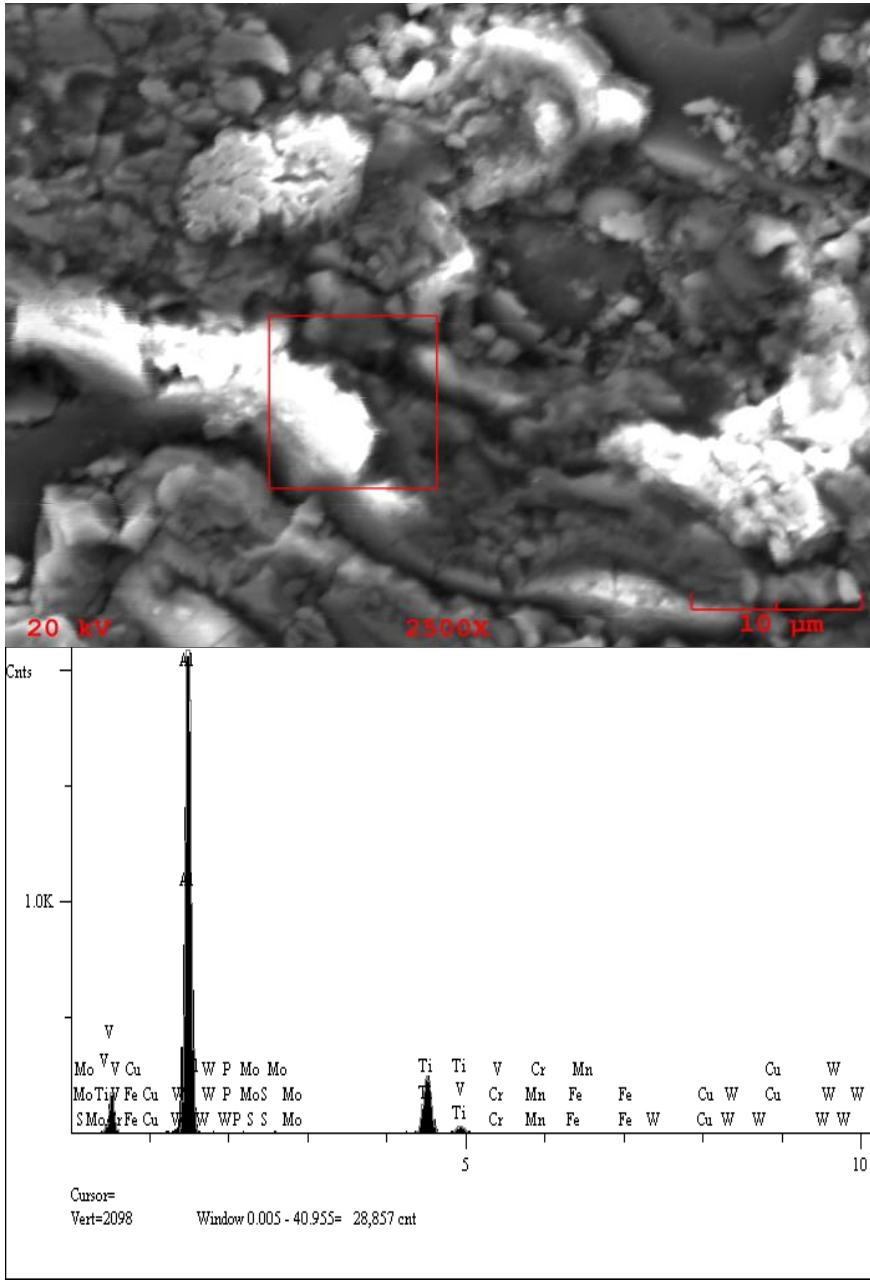
Şekil 5.9. NiCr kaplanmış numunenin aşınma testi sonucu SEM görüntüsü ve EDS analiz grafiği (b)

Şekil 5.9.'da NiCr kaplanmış numunenin aşınma testi sonrası SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları verilmiştir. EDS analizi neticesinde (b) bölgesinin elemental yüzde dağılımı Fe %0.15, W %5, Ni% 79, Cr % 14' tür.



Şekil 5.10. Al_2O_3 - TiO_2 numunenin aşınma testi sonucu SEM görüntüsü ve EDS analiz grafiği (a)

Şekil 5.10'da Al_2O_3 - TiO_2 kaplanmış numunenin aşınma testi sonrası SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları verilmiştir. EDS analizi neticesinde (a) bölgesinin elemental yüzde dağılımı Fe %0.18, W %3, Al % 77, Ti % 4 şeklindedir.



Şekil 5.11. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ numunenin aşınma testi sonucu SEM görüntüsü ve EDS analiz grafiği (b)

Şekil 5.11.'de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ kaplanmış numunenin aşınma testi sonrası SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları verilmiştir. EDS analizi neticesinde (b) bölgesinin elemental yüzde dağılımı ise Fe %0.17, W %3, Ti %16, Al % 65' tir.

SEM görüntüleri ve EDS elemental analiz neticeleri incelendiğinde aşındırıcı bilyadan W bileşeninin adhezyon bağı kuvvetleri etkisiyle kaplanmış ya da kaplanmamış aşınan karşı malzemeye bağlandığı ve numunelerin aşınmasında bu adhezif kuvvetlerin ve mekanizmaların önemli bir rol oynadığı yorumu yapılabilir. Ayrıca görüntüler yüzeyden malzeme kopmalarının yaşandığını açıkça ortaya koyar niteliktedirler. EDS analizleri sonucu, hem kaplanmamış numune alaşım elementi dağılımının hem de kaplama malzemesi olarak kullandığımız, Al, Ti, Cr, Ni içeren bileşenlerin numune üzerindeki elemental dağılımlarını analiz alınan bölge açısından açıkça ortaya koymaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Raylı Sistemler yük ve yolcu taşımacılığında kullanılan bir ağır hizmet dizel motorunun silindir gömleğinin aşınma mekanizmaları irdelenerek, gömlek aşınma davranışlarını, yüzey özelliklerini iyileştirebilmek ve kaplama prosesinin gömlek revizyonu için uygunluğunu ortaya koyabilmek amaçlanmıştır.

Bu amaçla, silindir gömleğinden alınan numuneler termal spreyle kaplama yöntemi kullanılarak $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, NiCr , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ kaplama malzemeleriyle kaplanmıştır. Kaplanan numuneler lineer geometride eşit şartlarda atmosferik ortamda aşınma testine tabi tutulmuştur.

Aşınma testleri neticesinde kaplanmış bütün numuneler kaplamasız ana malzemeye göre daha düşük sürtünme katsayısı ve daha az aşınma oranı vermişlerdir. $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ kaplanmış numunenin sürtünme katsayısı değeri $0,037 \mu\text{s}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ kaplanmış numunenin sürtünme katsayısı $0,042 \mu\text{s}$ hesaplanmış olup aşındırıcıya karşı $0,261 \mu\text{s}$ sürtünme katsayısı veren kaplamasız numuneye göre çok daha düşük sürtünme katsayısı değerleri elde edilmesini sağlamışlardır. Ayrıca aşınma oranı $0,03(\text{mm}^3/\text{Nm})\times 10^{-3}$ hesaplanan $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ kaplanmış numune ve aşınma oranı $0,04(\text{mm}^3/\text{Nm})\times 10^{-3}$ hesaplanan $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ kaplanmış numune yine aşınma oranı $0,09(\text{mm}^3/\text{Nm})\times 10^{-3}$ hesaplanan kaplamasız numuneye göre çok daha iyi aşınma performansları sergilemişlerdir. NiCr kaplama malzemesiyle kaplanmış numune ise nispeten daha düşük sertlik ve mekanik özelliklere sahip olduğu için kaplanmış diğer iki numuneye oranla daha yüksek sürtünme katsayısı ($0,149 \mu\text{s}$) ve daha fazla aşınma oranı ($0,09 (\text{mm}^3/\text{Nm})\times 10^{-3}$) değerleri vermiş olup kaplamasız malzemeye oranla daha iyi aşınma direnci göstermiş, diğer iki kaplama malzemesi kadar yüksek performans verememiştir. Mevcut deney şartlarında kaplama için en uygun malzemeler sağladıkları birbirlerine çok yakın, oldukça düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleriyle $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ ve $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ kaplama malzemeleridir.

Ayrıca bu çalışma laboratuvar ortamında hızlı ve nispeten az maliyetli bir şekilde silindir gömleği aşınma testi yapabilmeyi hedeflemiştir. Silindir gömleğinin servis ömrünü ve performansını arttırabilmek adına laboratuvar koşullarında az maliyetli ve kısa sürede, gerçeğe en yakın testler bizi doğru işlem için doğru malzemeyi kullanma konusunda mümkün olan en hızlı şekilde sonuca ulaştırabilecektir. Bu sayede doğru silindir gömleği malzemesi ya da yüzey özelliklerini geliştirme prosesini tercih edebilmek için oldukça yüksek maliyetli ve zaman alıcı olan uzun yol testleri yerine laboratuvar ortamında yapılacak testler yol testi aşamasında denenmeye değer ve elverişli olan kaplama malzemelerini belirlemenin temel prensibi olacaktır.

Kaplama işlem parametrelerinin, yüzey pürüzlülüğünün, karşı malzeme yüzey ve kaplama özelliklerinin, yağlama rejimi değişikliklerinin, motor içi sıcaklık değişiminin, ağır hizmet dizel motor silindir gömleği aşınma davranışlarına etkileri ileriki araştırmaların inceleme konusu olabilir. Ağır hizmet dizel motoru silindir gömleği yüzey kaplama işlemlerinin egzoz emisyon değerlerine olan etkileri de, günümüzde çevresel etki değerlerinin ne kadar önemli olduğunu göz önünde bulundurursak, daha sonraki araştırmaların inceleme konusu olabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Andersson, P., Tamminen, J., Sandström, C., 2002, Piston Ring Tribology. A Literature Survey, VTT Tiedotteita, p. 71-78
- Anonim, 2018, HVOF (High Velocity Oxygen Fuel), <http://www.teslab.sakarya.edu.tr/tr/icerik/10716/42049/hvof>, erişim tarihi: 27.08.2018
- Bhushan, B., 2001, Modern Tribology Handbook, CRC Press LLC, p. 273-289
- Bhushan, B., 2013, Introduction to Tribology, John Wiley & Sons Ltd, p. 1-7, 315-377.
- Hazar, H., 2004, Bir Dizel Motoru Silindir Yüzeyinin Seramik Malzeme ile Kaplanarak Aşınma Davranışının İncelenmesi, Doktora tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- İçingür, Y., Eray, E., 2011, Plazma Sprey Kaplama Yöntemi, <https://nenedir.com.tr/plazma-sprey-kaplama-yontemi/>, erişim tarihi: 28.08.2018
- İzgiz, S., 2006, Silindir Gömleği Malzemeleri, Metalurji, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, 144, s. 41-52
- Jayakumar, N., Mohanamurugan, S., Rajavel, R., 2017, Study Of Wear In Chrome Plated Cylinder Liner In Two Stroke Marine Diesel Engine Lubricated By Hans Jensen Swirl Injection Principle, Elsevier Ltd
- Johansson, S., Frennfelta, C., Killinger, A., Nilssona, P. H., Ohlssonc, R., Rosénd B. G., Frictional evaluation of thermally sprayed coatings applied on the cylinder liner of a heavy duty diesel engine: Pilot tribometer analysis and full scale engine test, Wear, 273, 82-92

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Kapsız, M., 2011, Segman Silindir Çifti Yüzeylerinde Bor Dop Edilmiş Kaplamanın Motor Sürtünme Kayıplarına Etkisinin İncelenmesi, Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kurgun, S., 2014, Molibden Kaplı Piston Segmanlarının Aşınma Davranışlarının İncelenmesi ve Optimizasyonu, Yüksek Lisans tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Lakshminaranayan, P. A., Nayak, N. S., 2011, Critical Component Wear in Heavy Duty Engines, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, p. 3-8
- Qianfan, X., 2011, Diesel Engine System Design, Woodhead Publishing Limited, p. 163-172
- Stachowiak, G., Batchelor, A., 2005, Engineering Tribology, Elsevier Inc, 1-9, 501-571
- Ulutan M., 2007, AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri Ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Uozato, S., Nakata, K., Ushio, M., Evaluation of Ferrous Powder Thermal Spray Coatings on Diesel Engine Cylinder Bores, Surface & Coatings Technology, 200, 2580-2586