



**T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**PVD TEKNİĞİ KULLANILARAK FARKLI SERAMİK  
MALZEMELERLE KAPLANMIŞ SEGMANLARIN AŞINMA  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

**Dileknur EVRENSEL**

Danışman  
**Doç. Dr. Sevim ALIŞIR**

SAMSUN  
2021

T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



**PVD TEKNİĞİ KULLANILARAK FARKLI SERAMİK  
MALZEMELERLE KAPLANMIŞ SEGMANLARIN AŞINMA  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

**Dileknur EVRENSEL**

Danışman

**Doç. Dr. Sevim ALIŞIR**

Bu tez çalışması, PYO.MUH.1904.19.023 proje numarasıyla, bilimsel araştırma projesi olarak Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından desteklenmiştir.

SAMSUN  
2021

## TEZ KABUL VE ONAYI

**Dileknur EVRENSEL** tarafından, **Doç. Dr. Sevim ALIŞIR** danışmanlığında hazırlanan “**PVD Tekniği Kullanılarak Farklı Seramik Malzemelerle Kaplanmış Segmanların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi**” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 24/02/2021 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

	<b>Unvanı Adı Soyadı</b> <b>Üniversitesi</b> <b>Ana Bilim/Ana Sanat Dalı</b>	<b>İmza</b>	<b>Sonuç</b>
<b>Başkan</b>	Prof. Dr. Fatih YILDIZ Erzurum Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		<input type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
<b>Üye</b> (Danışman)	Doç. Dr. Sevim ALIŞIR Ondokuz Mayıs Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı		<input type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
<b>Üye</b>	Dr. Öğr. Üyesi Sinem ÇEVİK Ondokuz Mayıs Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı		<input type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY

... / ... / ...

Prof. Dr. Ali BOLAT  
Enstitü Müdürü

## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Dönem Projesi tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığımı taahhüt ve beyan ederim.

İmza

22 / 03 / 2021

Dileknur EVRENSEL

## TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

**Tez Başlığı :** PVD TEKNİĞİ KULLANILARAK FARKLI SERAMİK MALZEMELERLE KAPLANMIŞ SEGMANLARIN AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 18.01.2021 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 7

Tek kaynak oranı : % 2 çıkmıştır.

İmza

22 / 03 / 2021

Doç. Dr. Sevim ALIŞIR

## ÖZET

### PVD TEKNİĞİ KULLANILARAK FARKLI SERAMİK MALZEMELERLE KAPLANMIŞ SEGMANLARIN AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Dileknur EVRENSEL  
Ondokuz Mayıs Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı  
Yüksek Lisans, Mart/2021  
Danışman: Doç. Dr. Sevim ALIŞIR

İçten yanmalı motorlarda farklı makine elemanları arasındaki sürtünme yüzeyler performans kaybına, zamanla meydana gelen aşınmalar ise motor ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Sürtünmenin fazla olduğu durumda, motorlu taşıtın yüksek performans sergileyebilmesi için daha fazla yakıt tüketmesi gerekmektedir. Bu da zararlı egzoz gazlarının doğaya salınımını artırmaktadır.

Makine elemanlarından özellikle piston segmanları, sürtünme kayıplarının yaklaşık %50'sini oluşturmaktadır. Segmanlar kullanım sürecinde, yüksek sıcaklıklara ve mekanik sürtünmeye maruz kalmaktadır. Bundan dolayı aşınmaya karşı oldukça yatkın parçalardır. Segman çeşitleri içerisinde tepe segmanı gerek yanma odasına yakınlığından gerek bulunduğu bölgeye taşınan yağ miktarının sınırlı olmasından dolayı diğer segmanlara göre daha fazla aşınmaktadır. Motorda segman aşınması olması halinde birçok çevresel ve ekonomik istenmeyen sorunları beraberinde getirecektir. Bu sorunların önüne geçmek için en etkili yöntem yüzey kaplama işlemidir.

Bu çalışmada, tepe segmanlarının yüzey iyileştirilmesinin yapılması ve uygulanan seramik kaplamaların aşınma davranışlarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla katodik ark fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniği kullanılarak dökme demirden üretilmiş piston tepe segmanlarının yüzeyleri TiAlCN, AlCrN, tek ve çok katlı TiAlN seramik filmler ile kaplanmıştır. Seramik kaplamaların yapısal karakterizasyonu için X-ışını difraktometresi (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM/EDX) kullanılmıştır. Ayrıca kaplamaların mikro-sertlikleri belirlenmiştir. Numunelerin tribolojik özellikleri, 10 N yük altında, 0,18 m/s kayma hızında, ileri-geri (Reciprocating) aşınma testi ile belirlenmiştir.

Tribolojik test sonuçlarına göre kaplanmış segmanların sürtünme katsayılarının kaplamasız numuneye kıyasla azaldığı ve en düşük sürtünme katsayısı değerini TiAlCN ( $\mu=0,21$ ) kaplı numunede olduğu tespit edilmiştir. TiAlCN kaplı numunede, kaplamasız numuneye kıyasla, aşınma kaybında yaklaşık %97 oranında azalma olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada tek ve çok katlı TiAlN kaplamalar hazırlanarak, kaplama kalınlığının tribolojik özelliklere etkisi incelenmiştir. Çok katlı TiAlN kaplamada artan katman sayısına bağlı olarak sertliğin arttığı, aşınma kayıplarının ve sürtünme katsayısının azaldığı gözlenmiştir. Aşınan yüzeylerden alınan SEM ve EDX verileri sonucunda sürtünme esnasında metal oksit bileşiklerinin oluştuğu tespit edilmiş ve oluşan bu bileşiklerin aşınma mekanizması üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Seramik yüzeylerde oluşan koruyucu oksit tabakasının bozularak yüzeyden ayrılmadığı sürece taban malzeme yüzeyini koruduğu sonucuna ulaşılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** PVD, Seramik Kaplama, Aşınma, Segman, Çok katlı kaplama

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF THE WEAR BEHAVIOR OF PISTON RINGS COATED WITH DIFFERENT CERAMIC MATERIALS BY USING PVD TECHNIQUE

Dileknur EVRENSEL  
Ondokuz Mayıs University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Metallurgy and Materials Engineering  
Master, March/2021  
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sevim ALIŞIR

In internal combustion engines, friction surfaces between different machine elements cause performance loss, wear that occurs over time causes a shortened engine life. In order for the motor vehicle to exhibit high performance, it must consume more fuel. This increases the emission of harmful exhaust gases to nature. Among the machine elements, especially piston rings make up about 50% of friction losses. Rings are exposed to high temperatures and mechanical friction with the cylinder surfaces during their use. Therefore, they are very prone to wear. Among the ring types, the top ring is worn more than other rings due to its proximity to the combustion chamber and the limited amount of oil transported to the region. In the case of ring wear in the engine, it will bring many unwanted environmental and economic problems. The most effective method to avoid these problems is the surface coating process.

This study, it is aimed to improve the surface of the top rings and to determine the wear behavior of the applied ceramic coatings. For this aim, the surfaces of piston top rings made of cast iron using the cathodic arc physical vapor deposition (PVD) technique are coated with TiAlCN, AlCrN, mono and multilayer TiAlN ceramic films. X-ray diffractometer (XRD) and Scanning Electron Microscope (SEM / EDX) was used for the structural characterization of ceramic coatings. In addition, the micro-hardness of the coatings were determined. The tribological properties of the samples were determined by the Reciprocating abrasion test under 10 N load, at a sliding speed of 0,18 m/s.

According to the tribological test results, it was determined that the friction coefficient of the coated rings decreased compared to the uncoated sample and the lowest friction coefficient value was found in the TiAlCN ( $\mu = 0,21$ ) coated sample. It was determined that there was a 97% reduction in abrasion loss in TiAlCN coated sample compared to the uncoated sample. In addition, mono and multi-layer TiAlN coatings were prepared and the effect of coating thickness on tribological properties were investigated. In multi-layer TiAlN coating, it was observed that hardness increased, wear losses and friction coefficient decreased due to the increasing number of layers. As a result of the SEM and EDX data taken from the wearing surfaces, it was determined that metal oxide compounds were formed during friction and these compounds were found to be effective on the wear mechanism. It has been concluded that the protective oxide layer formed on the ceramic surfaces protects the surface of the base material as long as it is not separated from the surface.

**Keywords:** PVD, Ceramic Coating, Wear, Ring, Multi-layer coating

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Lisans dönemimde olduğu gibi, lisansüstü dönemimde de danışmanlığımı üstlenen, bilgi ve tecrübeleri ile beni aydınlatan, tez konumun başından tezimin sonuçlandırılmasına kadar olan süreçte maddi ve manevi yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, yoğun çalışma hayatına rağmen bana hep zaman ayırabilen, hayatım boyunca örnek alacağım çok değerli hocam Doç. Dr. Sevim ALIŞIR'a saygıyla ve içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Segmanların temininde ve PVD kaplamaların gerçekleştirilmesinde desteklerini esirgemeyen SAMSUN SEGMAN SANAYİ ve KAPCO KAPLAMA firması sorumlularına teşekkür ederim.

Aşınma testlerinin yapılmasında tezime büyük katkı sağlayan Öğr. Gör. Ömer Faruk DENİZ'e teşekkür ederim.

Lisans ve lisansüstü dönemim boyunca bilgi birikimlerini ve tecrübelerini benimle paylaşan Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ndeki hocalarıma teşekkür ederim.

Üzerimde sonsuz emekleri olan, gösterdikleri sabır ve özveriyle bugünlere gelmemi sağlayan annem Zeliha EVRENSEL, babam Ahmet EVRENSEL ve kız kardeşim Gamze EVRENSEL'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, PYO.MUH.1904.19.023 proje numarasıyla, bilimsel araştırma projesi olarak Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından desteklenmiştir. Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimine desteklerinden dolayı, teşekkür ederim.

Dileknur EVRENSEL

# İÇİNDEKİLER

<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Çalışmanın Konusu ve Amaç .....	1
<b>2. TRIBOLOJİK SİSTEM, SÜRTÜNME VE AŞINMA</b> .....	<b>4</b>
2.1. Tribolojik Sistem .....	4
2.1.1. Motor Sürtünmesinin Önemi .....	4
2.1.2. Motor Aşınmasının Önemi.....	6
2.1.2.1 Aşınma Mekanizmaları .....	7
2.1.2.1.1 Adhesif Aşınma.....	7
2.1.2.1.2 Abrasif Aşınma .....	7
2.1.2.1.3 Yorulma Aşınması .....	9
2.1.2.1.4 Korozyon Aşınması.....	11
<b>3. SEGMANLARIN GENEL ÖZELLİKLERİ</b> .....	<b>14</b>
3.1. Segman Çeşitleri .....	14
3.2. Segman Malzemeleri ve Kaplanması.....	15
<b>4. YÜZEY KAPLAMA TEKNİKLERİ</b> .....	<b>17</b>
4.1. PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) Tekniği .....	18
4.1.1. PVD Tekniğinin Sınıflandırılması .....	19
4.1.1.1. İyon Kaplama Yöntemi .....	19
4.1.1.2 Sıçratma Yöntemi .....	20
4.1.1.3 Buharlaştırma Yöntemi .....	21
4.1.1.3.1. Katodik Ark Fiziksel Buhar Biriktirme.....	22
4.1.2. PVD Tekniği ile Üretilen Çeşitli Kaplamalar .....	23
4.1.2.1 TiN Kaplama .....	23
4.1.2.2. TiAlN Kaplama .....	23
4.1.2.3. TiCN Kaplama .....	24
4.1.2.4. TiAlCN Kaplama .....	25
4.1.2.5. CrN Kaplama .....	26
4.1.2.6. Çok Katmanlı Kaplamalar.....	27
4.1.3. PVD Tekniği ile Motor Elemanlarının Seramik Malzeme ile Kaplanması.....	28
<b>5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>31</b>
<b>6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b> .....	<b>35</b>
6.2. Kaplama İşlemi .....	36
6.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM/EDX) Analizleri.....	38
6.4. XRD Analizi .....	38
6.5. Mikro-Sertlik Ölçümleri .....	39
6.6. Aşınma Testi .....	39



<b>7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA</b> .....	<b>41</b>
7.1. Kimyasal Bileşim Analiz Sonuçları.....	41
7.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi Sonuçları.....	43
7.3. XRD Analizi Sonuçları.....	44
7.4. Mikro-Sertlik Testi Sonuçları.....	45
7.5. Sürtünme Katsayısı Sonuçları.....	47
7.6. Aşınma Oranı Sonuçları.....	48
7.7. Aşınma İzi SEM Görüntüleri ve EDX Analizi.....	49
<b>8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b> .....	<b>58</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>60</b>
<b>ÖZ GEÇMİŞ</b> .....	<b>67</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### SİMGELER

HV	Vickers Sertlik
m	Metre
mm	Milimetre
N	Newton
$\mu\text{m}$	Mikrometre
$\mu$	Sürtünme Katsayısı

### KISALTMALAR

PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapor Deposition)
TiN	Titanyum Nitrür
TiAlCN	Titanyum Alüminyum Karbo Nitrür
AlCrN	Alüminyum Krom Nitrür
TiAlN	Titanyum Alüminyum Nitrür
C	Karbon
Cr	Krom
WC	Tungsten Karbür
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumina
DLC	Dimond Like Carbon
GLC	Graphite Like Carbon
TiSiCN	Titanyum Silisyum Karbo Nitrür
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	X-Işını Kırınımı
EDX	Enerji Dağılımlı X-Işını Spektrometre

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1. Bir pistonda termal dağılımların gösterilmesi .....	2
Şekil 2. 1. Tribolojik sistemdeki bileşenlerin şematik olarak gösterimi .....	4
Şekil 2. 2. Motordaki toplam mekanik kayıpların dağılımı .....	6
Şekil 2. 3. Bir motorun aşınmadan etkilenen bileşenleri .....	6
Şekil 2. 4. Adhesif aşınma .....	7
Şekil 2. 5. Adhesif aşınma SEM görüntüleri .....	7
Şekil 2. 6. Abrasif aşınma .....	8
Şekil 2. 7. Abrasif aşınma SEM görüntüleri .....	9
Şekil 2. 8. Yuvarlanma ve kayma hareketi altında yorulmaya bağlı meydana gelen çatlak .....	10
Şekil 2. 9. Yorulma aşınması SEM görüntüleri .....	10
Şekil 2. 10. Ciddi delaminasyon aşınması SEM görüntüsü .....	11
Şekil 2. 11. Mg, Al ve Fe üzerinde gerçekleşen oksit tabakası çeşitleri .....	12
Şekil 2. 12. Korozyon aşınmasının gelişimi .....	13
Şekil 2. 13. Korozyon aşınması SEM görüntüsü .....	13
Şekil 3. 1. Piston segman grubu alanında meydana gelen olaylar (yeşil, yakıt; sarı, yağlama yağı; mavi, gaz akışı) .....	14
Şekil 3. 2. Piston segman çeşitleri .....	15
Şekil 4. 1. Kaplanacak malzemenin bulunduğu fiziksel duruma göre kaplamaların sınıflandırılması .....	18
Şekil 4. 2. İyon kaplama yönteminin mekanizması .....	20
Şekil 4. 3. Sıçratma yönteminin mekanizması .....	21
Şekil 4. 4. Buharlaştırma yönteminin mekanizması .....	21
Şekil 4. 5. Katodik Ark PVD sisteminin mekanizması .....	22
Şekil 4. 6. TiN kaplama örnekleri .....	23
Şekil 4. 7. TiAlN kaplama örnekleri .....	24
Şekil 4. 8. TiCN kaplama örnekleri .....	25
Şekil 4. 9. TiAlCN kaplama örneği .....	26
Şekil 4. 10. CrN kaplama örnekleri .....	27
Şekil 4. 11. (a-a') Tek katmanlı ve (b-b') çok katmanlı kaplamalarda farklı çatlak büyümeleri .....	28

Şekil 6. 1. Katodik Ark PVD cihazı .....	37
Şekil 6. 2. a) Kaplamasız, b) TiAlCN, c) AlCrN, d) tek katlı TiAlN ve e) çok katlı TiAlN kaplama..	37
Şekil 6. 3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) .....	38
Şekil 6. 4. X-Işını Kırınım Cihazı (XRD) .....	39
Şekil 6. 5. Mikro-Sertlik Cihazı .....	39
Şekil 6. 6. Tribometre Cihazı .....	41
Şekil 6. 7. Yüzey Profilometre Cihazı.....	41
Şekil 7. 1. SEM/EDX analizi ile elde edilen element bileşimleri; a) kaplamasız b)TiAlCN, c) AlCrN, d) tek katlı TiAlN ve e) çok katlı TiAlN kaplama .....	43
Şekil 7. 2. SEM kaplama kalınlığı ölçümü; a) TiAlCN, b) AlCrN, c) tek katlı TiAlN ve d) çok katlı TiAlN kaplama.....	44
Şekil 7. 3. Numunelere ait XRD grafikleri; a) tek katlı TiAlN, b) çok katlı TiAlN, c) AlCrN, d) TiAlCN, ve e) dökme demir.....	45
Şekil 7. 4. Numunelerin sertlik değerleri .....	46
Şekil 7. 5. Çelik substrat, plazma nitrürlü çelik, TiN, tek ve çok katlı TiAlN kaplamalarının sertlik değerleri .....	46
Şekil 7. 6. Numunelerin sürtünme katsayısı grafikleri .....	48
Şekil 7. 7. Numunelerin aşınma oranları .....	49
Şekil 7. 8. Aşınma izlerinin SEM görüntüleri; a) Kaplamasız, b) TiAlCN, c) AlCrN d) Tek katlı TiAlN ve e) Çok katlı TiAlN .....	50
Şekil 7. 9. Kaplamasız numunenin aşınan bölgesinden alınan a) SEM görüntüsü ve EDX analizi b) EDX haritası.....	52
Şekil 7. 10.TiAlCN kaplı numunenin aşınma bölgesinden alınan a) SEM görüntüsü ve EDX analizi b) EDX haritası.....	53
Şekil 7. 11. AlCrN kaplı numunenin aşınma bölgesinden alınan a) SEM görüntüsü ve EDX analizi b) EDX haritası.....	54
Şekil 7. 12. Tek katlı TiAlN kaplı numunenin aşınma bölgesinden alınan a) SEM görüntüsü ve EDX analizi b) EDX haritası.....	56
Şekil 7. 13. Çok katlı TiAlN kaplı numunenin aşınma bölgesinden alınan a) SEM görüntüsü ve EDX analizi b) EDX haritası.....	57

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 4. 1. PVD tekniğinin sınıflandırılması .....	19
Tablo 4. 2. TiN kaplama özellikleri .....	23
Tablo 4. 3. TiAlN kaplama özellikleri .....	24
Tablo 4. 4. TiCN kaplama özellikleri .....	25
Tablo 4. 5. TiAlCN Kaplamasının özellikleri .....	26
Tablo 4. 6. CrN kaplama özellikleri .....	26
Tablo 4. 7. Çalışmalarda motor elemanlarına uygulanan çeşitli PVD kaplamalar .....	29
Tablo 6. 1. Dökme demir taban malzemenin kimyasal kompozisyonu .....	35
Tablo 6. 2. Kaplama parametreleri .....	37
Tablo 6. 3. Aşınma testi parametreleri .....	40

# 1.GİRİŞ

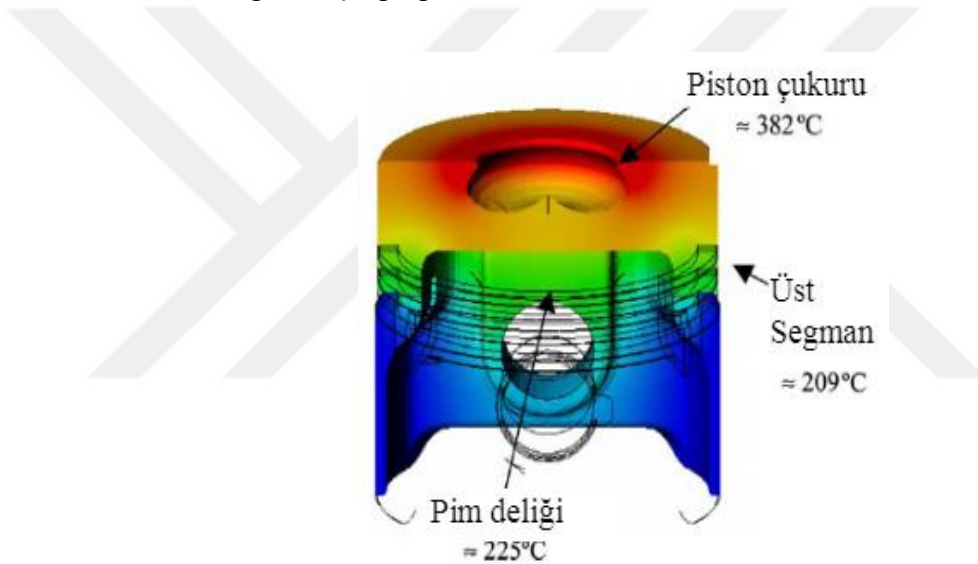
## 1.1. Çalışmanın Konusu ve Amaç

Günümüzde dünyadaki tüm ülkeler ciddi enerji krizi ve çevre kirliliği ile karşı karşıyadır. Bir sanayi ülkesinde, toplam enerjinin önemli bir kısmı ulaşım için harcanmaktadır. 2015 yılının verilerine göre ülkemizin toplam enerji tüketiminin yaklaşık %25'i ulaştırma sektörüne ait olduğu belirlenmiştir (Anonim, 2017). Bu nedenle taşıtlar, enerji tasarrufu ve emisyon azaltımı için önemli bir hedef haline gelmiştir. Taşıtların ana güç kaynağı olan içten yanmalı motorlar, yüksek sıcaklık ve basınç altında birbiri üzerinde sürtünerek hareket eden parçalardan oluşmaktadır. Bu parçalar zamanla aşınarak motor performansını etkilemekte; enerji kaybı, yakıt tüketimi ve emisyon da artışa neden olmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar, motordaki sürtünme ve aşınmaları azaltmak, çevreyi kirletmeden maksimum verimlilik elde etmek için özellikle bazı motor elemanlarında alternatif çözümler üretmeye çalışmışlardır. Bunların başında sürtünmeleri en aza indirmek amacıyla yüzey kaplama işlemi gelmektedir (Fu vd., 2014; Mehran vd., 2018).

İçten yanmalı motorlarda sürtünme kayıpları motor performans kayıplarının en büyük nedenidir. Sürtünme kayıpları motor ömrünü ve yakıt ekonomisini olumsuz etkilemektedir. Piston segmanlarından kaynaklanan sürtünme kaybı, bir motordaki toplam mekanik sürtünme kaybının yaklaşık %45-50'sini oluşturmaktadır (Dolatabadia vd., 2020; Erbiç, 2015; Lin vd., 2016). Piston segmanları, içten yanmalı motorların yanma odalarında bulunur ve silindir yüzeyleri ile temas halinde çalışırlar. Temel görevleri piston ile silindir arasında sızdırmazlığı sağlamaktır. Segmanlar, yüksek sıcaklık ve ağır yük koşulları altında çalıştılarından, silindir içinde hareket ettikçe sürtünmeye ve aşınmaya karşı oldukça hasastırlar (Grabon vd., 2013; Wan vd., 2017). Motorda segman aşınması halinde yanma gazları kartere ulaşarak yağ ile karışır ya da yağlayıcı madde yanma odasına geçebilir. Bu durumda motor yağı yakarak emisyon artışına ve yakıt tüketimine neden olmaktadır. Ayrıca seyrelen yağ viskozitesini kaybeder ve bu da motordaki diğer parçaların hızlı aşınmasına ve yıpranmasına sebep olur (Vinoth vd., 2019). Dolayısıyla segman aşınması maddi kayıplara, arızalara ve zararlı egzoz gazı salınımlarına neden olarak bir çok istenmeyen problemi oluşturacaktır (Mohamed, 2018). Bu sorunların üstesinden gelmek için düşük sürtünme ile etkin bir sızdırmazlık sağlanması gerekmektedir. Çalışma koşulları da göz önüne alınarak piston segmanlarının yüzey iyileştirmesinde

yüksek ısı dirençli, düşük sürtünme katsayılı ve yüksek sertlikte kaplamalar tercih edilmelidir (Dolatabadia vd., 2020; Vinoth vd., 2019).

Yüzey kaplama, motor bileşenlerinin özelliklerini iyileştirmek için en etkili seçenektir. Çünkü kaplamalar, metal ile korozif ortam arasında bir bariyer sağlayarak taban malzemenin yüzeyini korumaktadır. Öte yandan motorun çalışması sırasında bölgesel olarak farklı sıcaklıklar oluşmaktadır. Bu yüzden de motor içindeki ısı dağılımlarının bilinmesi, uygulanması planlanan kaplamanın kullanılacağı parçalarda daha iyi servis koşullarının belirlenmesini sağlayacaktır (Okay vd., 2012). Silva'nın yapmış olduğu çalışmada pistonda ki termal dağılımlar bilgisayar destekli tasarım modeli ile gösterilmiştir (Şekil 1.1). Burada tepe segmanı alanında yaklaşık 209°C civarında sıcaklığın oluştuğu gösterilmektedir.



Şekil 1. 1. Bir pistonda termal dağılımların gösterilmesi (Silva, 2006)

Piston segmanlarının yüzeyleri genellikle endüstride elektrokimyasal yöntem ile sert krom kaplanmaktadır. Ancak bu yöntemde kullanılan zararlı kimyasallar insan sağlığı ve çevre için tehdit oluşturmaktadır. Çevreye ve insan sağlığına zararlarından dolayı getirilen yasal kısıtlamalar, sert krom kaplamaya alternatif olabilecek yeni yöntem ve kaplamaların araştırılmasına yol açmıştır (Bozyazı vd., 2004; Vernhes vd., 2013).

Seramik malzemeler metallere göre daha yüksek termal dayanım ve ısı yalıtım özelliklerine sahiptir. Metalik malzemeler yüksek sıcaklık gibi çalışma ortamlarında korozyona uğradıkları için ham halleri ile kullanılmak istenmezler (Buyukkaya vd., 2007). Bu sebeple metalik malzemeler seramik kaplamalar ile kaplanarak,

malzemenin özellikleri iyileştirilir ve istenilen çalışma koşullarına uygun hale getirilmesi sağlanır. Seramik kaplama uygulamalarında ki artış, bu kaplamaların üç önemli özelliğinden kaynaklanmaktadır. Bunlar; düşük ısı iletkenliği, aşınma ve korozyon direncidir (Tuğcu vd., 2001). Düşük ısı iletkenliği, bir yapıdaki sıcaklık dağılımını ve ısı akışını kontrol etmek için kullanılmaktadır (Buyukkaya vd., 2007). Aşınma ve korozyon direnci, yüksek sıcaklık ve kuvvete maruz kalan parçaların dayanıklılığını arttırmak için kullanılmaktadır. Araştırmalar motorun yanma odası parçalarının seramik kaplamalar ile kaplanması sonucunda ısı kayıplarının azaldığını, daha yüksek güç üretiminin sağlandığını ve yakıt tüketiminin azaltılabildiğini göstermektedir (Hazar vd., 2007; Taymaz vd., 2005).

PVD tekniği ile seramik kaplama vakum altında kapalı bir ortamda yapılmaktadır. Dolayısıyla çevreye ve insan sağlığına tehdit oluşturmamaktadır (Guo vd., 2020). Bu teknik ile düşük sürtünme katsayısı, yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci, yüksek ısıl dirençli ve uygulanması kolay seramik kaplamalar yapılabilmektedir. Yani, motorun yanma odası parçalarının kaplanmasında aranan özelliklere sahip kaplamalar bu teknikle üretilebilmektedir (Çakır, 2007). Ayrıca PVD teknolojisi, farklı kompozisyonlarda malzemelerin kaplanabilmesi, çok katlı kaplamaların yapılabilmesi, kaplama parametrelerinin kontrol edilebilmesi, altlık malzemeyi deforme etmeden düşük sıcaklıklarda (250-450°C) kaplamaların uygulanabiliyor olması gibi avantajlarından dolayı tercih edilmektedir (Dobrzanski vd., 2006; Paldey vd., 2003).

Bu çalışmada, içten yanmalı motorlarda enerji kaybının önemli bir kısmına neden olan dökme demir tepe segmanlarının farklı seramik kaplamalar ile yüzey iyileştirmesinin gerçekleştirilmesi ve uygulanan kaplamaların aşınma davranışlarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle, sanayiden temin edilen tepe segmanlarının yüzeyleri katodik ark PVD metoduyla farklı seramik malzemeler (TiAlCN, AlCrN ve TiAlN) kullanılarak kaplanacaktır. Yapılan çalışmada kaplama kalınlığının aşınma özelliklerine etkisini irdelemek amacıyla tek ve çok katlı TiAlN kaplanmış numuneler hazırlanacaktır. Yapılan aşınma testleri sonrasında yüzey morfolojisi incelenen numunelerin aşınma mekanizmaları araştırılacaktır.



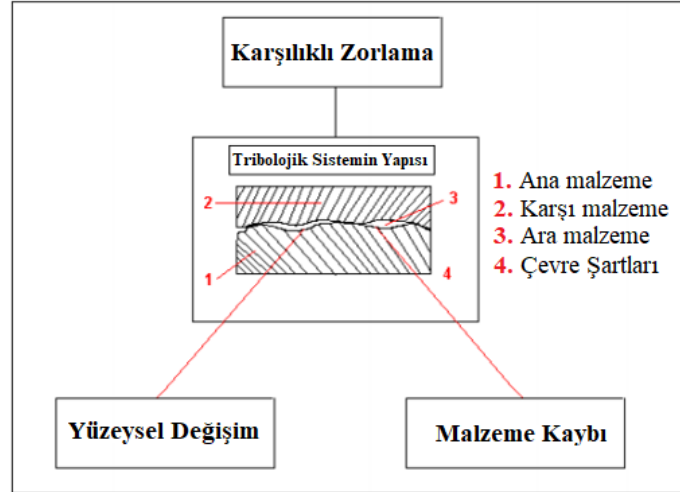
## 2. TRİBOLOJİK SİSTEM, SÜRTÜNME VE AŞINMA

### 2.1. Tribolojik Sistem

Triboloji; karşılıklı etkileşim halinde olan ve birbirine göre izafi hareket eden yüzeyler arasındaki sürtünme, aşınma ve yağlama mekanizmalarını ele alan ve bunlarla ilgili fiziksel olayları inceleyen bilim ve teknoloji dalıdır. Tribolojik sistem, bu parametrelerin birlikte incelendiği sisteme verilen addır. Triboloji biliminin asıl amacı, izafi hareket halinde olan yüzeylerin ekonomik, ekolojik ve fonksiyonel optimizasyonunu sağlamaktır (Aydın, 2015).

Triboloji alanındaki çalışmalar genellikle üç sınıfa ayrılır. Bu çalışmalar çoğunlukla malzemelerin aşınma oranlarının ve sürtünme katsayılarının tespit edilmesi, sürtünme ve aşınmaya etki eden olağan mekanizmaların bulunması (atmosfer, yük miktarı, hız, vb.), sürtünmeyi ve aşınmayı azaltacak kaplamaların veya yağların bulunması gibi noktaları ele alır.

Tribolojik sistemi oluşturan bileşenler; karşılıklı etkileşim halinde olan ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran) ve ara malzeme (yağ) gibi elemanlardan meydana gelmektedir. Şekil 2.1’de tribolojik sistemdeki bileşenler şematik olarak gösterilmektedir (Ergüler, 2005).



Şekil 2. 1. Tribolojik sistemdeki bileşenlerin şematik olarak gösterimi (Ergüler, 2005)

#### 2.1.1. Motor Sürtünmesinin Önemi

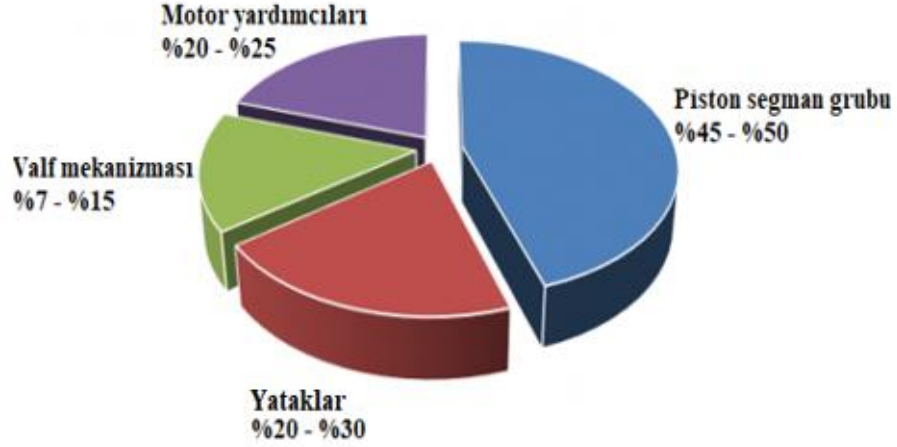
Sürtünme, birbiriyle temas halinde bulunan ve birbirine göre izafi hareket eden ya da yapmaya meyilli olan iki katı yüzeyin harekete karşı koydukları direnç olarak tanımlanır (Şafak, 2008). Bir motorun sürtünme üreten birçok hareketli

parçası vardır. Sürtünme motor sistemlerinde enerji kaybına neden olan önemli bir faktördür ve enerji verimliliğini sürdürmek için azaltılması gerekmektedir (Kara, 2019).

Motordaki sürtünme kayıplarının önemli bir kısmını mekanik sürtünme oluşturmaktadır (Meta, 2012). Mekanik sürtünme, piston segman grubu, valf sistemi, yatak sistemi ve motor yardımcıları (yakıt pompası, yağ pompası gibi) gibi hareketli parçaların nispi hareketinin neden olduğu sürtünmeyi içermektedir (Comfort, 2003). Motordaki toplam mekanik kayıpların dağılımı Şekil 2.2’de gösterilmektedir (Erbiç, 2015).

Sürtünmeden kaynaklanan mekanik kayıpların yaklaşık %45-%50’si piston segman grubunda meydana gelmektedir. Segmanlar piston-silindir yüzeyleri ile temas halinde çalıştıklarından dolayı motorda en önemli sürtünme parçaları olarak kabul edilmektedir (Ebrinç, 2015; Xu vd., 2019). Piston segmanları çoğu zaman yüksek yükler altında yetersiz yağlama sonucunda metal-metal temasına maruz kalır. Yağ filminin en zayıf kaldığı nokta pistonun tepe noktasıdır. Bu nedenle de en üstte yer alan tepe segmanı aşınması diğer segmanlara göre daha fazladır (Ebrinç, 2015; Priest, 2000).

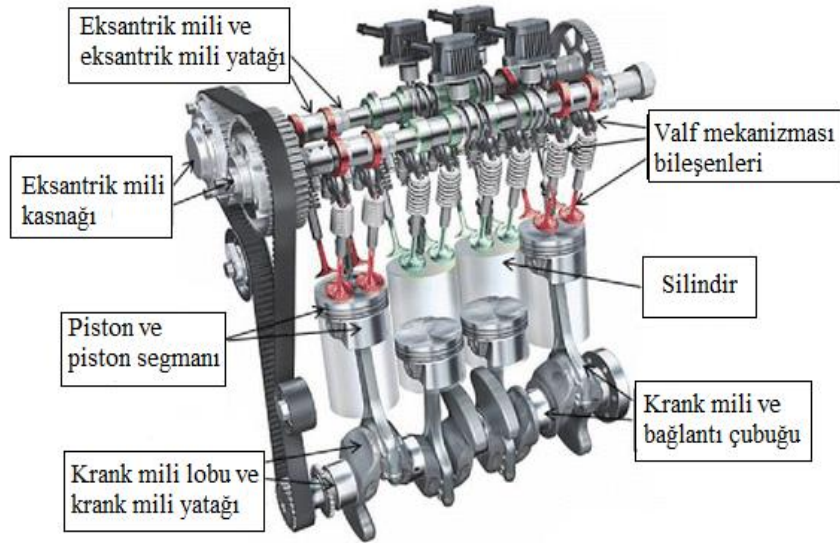
Motor sürtünmesinden kaynaklanan mekanik kayıplar, yakıt tüketimi, motor performansı ve emisyonlar gibi birçok motor parametresinde etkilidir. Sürtünmeyi azaltarak daha verimli bir yanma ile motorun performansı artarken, yakıt tüketimi ve emisyonlar da azalmaktadır. Bunun yanı sıra, düşük sürtünme nedeniyle daha az aşınma, motor bileşenlerinin servis ömrü, dayanıklılığı uzayacak ve iyileştirilecektir (Erbiç, 2015).



Şekil 2. 2. Motordaki toplam mekanik kayıpların dağılımı (Erbiç, 2015)

### 2.1.2. Motor Aşınmasının Önemi

Emisyon mevzuatının kısıtlamaları ve daha yüksek güç talepleri nedeniyle, bir motorun bileşenlerinin dayanıklılığı ve güvenilirliği kesinlikle gereklidir. Motor sistemi içerisinde temas halinde birbiri üzerinde kayan bileşenlerin neden olduğu sürtünme ve aşınmalar motorun ömrünü etkilemektedir. Bu sistemdeki maddi kayıpların ve arızaların ana nedeni aşınmadır. Yüksek yanma basınçları ve motor sürtünmesinin bir sonucu olarak, motor parçalarında aşınmalar gözlenmektedir (Erbiç, 2015; Kara, 2019). Motor aşınması, yuvarlanma, kayma ve tekrarlanan darbe koşulları altında gerçekleşen mekanik işlemlerden dolayı yüzeyden malzemenin ayrılması olarak tanımlanabilir. Şekil 2.3'de motorda aşınmanın meydana gelebileceği bileşenler gösterilmektedir.



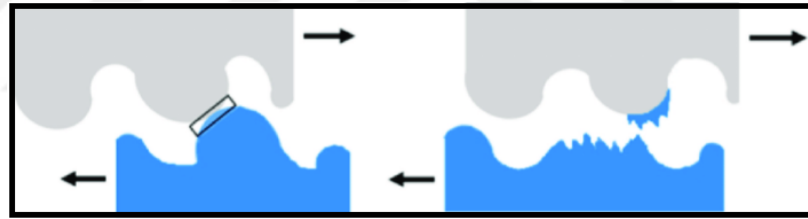
Şekil 2. 3. Bir motorun aşınmadan etkilenen bileşenleri (Mehran vd., 2018)

## 2.1.2.1 Aşınma Mekanizmaları

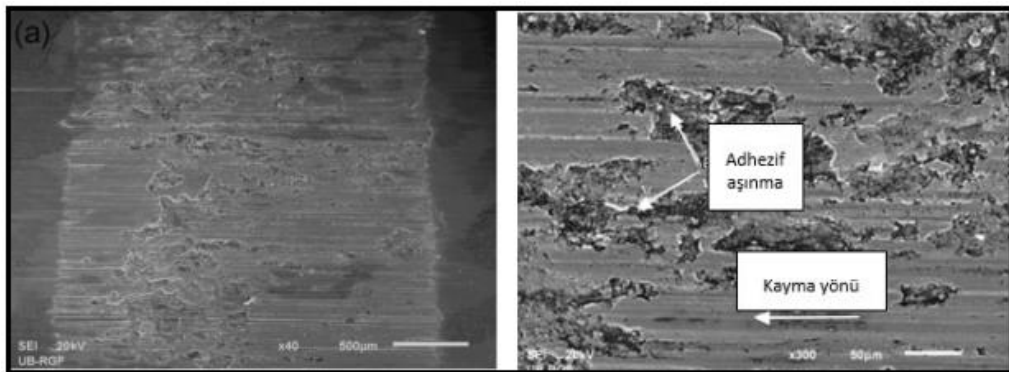
### 2.1.2.1.1 Adhesif Aşınma

Yapışma aşınması olarak da bilinen adhesif aşınma, birbirini üzerinde kayan iki metal yüzey arasındaki pürüzlerin veya mikroskobik tepe noktalarının birbirine yapışmasından kaynaklanır. Kayma esnasında, birbirine yapışmış yüzeydeki pürüzlerin kırılması veya kopması sonucu ortaya çıkar. Pürüzlerin kayma yolu ile kopması sonucunda oluşan parçalar her iki yüzeye ya da bir yüzeye yapışabilir. Kayma devam ettikçe yeni pürüzler koparak yüzeye yapışmaya devam eder. Bu malzeme transfer işlemi devam ettikçe iki yüzey arasında aşınma ürünleri (aşındırıcı partiküller) oluşur ve aşınmanın artmasına neden olurlar (Kurgun, 2014). Oluşan aşınma ürünleri nedeniyle yüzeyler birbirini ile temas etmekte zorlanır ve adhezyon olayı ortadan kalkarak abrasif aşınma oluşur (Boynueyri, 2019).

Adhesif aşınma, metallere arasındaki yağlamanın çok iyi yapılması, sistemin aşırı ısınmasının engellenmesi, yüzey topografyasının iyileştirilmesi, yüzeye etki eden yükün azaltılması ve sertliğin artırılması ile azaltılabilir (Bozkurt, 2006).



Şekil 2. 4. Adhesif aşınma (Sharma, 2019)



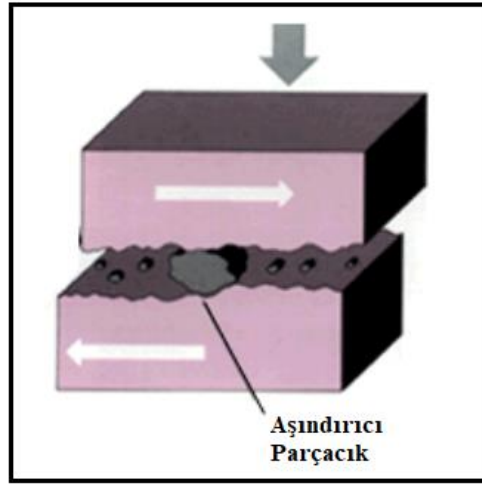
Şekil 2. 5. Adhesif aşınma SEM görüntüleri (Demirtaş, 2017)

### 2.1.2.1.2 Abrasif Aşınma

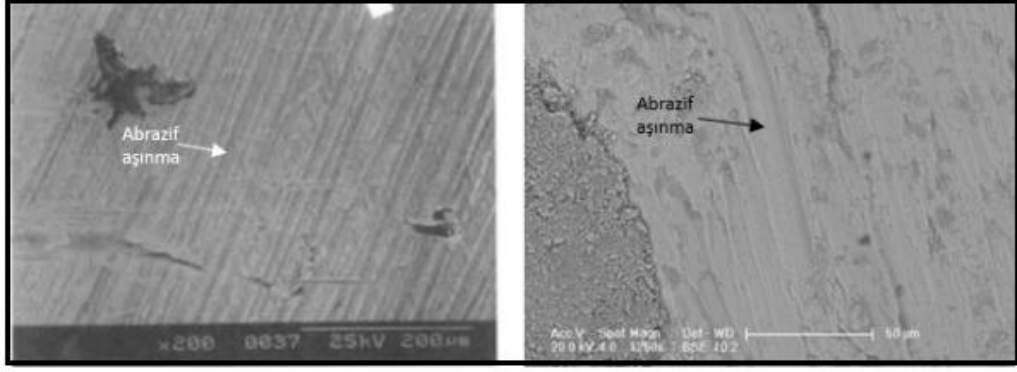
Yırtılma ya da çizilme aşınması olarak da adlandırılmaktadır. Abrasif aşınma, sert partikül veya sert pürüzlerin katı bir yüzeye bastırılıp, katı yüzey boyunca

hareket ettirilmesiyle oluşan aşınma olarak tanımlanmaktadır (Kurgun, 2014). Sert partiküller ya sisteme dışarıdan girer ya da adhesif aşınma ürünleri olarak sistem içerisinde oluşmaktadır. Abrasif aşınma altındaki yüzey, kayma yönü ile paralel çizgilere sahiptir. Bunlar derin olmayan çizikler veya büyük oyuklar şeklinde olabilir (Müjdeci, 2003 ; Teber, 2015).

Abrasif aşınmayı azaltmak için, aşınmaya neden olan partiküllerin sistem içerisine girmesini engelleyecek şekilde sızdırmazlık sağlanması ve sık sık yüzeylerin temizlenmesi gerekmektedir. Abrasif aşınma malzemenin sertliğiyle doğrudan ilişkili olduğundan, azaltılması için sertlikten faydalanılmaktadır. Bu sebeple abrasif aşınmayı engellemeye yönelik olarak sert malzeme tercih edilmeli veya yüzeylerin sertliği, alev püskürtme, ısı işlem, elektro-kaplama, nitrasyon, CVD, PVD gibi yüzey kaplama teknikleriyle artırılmalıdır. Malzemenin tamamının değiştirilmesi yerine yüzey kaplama yapılması günümüzde gittikçe yaygınlaşmaktadır. Aşınmaya karşı dayanıklı fakat pahalı malzeme almak yerine, yüzeye yapılan ince kaplamalar ekonomik bir çözüm olarak kullanılmaktadır (Şafak, 2008).



Şekil 2. 6. Abrasif aşınma (Şafak, 2008)

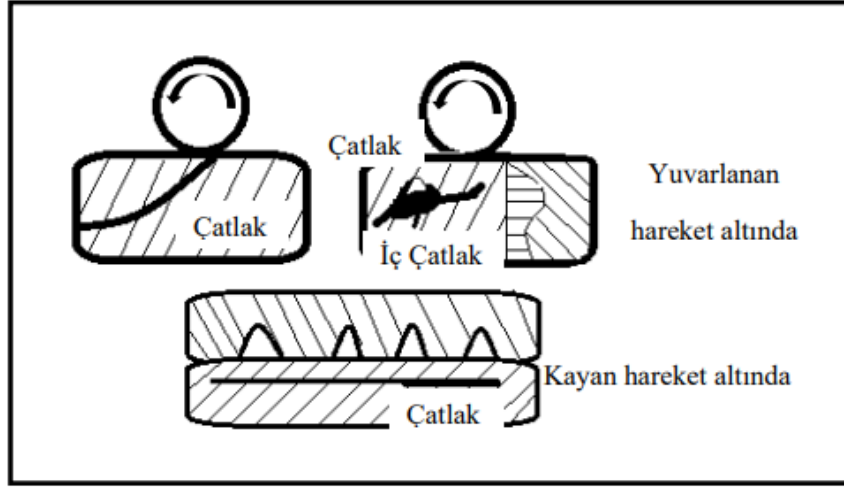


Şekil 2. 7. Abrasif aşınma SEM görüntüleri (Demirtaş, 2017)

### 2.1.2.1.3 Yorulma Aşınması

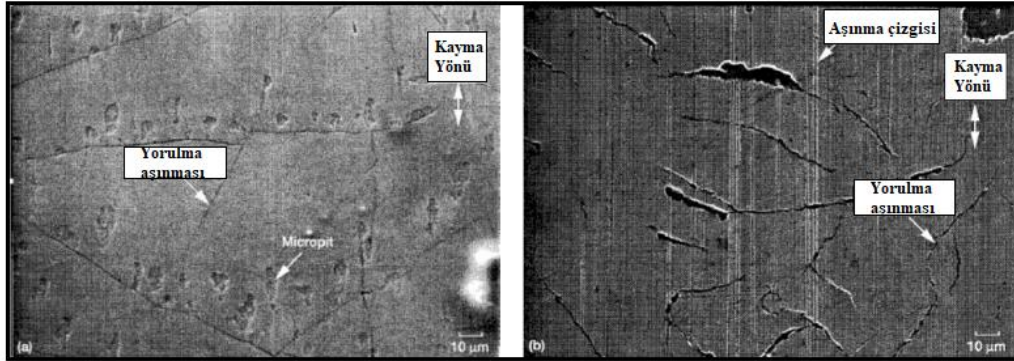
Makine elemanlarında tekrar eden yüklerden ya da titreşimlerden dolayı oluşan aşınma hasarı, yorulma aşınması olarak adlandırılır. Periyodik olarak sürekli yük altında temas halinde bulunan iki yüzey arasında sadece adhesif aşınma oluşmaz, yorulma aşınması da oluşabilir (Boynueyri, 2019; Demirtaş,2017). Ancak yorulma aşınması sonucu meydana gelen partikül boyutları adhesif aşınma sonucu oluşan partikül boyutlarından daha büyüktür. Bunların çapları, 100-1000 $\mu$  aralığında değişmektedir (Müjdeci, 2003). Dolayısıyla ciddi malzeme hasarına neden olmaktadır.

Tribolojik zorlanmalar genellikle yüzeyde gözlenen, büyüklüğü konuma ve zamana göre değişen mekanik gerilmeler sonucu oluşmasından dolayı, birçok aşınma prosesinde yorulma aşınmasına rastlanılmaktadır. Neticede, malzeme yüzeyinde çatlak oluşumuyla başlayan süreç, çukur ve oyukların oluşmasıyla devam ederek yüzeyden parçaların ayrılmasıyla hasara sebep olur. Yorulma aşınması özellikle yuvarlama hareketi ile çalışan parçaların yüzeylerinde meydana gelmektedir (Boynueyri, 2019; Teber, 2015). Şekil 2.8’de yorulma aşınmasına bağlı oluşan çatlak gösterilmiştir.



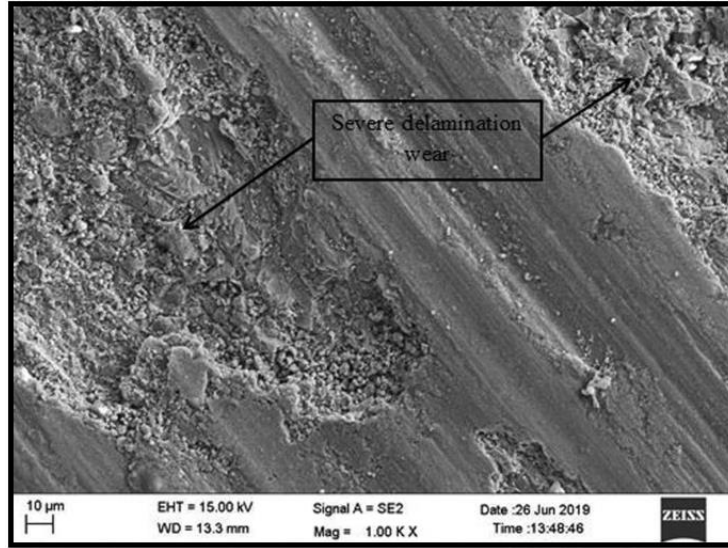
Şekil 2. 8. Yuvarlanma ve kayma hareketi altında yorulmaya bağlı meydana gelen çatlak (Boynueyri, 2019)

Şekil 2.9’da malzemenin yüzeyinde yorulma çizgileri oldukça belirgindir ve çıktıkları noktalar yorulma başlangıcını göstermektedir. Yorulma çizgileri, yüzeyde kopmalar başladıktan sonra çok net olmayabilir (Demirtaş, 2017; Müjdecı, 2003).



Şekil 2. 9. Yorulma aşınması SEM görüntüleri (Demirtaş, 2017)

Delaminasyon aşınması ise, temas halinde bulunan yüzeylerin kayma hareketi sonucunda yüzeylerde mikroskobik ölçekte oluşan bir tür yorulma aşınmasıdır. Temas alanında oluşan basınç sonucunda yüzeyin hemen altında çatlak meydana gelir. Yükün daha da artması çatlakın deformasyonuna, yayılmasına ve başka çatlaklar ile birleşmesine sebep olur. Çatlakın yayılması yüzeye paralel olarak gerçekleşir. Sonuç olarak plaka şeklinde yüzeyden kopmalar oluşur (Teber, 2015).



Şekil 2. 10. Ciddi delaminasyon aşınması SEM görüntüsü (Dhokey vd., 2020)

Yorulma aşınmasını önlemenin ana yolu temas yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısının azaltılmasıdır. Ayrıca yüzeyler arasında kullanılan yağın etkisi de oldukça önemlidir. Yüksek basınçla birlikte, yağın yüzey üzerindeki çatlaklara girmesi, çatlakların büyümesinde önemli bir role sahiptir. Bu aşınma türünün önlenmesinde de yine yüzey sertleştirme işlemleri uygulanmalıdır (Şafak, 2008).

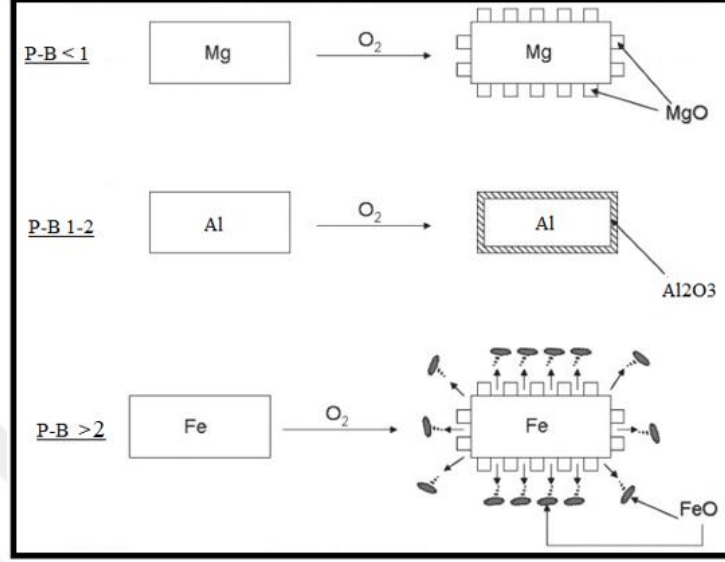
#### 2.1.2.1.4 Korozyon Aşınması

Korozyon aşınması, malzemenin bulunduğu ortam (katı, sıvı veya gaz) ile kimyasal olarak reaksiyona girmesi sonucu oluşan aşınma olayıdır. Özellikle metal malzemeler korozyonun birçok çeşidine maruz kalarak aşınırlar. Korozyon aşınmasının en yaygın görüleni oksitlenmedir. Metaller, içerdikleri alaşım elementlerinin çeşidine ve miktarına göre oksijenle reaksiyona girerek yüzeylerinde oksit tabakası oluştururlar. Bu oksit tabakası koruyucu ve koruyucu olmayan oksit tabaka şeklinde sınıflandırılır (Temir, 2013; Uyaroğlu, 2008)..

Pilling Bedworth (P-B) oranı, yüzeyde oluşan oksit tabakanın koruyucu olup olmadığını tespit eden basit bir yöntemdir. P-B oranı metal oksitinin hacminin, aynı metalin saf halinin hacmine bölünmesiyle belirlenmektedir ( $V_{\text{oksit}}/V_{\text{metal}}$ ). P-B oranı 1'den küçük bulunursa oksitin metalden daha az yer kapladığı, gözenekli olduğu ve substratı koruyamadığı belirlenir. Eğer bulunan değer 2'den büyük ise oksitin metalden daha fazla yer kapladığı, yüzeyden koparak ayrılacağı bu sebeple de koruyucu olmadığından dolayı yine istenilen bir durum değildir. P-B oranı 1-2 aralığında bulunduğu ise oksitin hacmi metalin hacmiyle yakın olduğu, yüzeyde



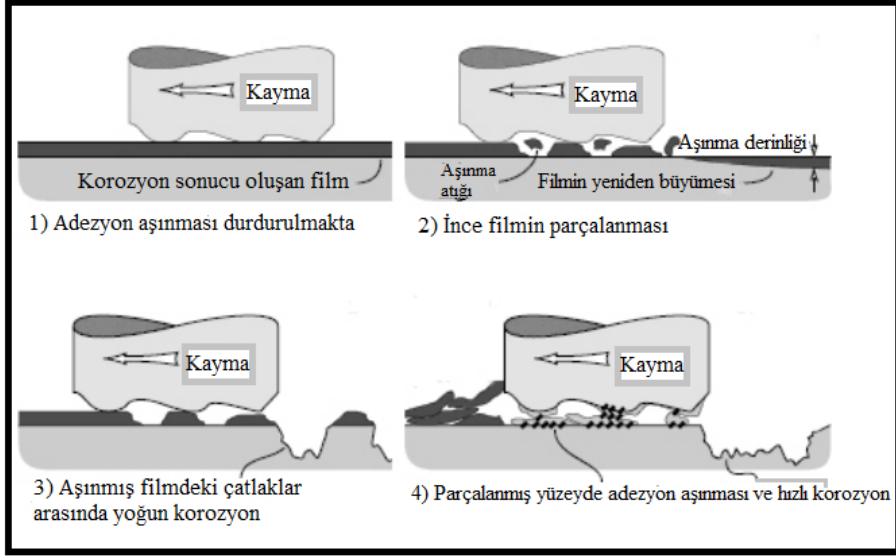
oluşan oksit filminin substrata yapıştığı, gözeneksiz ve koruyucu özellik gösterdiği belirlenir (Tekin, 2016). Şekil 2.11’ de magnezyum (Mg), alüminyum (Al) ve demir (Fe) üzerinde gerçekleşen oksit tabakası çeşitleri verilmiştir.



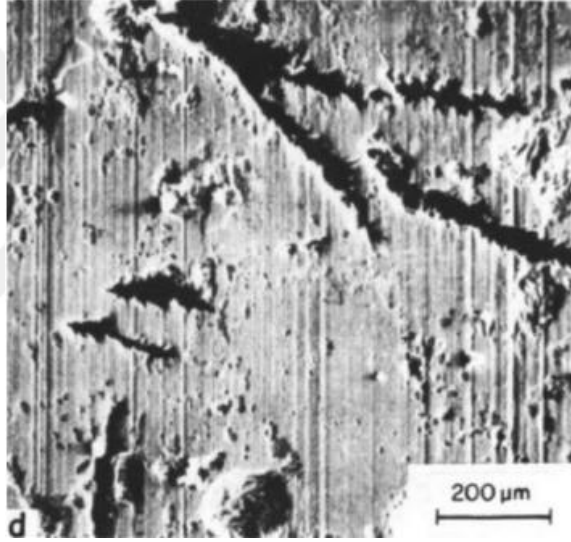
Şekil 2. 11. Mg, Al ve Fe üzerinde gerçekleşen oksit tabakası çeşitleri (Garcia vd., 2011)

Bir metalin korozyona karşı direnci; hızlı okside olmasına, oluşan oksitin taban malzemeye güçlü yapışmasına, oksit tabakasının yoğunluğuna ve koruyucu olup olmamasına bağlıdır (Tekin, 2016).

Aşındırıcı bir ortam da metal yüzeylere uygulanan tekrarlı yükler sırasında yüzeyden malzeme ile beraber oksit tabakası da ayrılmaktadır. Tekrarlı yüklerin sıklığından dolayı koruyucu tabakayı oluşturan elementin zamanla bitmesi oksit tabakasının yeniden şekillenemez duruma gelmesine yol açar. Böylece metal yüzeyi korozyon ortamında savunmasız kalır ve malzemede ciddi deformasyonlar görülür (Temir, 2013). Şekil 2.12’de korozyon aşınmasının gelişimi gösterilmiştir.



Şekil 2. 12. Korozyon aşınmasının gelişimi (Şafak, 2008)

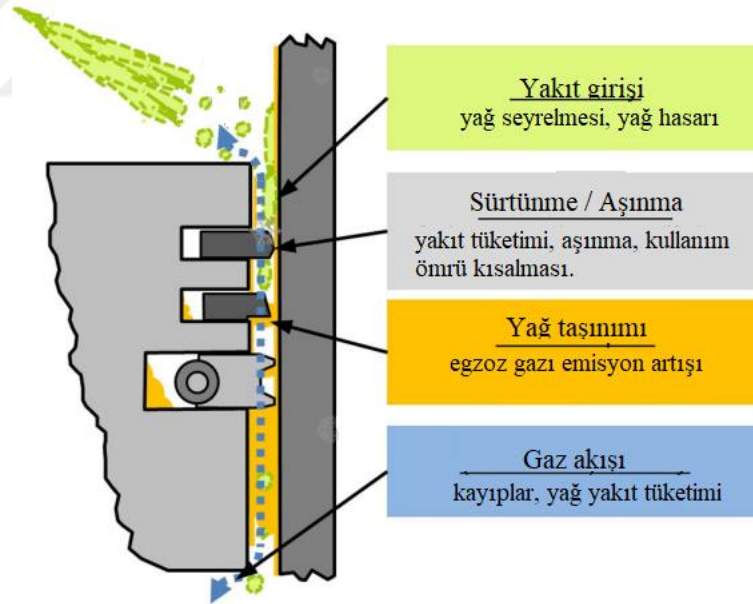


Şekil 2. 13. Korozyon aşınması SEM görüntüsü (Demirtaş, 2017)

### 3. SEGMANLARIN GENEL ÖZELLİKLERİ

Segmanlar, piston başında bulunan, piston ile silindir arasında sızdırmazlığı sağlayan halka şeklindeki esnek parçalardır. Piston segmanları olarak da adlandırılan bu parçalar içten yanmalı motorun kalbi gibidir. Piston segmanlarının, motordaki güç kaybı, yakıt tüketimi, yağ tüketimini ve emisyonlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu kabul edilmektedir (Priest, 2000).

Piston üzerine monte edilmiş üç veya daha fazla halkanın toplu adı olan, piston segman grubunun temel görevi yanma odası ve karter arasında etkili bir gaz sızdırmazlığı sağlamaktır. Etkili sızdırmazlık sağlanamaz ise ateşleme anında oluşan yanma gazları kartere kaçar, motor yeterli gücü üretemez, yakıt tüketimi artar (Priest vd., 1999). Diğer bir görevi ise yağın yanma odasına girmesini engellemek ve yağ miktarını sınırlamaktır. Yağın yanma odasına çıkması durumunda motor yağı yakarak egzoz gazı emisyonlarında artışa neden olur (Meta, 2012; Priest vd., 1999). Şekil 3.1’de piston segmanı ile silindir arasında meydana gelen olaylar ve etkileri şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3. 1. Piston segman grubu alanında meydana gelen olaylar (yeşil, yakıt; sarı, yağlama yağı; mavi, gaz akışı) (Wigger vd., 2016)

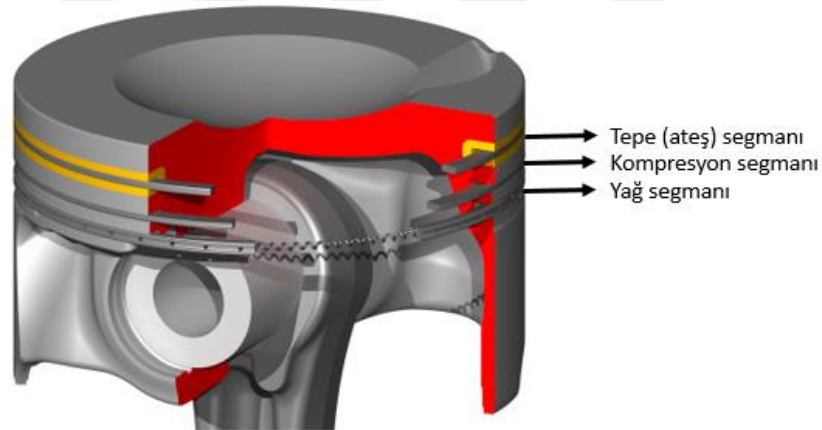
#### 3.1. Segman Çeşitleri

İçten yanmalı motorların pistonlarında tepe segmanı (ateş segmanı), kompresyon segmanı ve yağ segmanı olmak üzere genellikle 3 adet segman bulunmaktadır. Bu segmanların her birinin motorun çalışması sırasında belirli bir rolü vardır.

**Tepe segmanı,** yüksek sıcaklık ve basınca maruz kaldığı için ateş segmanı olarak da adlandırılmaktadır. Yanma odasında oluşan yüksek basınçlı yanma gazlarının kartere geçişini engeller. Piston başındaki ilk sızdırmazlık elemanıdır (Ferreira vd., 2020). Tepe segmanı yanma odasına yakınlığından ve taşınan yağ miktarının düşük olması nedeniyle diğer segmanlara göre daha fazla aşınır (Becker, 2004; Müjdecı, 2003; Yeşilada, 1997).

**Kompresyon segmanı,** hem sızdırmazlık hemde fazla yağın sıyrılmasını sağlamaktadır. Tepe segmanının etkinliğini arttırmakta yardımcı olur (Ferreira vd., 2020).

**Yağ segmanı,** yağlama için gereken miktarda yağın piston ile silindir duvarı arasından geçmesine izin verir. Silindir yüzeylerinde biriken fazla yağı sıyrarak yüzeyde ince bir yağ filmi oluşmasını sağlar, yağın yanma odasına geçişini engelleyerek fazla yağın pistondaki deliklerden kartere dönüşünü gerçekleştirir (Kurgun, 2014; Yeşilada, 1997).



Şekil 3. 2. Piston segman çeşitleri (Olivia vd., 2016)

### 3.2. Segman Malzemeleri ve Kaplanması

Piston segmanları genellikle dökme demir ya da çelikten üretilmektedir. Çelik, motorda meydana gelen yüksek sıcaklık ve basınca karşı dayanıklılık göstererek uzun bir süre esnekliğini kaybetmeden çalışabilir (Kurgun, 2014). Ancak yoğunluğunun fazla olması ve pahalı olması önemli bir dezavantajı oluşturmaktadır. Bunun yerine genellikle dökme demir ve alüminyum alaşımlarından parçalar tasarlanarak daha hafif araçlar üretilmeye çalışılmaktadır (Mehran vd., 2018; Müjdecı, 2003). Dökme demirlerin çeliklere göre birçok avantajı vardır. Çeliklere

göre %20-40 oranında daha düşük üretim maliyetine, iyi titreşim sönümleme, yüksek korozyon ve aşınma direnci özelliklerine sahiptir (Alışır vd., 2020).

Dökme demirler %2'den daha fazla karbon içeriğine sahip demir-karbon alaşımlarıdır. Dökme demirlerin mekanik özelliklerini en çok etki eden element karbondur (Akgündüz, 2019; Kurgun 2014). Dökme demir veya çelik malzemedeki yapılmış segmanların üretimden hemen sonra ham halleri ile kullanılması mümkün değildir. Yüksek sıcaklık ve ortamda bulunan hava nedeniyle kolaylıkla okside olur. Oksit türevlerinin oluşumu ( $Fe_2O_3$  gibi) metallerin yüzeyinde bozulmaya, çatlak oluşumuna ve pürüzlülüğe neden olur (Blau, 2010). Pürüzlü olan yüzey, gerilme yoğunlaşmasının yüksek olduğu kısımları oluşturduğu gibi, sürtünme katsayısında artmasına neden olur. Bu sorunları çözmek ve motor ömrünü uzatmak amacıyla segman yüzeylerine kaplama yapılarak yüzey iyileştirilmesi yapılır.

Endüstride, piston segmanlarının yüzey özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak elektrokimyasal yöntem ile sert krom kaplama yapılmaktadır. Ancak bu yöntemde altı değerlikli krom içeren solüsyonlar kullanılmaktadır. Altı değerlikli kromun kanserojen madde olarak sınıflandırılmasının yanı sıra oluşan sulu atığın  $Cr^{+6}$  içermesi çevreye de zarar vermektedir (Bozyazı vd., 2004). Atıkların ortadan kaldırılması sırasında çok dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu da firma için ek üretim maliyeti demektir. Aynı zamanda çalışanın iş sağlığını korumak için ek önlemlerin alınması da gerekmektedir (Kapsız, 2011). Dolayısıyla çevreye ve insan sağlığına verdiği zararlar ile birlikte getirilen yasal sınırlamalar krom kaplamaya alternatif olabilecek yeni yöntem ve kaplamaların araştırılmasına neden olmuştur (Mehran vd., 2018).

Elektrokimyasal yöntemle kıyasla PVD tekniği çevre ve insan sağlığı üzerine herhangi bir tehdit oluşturmamaktadır. Gelişen teknoloji ile beraber daha yüksek verimliliğin elde edilebileceği PVD tekniği ile kromdan daha sert ve hafif kaplamalar üretilebilmektedir (Guo vd., 2020). Genellikle PVD tekniği ile segmanların kaplanması  $TiN$  ya da  $CrN$  kaplamalar tercih edilmektedir (Kurgun, 2014).

## 4. YÜZEY KAPLAMA TEKNİKLERİ

Yüzey, bir cismin bulunduğu ortamla temas eden kısmı, çevreyle oluşturduğu sınır olarak tanımlanabilir. Cismin ortamla oluşturduğu tüm etkileşimleri yüzey üzerinde gerçekleşmektedir. Malzeme yüzeyinin çalıştığı ortamda ömrünü uzatmak, performansını arttırmak ve daha dayanıklı yüzey özelliklerine ulaşmasını sağlamak için çeşitli yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Genellikle taban malzemeye uygulanan yüzey işlemleri aşağıdaki gibi özetlenebilir;

1. Kaplama (seramik kaplama, boya gibi)
2. Başka bir maddenin difüzyonu ve substrat elementleri ile bileşik oluşturma (nitürleme, karbürleme, borlama, karbonitürleme)
3. Taban malzemenin kendisinden kaynaklı oksit katmanlarının kalınlaştırarak ( alüminyumun, titanyumun anodizasyonu) veya farklı maddelerle reaksiyonunu sağlayarak daha dayanıklı hale getirilmesi (fosfatlama, kromlama gibi) (Bozkurt, 2006).

Her geçen gün teknolojinin de ilerlemesi ile birlikte malzemelerde aranan özellikler de değişmektedir (Teber, 2015). Örneğin motorda kullanılmak istenen dökme demir ya da çelikten üretilen bir parçanın üretiminden hemen sonra kullanımı mümkün değildir. Bu nedenle yalnızca yüzey kaplama işlemi uygulanarak kullanıma hazır hale getirilebilirler.

Yüzey kaplamaları, malzemelerin sahip olmadığı özellikleri kazandırmak ve farklı uygulama alanları oluşturmak amacıyla toplumun birçok alanında yüzyıllardır kullanılmaktadır. Malzemenin bulunduğu ortamla temasında istenilen özellikleri elde etmesi için birçok yüzey kaplama tekniği geliştirilmiştir. Bu teknikler, kaplanacak malzemenin fiziksel durumuna göre buhar fazdan, sıvı fazdan, ergimiş ya da yarı ergimiş fazdan olmak üzere üç kategoride sınıflandırılmaktadır. Yüzey kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4. 1. Kaplanacak malzemenin bulunduğu fiziksel duruma göre kaplamaların sınıflandırılması (Boynueyri, 2019)

#### 4.1. PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) Tekniği

PVD, vakum ortamında bulunan malzemelerin buharlaştırılarak ya da sıçratılarak atomların yüzeyden kopartılması ve kaplanacak olan altlık malzeme yüzeyine biriktirilmesi işlemidir (Soner, 2010). PVD tekniği ile sert nitrürler (TiN, AlCrN, AlTiN, CrN) ve karbonitrürler (TiCN) gibi aşınmaya dayanıklı ileri teknoloji seramikleri film şeklinde malzeme yüzeyine kaplanabilmektedir (Demirler vd., 2005).

PVD kaplama tekniği, 19. yüzyılda Michael Faraday tarafından keşfedilmiştir. Ancak yapılan kaplamaların kalitesinin düşük olması nedeniyle daha iyi vakum ekipmanı geliştirilinceye kadar yalnızca bilimsel bir merak olarak kalmıştır. İlk püskürtme kaplamaları, 19. yüzyılın ortalarında, floresan tüpler üzerinde yapılan bir çalışmada Grove tarafından tanımlanmış ve daha sonra, 1930'lara kadar aynaların yapımında kullanılmıştır (Bull, 2006). Sonraki yıllarda, vakum teknolojisinin geliştirilmesi ile birlikte PVD tekniği endüstriyel alanda kullanılmaya devam etmiştir (Soner, 2010). Günümüzde PVD tekniğinin uygulama alanları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Tribolojik uygulamalar: Kesici takımlar, kalıplar, kayma veya dönme hareketi yapan ve yüksek aşınma direncinin gerekli olduğu makine parçaları vb.
- Dekoratif amaçlı uygulamalar: Gözlük çerçeveleri, oyuncaklar, takılar, saatler vb.
- Optik uygulamalar: Kameraların optik elemanları, aynalar, projektör yansıtıcıları vb.

- Elektrik uygulamaları: Entegre devreler, güneş pilleri, kapasitörler, rezistörler vb.
- Kimyasal uygulamalar: Korozyona dirençli malzemeler, gaz türbin motorları, denizcilik uygulamaları (Akbal, 2014; Soner, 2010).

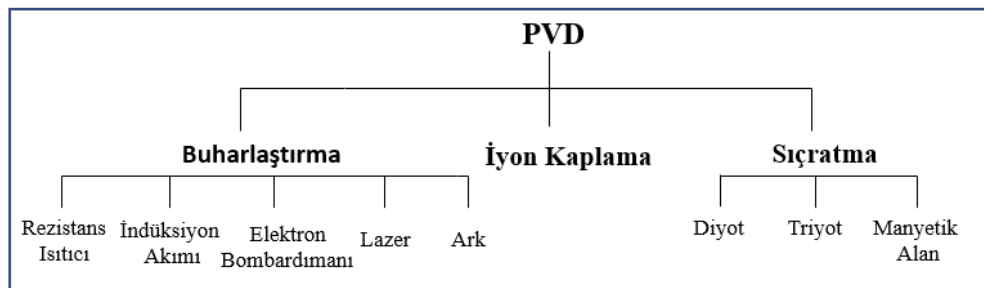
PVD tekniğinin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir ;

1. Taban malzemeye çok iyi yapışan kaplamalar üretilir.
2. Kaplamalar düşük sıcaklıklarda biriktirilir (500 °C'nin altında). Böylelikle taban malzemede herhangi bir deformasyon oluşmaz.
3. Sistemdeki döner mekanizmalar sayesinde, kompleks geometrik parçaların homojen olarak kaplanabilmesini sağlar.
4. Düşük kalınlıkta kaplamalar gerçekleştirilir (1-10 µm).
5. Malzemeye yüksek sertlik, yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal kararlılık gibi özellikler kazandıran kaplamalar yapılır.
6. Farklı kompozisyonlarda tek ve çok katmanlı kaplamalar elde edilir.
7. Kaplama parametreleri kontrol edilebilir.
8. Biriktirme hızı yüksek olduğundan dolayı işlem süresi uzun değildir.
9. PVD yöntemi ile katı malzemeler kimyasal işlemler olmaksızın buhar fazına dönüştürebilir.
10. İnsan sağlığı ve çevre kirliliği açısından bir problem oluşturmaz.
11. Üretilen kaplamalar sökülerek tekrar kaplanabilir (Teber, 2015).

#### 4.1.1. PVD Tekniğinin Sınıflandırılması

PVD tekniği, “buharlaştırma”, “iyon kaplama” ve “sıçratma” olmak üzere üç grupta incelenmektedir.

Tablo 4. 1. PVD tekniğinin sınıflandırılması (Durmaz, 2018)

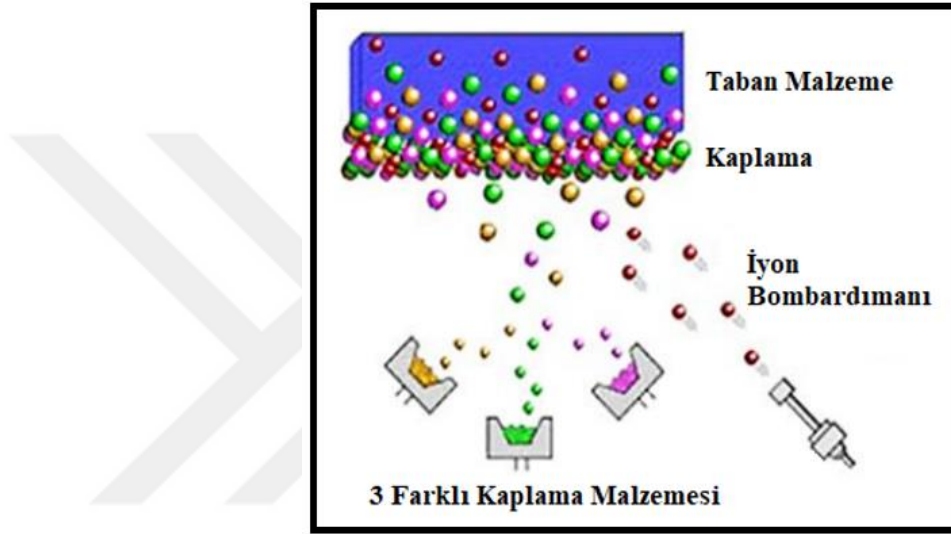


##### 4.1.1.1. İyon Kaplama Yöntemi

İyon kaplama yöntemi, taban malzeme yüzeyinin inert veya reaktif gazlar ile bombardıman yapılarak atomik boyutlu parçacıkların yüzeyde biriktirilmesi işlemidir



(Mattox, 2010). Bu yöntemde, taban malzeme yüzeyi ile film arasında yüksek bir adhezyon kuvveti sağlanır. Yöntemin önemli özelliklerinden birisi, yüzeyde film tabakası meydana gelmeden önce film ve taban malzeme arasında ara bir tabaka oluşturulur. Böylelikle adezyon yönünden avantaj sağlamaktadır. Diğer bir avantajı da malzemenin yüzeyinde oluşan yüksek sıcaklık sayesinde, altlık malzemenin yüzeyine doğru bir enerji akışının aktarılması ve malzemenin ısıtılmadan kimyasal bir reaksiyona girmesine olanak sağlamasıdır (Durmaz, 2018). Şekil 4.2’de iyon kaplama yönteminin mekanizması gösterilmiştir.



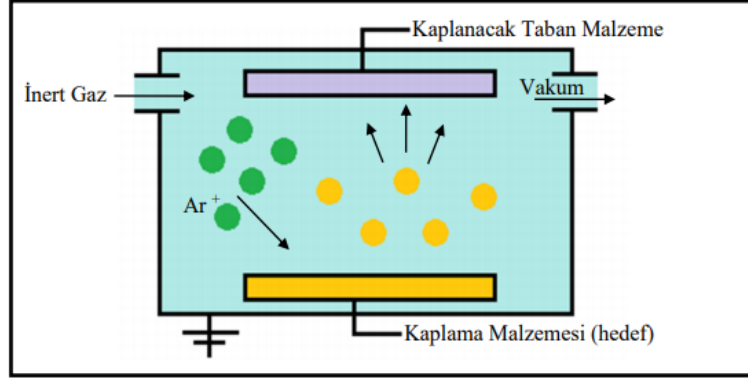
Şekil 4. 2. İyon kaplama yönteminin mekanizması (Teber, 2015)

#### 4.1.1.2 Sıçratma Yöntemi

Bu yöntem “püskürtme kaynaklı kaplama” olarak da bilinmektedir. Sıçratma yöntemi, vakum etkisi altındaki, negatif potansiyel (bias) uygulanmış (2-3 kV) hedef (film oluşturan malzeme) yüzeyinin, yüksek enerjili iyonlarla bombardıman edilerek atomların kopartılması sağlanır. Atomları bu şekilde hedef malzemeden ayırmaya sıçratma adı verilir (Boynueyri, 2019; Teber, 2015).

Sıçratma yöntemi, düşük basınç altında (0,13-13 Pa veya  $1.10^{-3}$  ile  $100.10^{-3}$  torr) soygaz ortamında yapılmaktadır. Soygaz olarak, film oluşturan malzeme ile reaksiyona girmemesi, ağırlığının yüksek olması (sıçratma oranını artırıcı) ve de kolay iyonize olma özelliğinden dolayı Argon gazı tercih edilir. Taban malzeme ile hedef arasına yüksek voltaj uygulanarak plazma üretilir. Plazma tarafından iyonize edilen pozitif yüklü argon iyonları, negatif yüklerin uygulandığı hedefe doğru yüksek hızda çarparak enerjilerini malzemeye verirler ve böylelikle yüzeyden atomları

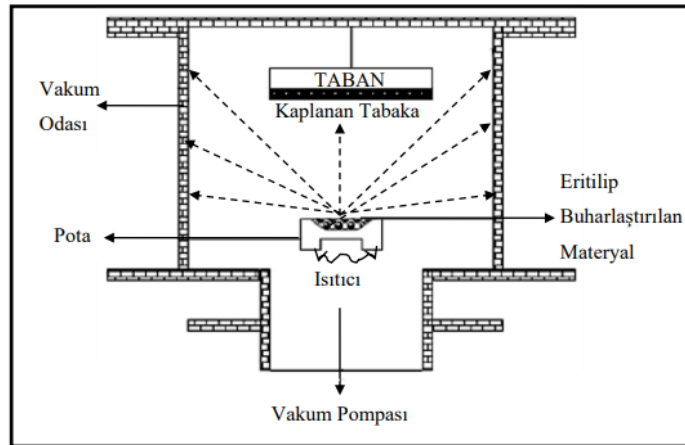
sıçratırlar. Hedef malzemeden sıçratılan atomlar taban malzeme yüzeyinde biriktirilerek kaplama işlemi gerçekleştirilir (Çalışkan, 2005; Okay, 2006). Şekil 4.3’de sıçratma yönteminin mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 4. 3. Sıçratma yönteminin mekanizması (Boynueyri, 2019)

#### 4.1.1.3 Buharlaştırma Yöntemi

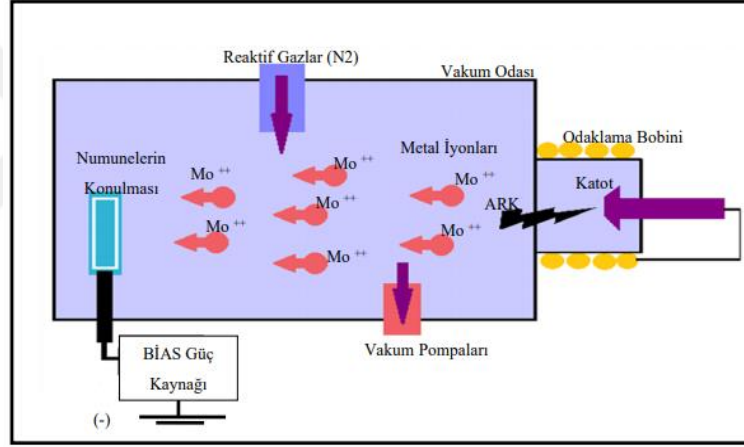
Buharlaştırma yönteminde, hedef malzeme vakum ortamında ve termal ısı kaynağı ile buharlaştırılır ve buharlaşan atomlar, taban malzeme yüzeyinde biriktirilerek kaplama işlemi gerçekleştirilir. Hedef malzemeyi buharlaştırmak üzere çeşitli yöntemler kullanılır. Bunlardan bazıları, elektrik arkı oluşturulması, buharlaştırılacak malzemenin direnç olarak bağlanması, elektron tabancası yardımı ile elektron bombardımanı yapılması, indüksiyon ile ısıtma yapılması ve lazer ışını ile ısıtma uygulamalarıdır. Buharlaştırma yönteminin en önemli avantajları, kolay bir yöntem olması, ekonomik olması ve yüksek biriktirme hızlarına sahip olmasıdır (Durmaz, 2018; İnçal, 2007; Küçükköse, 2017). Şekil 4.4’de buharlaştırma yönteminin mekanizması verilmiştir.



Şekil 4. 4. Buharlaştırma yönteminin mekanizması (Boynueyri, 2019)

#### 4.1.1.3.1. Katodik Ark Fiziksel Buhar Biriktirme

Bu teknikte, buharlaştırılacak hedef malzeme vakum haznesine katot, kaplama işlemi gerçekleştirilecek taban malzeme ise anot olarak yerleştirilmektedir. Sistemde uygulanan 10-40 V gibi düşük voltajlar ve 30-300 Å gibi yüksek akımların etkisiyle katot üzerinde bir "ark" oluşturulur. Katot yüzeyinde arkın oluştuğu alanlarda, sıcaklık çok yüksek değerlere ulaşarak (~2500 °C) hedef malzeme buharlaştırılır ve aynı anda iyonize edilir. Bu ortam içerisine reaktif gazlar (azot gibi) gönderilerek buharlaşan malzeme iyonlarıyla reaktif gazın reaksiyona girmesi sağlanır. Daha sonra da oluşan iyonlar katottan anoda doğru enerjilerini kaybetmeden kaplanacak malzeme yüzeyinde biriktirilir (Akbal, 2014). Şekil 4.5’de Katodik ark PVD sisteminin mekanizması verilmiştir.



Şekil 4. 5. Katodik Ark PVD sisteminin mekanizması (Boynueyri, 2019)

Katodik ark PVD yönteminin avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Hedef malzeme yüksek verimle buharlaştırılabilir.
- Sıçratma yöntemine kıyasla biriktirme hızı daha yüksektir.
- Yüksek iyonizasyon mertebelerine ulaşabilmektedir.
- İyonize edilmiş malzeme buharı ve reaktif gazlar anot üzerine uygulanan hızlandırma voltajı ile yönlendirilerek verimli bir kaplama elde edilir.
- Düşük taban malzeme sıcaklıklarında bile film malzemesi ile taban malzeme arasında iyi bir yapışma sağlar.
- Yatırım maliyeti özellikle sıçratma yöntemine göre çok daha düşüktür (Akbal, 2014).

## 4.1.2. PVD Tekniği ile Üretilen Çeşitli Kaplamalar

### 4.1.2.1 TiN Kaplama

TiN kaplama, PVD kaplamalar arasında en eski ve en bilinen kaplama türüdür. Yüksek yapışma mukavemeti, düşük sürtünme katsayısı, sertlik, kimyasal kararlılığı ve rengi nedeniyle aşınma, korozyon önleme ve dekoratif olarak yaygın bir kullanıma sahiptir (Kalkan, 2008; Shan vd., 2013). Endüstride çoğunlukla, kesicidelici takımlarda, sürtünen yüzeylerde ve biyouyumlu özelliğinden dolayı diş implantlarında, tıbbi kesici aletlerde, vücut içi protezlerde tercih edilebilmektedir . En önemli dezavantajı oksidasyon dirençlerinin (~ 500 °C) sınırlı olmasıdır (Şafak, 2008). TiN kaplama, iyi tribolojik özelliklere sahip olmasına rağmen, oksidasyona karşı zayıf direnç göstermesi nedeniyle bazı durumlarda yeterli koruma sağlamaz. Örneğın, yüksek hızda kesme işlemine tabi tutulduğunda sertliğinde ve oksidasyon direncinde azalma görülür. Bu kusurları önlemek için TiN kaplama yapısına farklı metal ve metal alaşımları eklenir. Bu kaplamalar hem TiN'ün özelliklerine hemde ilave metalin özelliklerine sahiptirler (Zhang vd., 2014).

Tablo 4. 2. TiN kaplama özellikleri (URL,2007).

Kimyasal Bileşimi	TiN
Sertlik (Hv <sub>0,05</sub> )	2300 ± 200
Oksidasyon Sıcaklığı (°C)	500 °C
Kalınlık (µm)	1-4
Renk	Altın Sarısı



Şekil 4. 6. TiN kaplama örnekleri (Teber, 2015)

### 4.1.2.2. TiAlN Kaplama

İlk nesil kaplama olarak bilinen TiN kaplamalar birçok avantaja sahip olmasına rağmen yüksek sıcaklıklarda zayıf oksidasyon direnci gösterirler. TiN kaplamanın bu özelliğini geliştirmek üzere yapısına Al eklenerek TiAlN kaplamalar elde edilir. Böylelikle hem oksidasyon direnci (800-900°C) hem de sertlikleri büyük ölçüde artırılır. TiAlN kaplama yüzeyinde oluşan alüminyum oksit tabakası (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Oksijen atomlarının iç kaplamaya difüzyonunu engeller ve kaplamanın oksidasyon direncini artırır (Dejun vd., 2015). TiAlN kaplama yüksek bir aşınma oranına neden olabilecek yüksek sürtünme katsayısı değerine sahiptir (Zhang vd., 2018). Bu sorunu çözmek üzere TiAlN yapısına başka bir element eklenerek (C gibi) ya da çok katlı kaplanarak sürtünme katsayısı düşürülmektedir. Genellikle, kesici takımlarda, yüksek sıcaklıklarda çalışan metal ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplarında, yüksek hızlarda çalışan metal uçlara uygulanmaktadır (Kalkan 2008; Şafak, 2008).

Tablo 4. 3. TiAlN kaplama özellikleri (URL,2007)

Kimyasal Bileşimi	TiAlN
Sertlik (Hv <sub>0,05</sub> )	3300 ± 300
Oksidasyon Sıcaklığı (°C)	800
Kalınlık (µm)	1-3
Renk	Siyahımsı gri



Şekil 4. 7. TiAlN kaplama örnekleri (İnçal, 2007)

#### 4.1.2.3. TiCN Kaplama

TiCN kaplama, asetilen gazının (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) kaplama esnasında azot gazı ile birlikte vakum ortamına gönderilmesiyle gerçekleştirilir. TiCN kaplama Ti:C oranına göre mavi-gri ya da pembe gibi renklerde üretilebilmektedir (Çalışkan, 2005). Aşınmanın baskın olduğu tribolojik uygulamalarda TiCN, TiN'den daha üstün

özellikler sergilemektedir. Karbon içeriği nedeniyle daha yüksek sertlik değeri ile birlikte yağlayıcı olarak da görev yaparak sürtünme ve aşınmanın azalmasına yol açar (Larbi vd., 2006). Polcar yapmış olduğu çalışmada, TiCN kaplamanın 200-500 °C aralığında aşınma testlerini gerçekleştirmiştir. 200 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda hafif bir aşınmanın olduğu, 300 ila 500 °C arasındaki sıcaklıklarda aşınmanın hızlı bir şekilde olduğunu raporlamıştır (Polcar vd., 2006). TiCN kaplamalar, sıcaklığın çok yüksek olmadığı şartlarda çalışan kesme uçları, talaş kaldıran takımlar, matkap uçlarında tercih edilir (Çalışkan, 2005; Şafak, 2008).

Tablo 4. 4. TiCN kaplama özellikleri (URL)

Kimyasal Bileşimi	TiCN
Sertlik ( $Hv_{0,05}$ )	$2500 \pm 500$
Oksidasyon Sıcaklığı (°C)	400
Kalınlık ( $\mu m$ )	1-4
Renk	Mavi-gri-pembe



Şekil 4. 8. TiCN kaplama örnekleri (Teber, 2015; URL,2007)

#### 4.1.2.4. TiAlCN Kaplama

TiAlN kaplamalar yüksek oksidasyon direnci ve termal stabiliteye sahiptir. Ancak TiAlN kaplamaların TiN kaplamalardan daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olması zayıf tribolojik özellikler göstermesine neden olur. C'nun TiN yapısına dahil edilmesiyle de TiCN kaplamalar oluşturulur. Ancak 400 °C'nin üzerindeki çalışma koşullarında sertlikleri azalır ve daha yüksek sıcaklıklardaki uygulamalarını sınırlar. Bu sorunları çözmek için, TiAlN kaplama yapısına C eklenir ve hem TiAlN kaplama hem de TiCN kaplama özelliklerine sahip bir kuaterner TiAlCN kaplama elde edilir. TiAlCN kaplamalar yüksek termal dayanım, iyi oksidasyon direnci ve tribolojik özelliklere sahiptir (Larbi vd., 2006; Zeng vd., 2015; Zhang vd., 2014). Yüksek sıcaklıklarda çalışan kalıp ve takımlarda, HSS ve karbür takımlarda, yüksek

ya da düşük alaşımlı çeliklerin çekme, dövme, delme ve şekil verme işlemlerinde kullanılmaktadır ( URL, 2007).

Tablo 4. 5. TiAlCN Kaplamanın özellikleri (URL,2007)

Kimyasal Bileşimi	TiAlCN
Sertlik ( $H_{v0,05}$ )	$3500 \pm 500$
Oksidasyon Sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )	800
Kalınlık ( $\mu m$ )	2-4
Renk	Gül kurusu



Şekil 4. 9. TiAlCN kaplama örneği (URL)

#### 4.1.2.5. CrN Kaplama

CrN kaplamalar tribolojik uygulamalarda en çok kullanılan kaplamalardan biridir. Genellikle metal şekillendirme takımlarında, sıvama kalıplarında, plastik enjeksiyon kalıplarında, bakır alaşımlarını kesme işleminde ve makine elemanları içinde kullanılır (Şafak, 2008). CrN, TiN kaplama ile karşılaştırıldığında daha yüksek tokluk, daha düşük sürtünme katsayısı, daha yüksek korozyon ve oksidasyon direncine sahiptir (Samim vd., 2020). CrN kaplamaların genel performansını daha da iyileştirmek için, CrN yapısına Al eklenerek AlCrN kaplamalar oluşturulur. AlCrN kaplamalar CrN kaplamalara göre sertlikte ( $3500 \pm 112 HV$ ), aşınma direncinde ve oksidasyon direncinde ( $1100^{\circ}C$ ) önemli bir artış göstermektedir (Biol, 2013; Endrino vd., 2007; Mo vd., 2009). AlCrN kaplamalar genellikle yüksek sıcaklıkların meydana geldiği kesici takım uygulamalarında, ağır koşullar altında çalışan kalıplarda, dişli çarklarda, frezelerde, yüksek hızlı çeliklerde ve karbür kesici takımlar için kullanılmaktadır (Şafak, 2008).

Tablo 4. 6. CrN kaplama özellikleri (Şafak, 2008)

Kimyasal Bileşimi	CrN
-------------------	-----

Sertlik (Hv <sub>0,05</sub> )	2800±400
Oksidasyon Sıcaklığı (°C)	700
Kalınlık (µm)	3-5
Renk	Gümüş



Şekil 4. 10. CrN kaplama örnekleri (Teber, 2015)

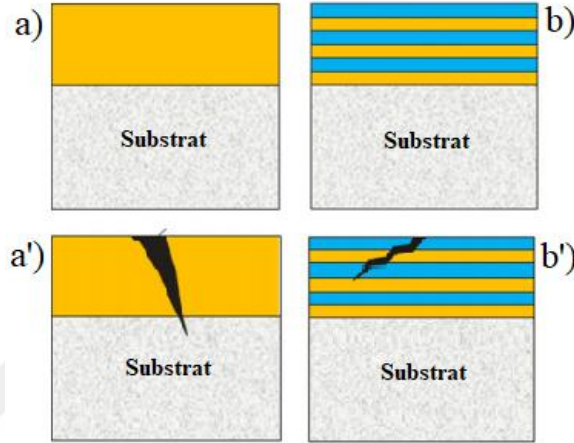
#### 4.1.2.6. Çok Katmanlı Kaplamalar

Çok katmanlı kaplamalar genellikle iki katmanın birkaç tekrarından oluşmaktadır. Bu katmanlar, seramik ve metalik katmanlardan (TiN/Ti) veya iki farklı seramik katmandan (TiN/TiAlN) yapılabilmektedir. Katman malzemesinin özellikleri, çok katmanlı kaplamanın özelliklerini etkilemektedir (Krella, 2016; Wood vd., 2011). Çok katmanlı kaplamalar uygun malzeme kombinasyonları oluşturularak biriktirilmesiyle sert kaplamaların aşınma, korozyon ve oksidasyon direncini iyileştirmektedir. Çok katmanlı kaplamaların amacı, farklı kaplamaların olumlu özelliklerini birleştirip kaplamanın özelliklerini ve performansını arttırmaktır (Caliskan, 2017). Temel avantajları şunlardır:

- ✓ Kaplamanın substrata yapışması artırılır.
- ✓ Çeşitli özelliklere sahip (aşınma direnci, ısı yalıtımı, elektriksel iletkenlik gibi) birkaç ince tabakanın sıralı olarak biriktirme işlemi sağlanarak arzu edilen özelliklere sahip kaplamalar yapılmaktadır.
- ✓ Çok katmanlı yapı, katmanlar arasında çatlak enerjisinin sapsmasını ve dallanmasını engellemektedir.
- ✓ Kaplama yüzeyinde çatlak oluşması durumunda çatlak enerjisini azaltır. Tersine, tek katmanlı kaplamalar çatlak büyümesine karşı daha az direnç gösterir. Şekil 4.11’de gösterildiği gibi, tek katmanlı kaplamada çatlak, substrat yüzeyine kolaylıkla yayılır ve geniş kaplama bölgeleri zarar görür.



- ✓ Çok katmanlı kaplamalar , tek katmanlı kaplamalara göre daha düşük artık gerilimler, metalik yüzeylere iyi yapışma, iyileştirilmiş sertlik, tokluk gibi özelliklere sahiptirler.
- ✓ Genellikle tek katmanlı kaplamalara göre daha kalın film tabakasına sahip olması kullanılan malzeme ömrünü uzatmaktadır (Caliskan vd., 2017; Wood vd., 2011).



Şekil 4. 11. (a-a') Tek katmanlı ve (b-b') çok katmanlı kaplamalarda farklı çatlak büyüme yapıları (Caliskan vd., 2017)

#### 4.1.3. PVD Tekniği ile Motor Elemanlarının Seramik Malzeme ile Kaplanması

PVD tekniği ile üretilen seramik malzemeler son zamanlarda motor elemanlarının kaplanmasında önemli bir araştırma alanı oluşturmuştur. PVD ile üretilen seramik kaplamaların düşük sürtünme katsayısı, yüksek sertlik, yüksek termal dayanım gibi özelliklere sahip olması motorda ki ısı kaybının minimuma indirilmesi, tribolojik kayıpların azaltılması, motor verimi ve maliyet açısından oldukça önem taşımaktadır (Mehran vd., 2018). Bu teknikle üretilen seramik kaplamaların üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahip olmaları motor üreticileri ve araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Bu bağlamda PVD kaplama türlerinin motor elemanları üzerindeki araştırmaları sürdürülmekte ve tribolojik davranışları anlaşılmasına çalışılmaktadır (Lin vd., 2016). Geleneksel yöntemler kullanılarak kaplanması mümkün olmayan karmaşık geometrili parçalar PVD tekniği ile kaplanabilmektedir. Bu ise karmaşık parçalardan oluşan motorun kaplama zorluğunu ortadan kalkmasını sağlamaktadır. Ayrıca üretilen seramik kaplamaların ısıyı absorbe etme özelliğinin olmasından dolayı araçlarda kullanılan soğutma sisteminin

küçültülmesi ve hatta tamamen kaldırılması düşünülmektedir. Böylelikle üreticiler motoru hafifletmek ve maliyeti azaltmayı amaçlamaktadır (Kalkan, 2008). Tablo 4.7'de Motor elemanlarına uygulanan çeşitli PVD kaplamalar verilmiştir.

Tablo 4. 7. Çalışmalarda motor elemanlarına uygulanan çeşitli PVD kaplamalar (Mehran vd, 2018)

Motor Parçası	Substrat	Kaplama	Yöntem
Piston segmanı	AISI 440C çelik	CrN Cr <sub>2</sub> N	PVD
	Dökme demir	MoS <sub>2</sub> CrN DLC Ti-TiN TiAlN TiN	
	H-13 Çelik	CrN	
	Nitrür çelik	CrN DLC	
	AISI 304 paslanmaz çelik	TiSiCN	
Piston	Al-Si-Alaşım	MoN	PVD
		TiN DLC	
Piston pimi	Alüminyum alaşım	DLC CrN	PVD
Silindir	Dökme demir	CrN	PVD
Rulman	100Cr6 Çelik	ZrN ZrC CrAlN TiAlN Cr <sub>2</sub> N	PVD
Dişli	F1272 Çelik	Cr / CrN	PVD
	15NiCr13	MoS <sub>2</sub> / Ti	
	Ti6Al4V	CrN	

Literatürde yapılan çalışmalarda motor parçalarının kaplanması genellikle TiN, CrN ve DLC kaplamalarla ilgili araştırmalar yapıldığı görülmüştür. TiN kaplama 4.1.2.1 de açıklandığı gibi, yüksek sıcaklıklarda düşük oksidasyon direncine sahiptir. Ti-temelli kaplamaların bu özelliğini iyileştirmek için yapısına alüminyum eklenmektedir. Kesme veya sürtünme sırasında açığa çıkan yüksek ısı ile oluşacak oksidin TiO<sub>2</sub>'den daha kararlı olan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olması istenmektedir (Zhang vd., 2014). DLC kaplamanın yapısında ki karbon nedeni ile düşük sürtünme katsayısına sahip olması araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Ancak 200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yüksek sürtünme ve yapışma gösterme eğiliminde olması göz ardı edilmiştir (Banerji vd., 2014). CrN kaplama, TiN kaplamaya göre daha yüksek tribolojik özelliklere

sahiptir. CrN kaplamanın genel performansını daha da geliştirmek için yapısına Al eklenmektedir (Mo vd, 2009). Son yirmi yılda yapılan çok sayıda çalışma, yüksek alüminyum içeriğine sahip (AlCrN ve AlTiN gibi) nitrür kaplamaların, daha yüksek oksidasyon direnci göstermeleri nedeniyle yüksek servis sıcaklıklarında, alüminyum içermeyen nitrür kaplamalara (CrN ve TiN gibi) göre daha iyi sertlik, oksidasyon direnci ve ısı direnç sağlayabildiğini göstermiştir (Chim vd., 2009; alışkan vd., 2014). Tablo 4.7 de görüldüğü gibi piston segmanında Al içeriğine sahip sadece TiAlN kaplamanın yapıldığı görülmüştür. Bu nedenle, gerçekleştirilen tez çalışmasında Al içeren farklı seramik temelli kaplamaların hazırlanması ve karakterizasyonu üzerine odaklanılmıştır. Ayrıca TiAlN kaplamalar için kaplama kalınlığının aşınma davranışları üzerindeki etkileri incelenecektir.



## 5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışması kapsamında yapılacak olan PVD kaplama yöntemi ile kaplanmış piston segmanlarının sürtünme ve aşınmaların azaltılmasına yönelik literatür çalışmaları incelenmiştir.

**Lyubimov vd., (1992)** yaptıkları çalışmada dökme demirden üretilmiş piston segmanları üzerine çok katmanlı Ti-TiN kaplaması uygulamışlardır. Segmanların aşınma testleri, 180 saat boyunca yağlı ortamda scooter motoru kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çok katmanlı Ti-TiN kaplamaların, kaplamasız numuneye kıyasla piston segmanının kullanım ömrünü 3 kat ve elektroliz/Cr kaplı segmanlara kıyasla 1,7 kat artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca silindir aşınmasının %30 oranında azaldığı raporlanmıştır. Sonuçlar Cr kaplı piston segmanlarının çok katmanlı PVD kaplamalarla değiştirilebileceğini göstermiştir. Çok katlı kaplamada abrasif aşınma mekanizmasının hakim olduğu raporlanmıştır.

**Zhuo vd., (2000)** dökme demir temelli piston segmanlarının yüzey iyileştirmesini yapmak üzere farklı katman kalınlıklarında, Ti-TiN ile kaplama işlemi yapmışlardır. Artan katman sayısı ile birlikte dökme demir piston segmanı üzerinde 4 µm' den daha kalın Ti-TiN kaplaması elde etmişlerdir. Çok katmanlı Ti-TiN kaplamalar ile Cr kaplı segmanların aşınma dayanımlarını kıyaslamışlardır. Kaplamaların aşınma testleri yazarların geliştirdiği yağsız aşınma makinesinde test edilmiştir. Sonuçlar, çok katmanlı kaplamaların aşınmaya karşı dirençlerinin Cr kaplı segmandan daha üstün olduğunu göstermiştir. Ayrıca artan katman sayısı ile birlikte kaplamaların sertliğinde artış görülmüştür.

**Cho vd., (2009)** çalışmalarında segmanların tribolojik özelliklerini iyileştirmek amacıyla segman yüzeylerine TiN, TiAlN ve DLC kaplamalarını uygulamışlardır. Kaplamaların tribolojik özellikleri yağlı ortamda ileri-geri (reciprocating) aşınma testi ile tespit edilmiştir. Aşınma testi sonucuna göre en iyi tribolojik özellikler DLC kaplı numuneden elde edilmiştir. En kötü performansı ise TiAlN kaplı numunenin gösterdiği raporlanmıştır.

**Lorenzo Martin vd., (2013)** çalışmalarında farklı kaplama kalınlıklarındaki CrN kaplamanın kuru ortamda tribolojik performanslarını değerlendirmişlerdir. H-13 çelik segmanlar üzerine biriktirdikleri CrN-1, CrN-2 ve CrN-3 kaplamaların kalınlık değerlerini sırasıyla 1 µm, 5 µm ve 10 µm olarak belirlemişlerdir. Aşınma testlerini 5, 10 ve 20 N'luk yükler altında, 1 cm/s'lik kayma hızında ve 60 dak. süre içerisinde yapmışlardır. Artan yük ile birlikte daha ince olan kaplamanın (1 µm) hızla aşındığını daha kalın olan kaplamaların (5 ve 10 µm) bozulmadan kaldığını raporlamışlardır. 10 N yük altında en düşük sürtünme katsayısı değeri CrN-2 kaplamadan ( $\mu = 0,45$ ) elde etmişlerdir. Mevcut çalışmanın sonuçları, ince film kaplama kalınlığının tribolojik davranışlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini göstermiştir.

**Lin vd., (2016)** piston segmanlarının sürtünme kayıplarını ve aşınmasını en aza indirmek için AISI 304 paslanmaz çelik piston segmanlarının yüzeylerini TiSiN' e C ekleyerek geliştirdikleri TiSiCN kuaterner (dört bileşenli) kaplamalar üzerine çalışmışlardır. Kaplamaların aşınma dayanımları 120 saatlik motor testleri ile incelemişlerdir. Kaplanmamış numune ile karşılaştırıldığında, kaplanmış tepe ve kompresyon segmanları için sırasıyla % 29 ve % 40 daha düşük ağırlık kaybı gösterdikleri tespit edilmiştir.

**Zabala vd., (2017)** yapmış oldukları çalışmada, piston segmanı ile silindir gömleği çifti arasındaki sürtünme ve aşınmayı azaltmak için dökme demir piston segmanları yüzeylerine CrN-1, CrN-2, DLC (dimond like carbon), MoS<sub>2</sub> kaplamalarını uygulamışlar ve kaplamaların tribolojik özelliklerini yağlı ortamda reciprocating aşınma testi ile incelemişlerdir. Yapılan testler sonucunda en düşük sürtünme katsayısı 0,13 olarak DLC kaplı numunede olduğu belirlenmiştir. Kullanılan dört farklı kaplamadan en iyi tribolojik özellikleri DLC kaplanmış numunenin sergilediği ortaya konulmuştur.

**Wan vd., (2017)** hali hazırda kaplamalı piston segmanı yüzeylerine ( elektroliz/Cr, elektroliz/Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, elektroliz/Cr-Elmas, PVD/CrN ) tasarladıkları GLC (graphite like carbon) film kaplama işlemini gerçekleştirmişlerdir (Cr+GLC, Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + GLC, Cr-Elmas + GLC, PVD-CrN + GLC). GLC kaplamanın sürtünme ve aşınma davranışları üzerindeki etkisi GLC içermeyen piston segmanı kaplamaları ile karşılaştırarak değerlendirmişlerdir. GLC içermeyen kaplamalardan en düşük sertlik değeri elektroliz/Cr kaplamadan (970 Hv) elde edilmiştir. En yüksek sertlik

değeride PVD/CrN kaplamada (1390 Hv) tespit edilmiştir. GLC kaplama uygulandıktan sonra sertlik değerleri elektroliz/Cr kaplama için 980 Hv, PVD/CrN kaplamada ise 1400 Hv olarak belirlenmiştir. Kaplamaların tribolojik davranışları yağlı ortamda ve 170 °C de, iki saat boyunca yapılan reciprocating aşınma testi ile belirlenmiştir. Çalışmada, GLC kaplamanın tüm numunelerin sürtünme katsayısı değerlerini düşürdüğü gözlenmiştir. En düşük sürtünme katsayısını PVD/CrN+GLC ( $\mu=0,13$ ) kaplamadan elde edilmiştir. PVD/CrN ve PVD/CrN+GLC kaplamaların aşınan bölgelerinin SEM analizi ile incelenmesi sonucunda her iki kaplamada da abrasif aşınma mekanizması gözlenmiştir. Elektrolizle kaplanmış Cr bazlı kaplamalarda ise adhesif, abresif ve delaminasyon aşınma mekanizmalarının birlikte olduğu belirlenmiştir. Kaplamalar arasında en iyi performans PVD/CrN+GLC kaplamadan elde edilmiştir. En kötü performansı ise elektroliz/Cr kaplı segmanın gösterdiği raporlanmıştır.

**Rozario vd., (2018)** gerçekleştirdikleri çalışmada PVD/çok katlı CrN-TiN ve elektroliz/Cr kaplı segmanların aşınma dayanımlarını araştırmışlardır. Aşınma testlerini yağlı ve 200 °C'lik sıcaklık ortamında incelemişlerdir. Deneysel bulgular, Cr, CrN-TiN kaplamalar için kütle kayıplarının sırasıyla 0,16 ve 0,01 mg bulunduğunu göstermiştir. Sonuç olarak PVD kaplamanın elektroliz kaplamadan daha iyi aşınma direncine sahip olduğu bildirilmiştir.

**Vinoth vd., (2019)' nin** yaptığı çalışmada PVD tekniğinde kullanılan kaplama koşullarının piston segmanlarının mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Taban malzeme olarak nitrürlü paslanmaz çelik segmanlar kullanılmıştır. 150 ve 200 W ta, DLC ile kaplanarak hazırlanan numunelerin sertlik değerleri sırasıyla 1500 HV ve 750 HV olarak belirlenmiştir. Tribolojik özellikleri belirlemek için, pin-on-disk ile kuru ortamda, 550 saniye boyunca, 10 N yük altında 0,9 m/s kayma hızı uygulanarak 500 m kayma mesafesi kadar yol alınmıştır. Kaplamaların aşınan bölgelerinin SEM analizleri sonucunda abrasif aşınmanın hakim olduğu görülmüştür. 150 W kaplamalı numunede sürtünme katsayısı 550 saniye boyunca 0,2'nin altında devam ederken, 200 W kaplanmış numunede sadece 220 saniyeye kadar 0,2'nin altında kalan sürtünme katsayısı gözlemlenmiştir. 150 W gücü ile elde edilen kaplamaların düzgün yüzeye, daha yüksek sertliğe ve daha iyi tribolojik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, her iki koşul ile

hazırlanan DLC kaplamaların sürtünme ve aşınmaları azaltmak için paslanmaz çelik otomobil bileşenlerine uygulanabileceği raporlanmıştır.

PVD yöntemi ile piston segmanlarına uygulanan kaplamalar ile ilgili literatür çalışmaları yukarıda özetlenmiştir. PVD tekniği ile piston segmanı kaplama araştırmalarının oldukça sınırlı olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalar da genellikle TiN, CrN ve DLC kaplamaların tribolojik özelliklerinin araştırıldığı gözlenmiştir. Ayrıca incelenen çalışmalarda, segmanların kaplanmasında yaygın olarak kullanılan Cr kaplamanın, PVD kaplamalara göre daha dayanıksız olduğu belirlenmiştir. Literatür taraması sonucunda, TiAlCN, AlCrN ve çok katlı TiAlN kaplamaların daha önce dökme demir segmanlar üzerine PVD tekniği ile uygulanmadığı gözlenmiştir. Ayrıca literatürde kısıtlı sayıda TiAlCN çalışmasının yer alması tribolojik davranışlarının anlaşılmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışması kapsamında, içten yanmalı motorlarda kullanılan ve motorda enerji kaybının önemli bir kısmına neden olan piston tepe segmanlarının yüzeylerinin seramik malzemelerle kaplanması hedeflenmiştir. Seramik kaplamalar katodik ark PVD yöntemi kullanılarak numuneler üzerine uygulanacaktır. Farklı seramik malzemelerle kaplanan segmanların morfolojik, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenerek sürtünme katsayısı, mikro-sertlik, aşınma kayıpları ve aşınma mekanizmalarındaki değişimler irdelenecektir. Aşınma testi sonucunda aşınma oranlarının en az olduğu ve sürtünme katsayısının en az olduğu kaplama belirlenecektir. Bu sürecin;

1. **Adım:** Numune hazırlama ve yüzey kaplama işlemi
  2. **Adım:** Kaplanan yüzeylerin morfolojik özelliklerinin belirlenmesi (Kaplama yapılan yüzeylerin SEM ve XRD analizleri yapılarak, kaplamanın kimyasal bileşen analizi ve kapla özelliklerini incelemek)
  3. **Adım:** Mikro-sertlik testi
  4. **Adım:** Tribolojik testlerin yapılması (Kaplamaların aşınma oranı ve sürtünme katsayısının belirlenmesi )
  5. **Adım:** Aşınma mekanizmalarının belirlenmesi
- Şeklinde beş adımda gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

### 6.1. Numune Hazırlama

Çalışmamızda kullanılacak segmanlar Samsun Segman Sanayiden temin edilmiştir. Çapı 93 mm ve kalınlığı 3 mm olan, dökme demirden üretilmiş piston tepe segmanlarının kimyasal kompozisyonu Tablo 6.1' de verilmiştir.

Tablo 6. 1. Dökme demir taban malzemenin kimyasal kompozisyonu



Element	C	Si	Cu	Mn	S
% ağı.	3,48	2,29	0,717	0,175	0,014

Seramik kaplamalar yapılmadan önce, numuneler ön-hazırlık işlemine tabi tutulmuştur. İlk olarak etanol ile yüzey temizleme işlemi yapıldı. Daha sonra düzgün kaplamalar elde edebilmek için numuneler sırasıyla 60, 120, 240, 400, 600, 800 ve 1200 mesh SiC zımpara kağıdı ile zımparalandı. Numune yüzeyleri 1 µm elmas pasta ile parlatıldıktan sonra tekrar etanol ile temizlenerek kaplama için hazır hale getirildi.

## 6.2. Kaplama İşlemi

Numunelerin yüzeyleri, Kapco kaplama (İstanbul) firmasında Eıfeler Von Ardenne marka PVD cihazında Katodik Ark PVD yöntemi ile TiAlCN, AlCrN, tek ve çok katlı TiAlN ile kaplandı.

Yüzey kaplama işlemi için hazır hale getirilen taban malzemeler ilk olarak döner taşıyıcılara yerleştirildi. Kaplama işleminde saf Ti (titanyum), TiAl alaşımı ve AlCr alaşımı hedef olarak kullanıldı. Biriktirme işlemi, tüm kaplamalar için 450 °C sıcaklıkta, azot atmosferinde ve -100 volt bias voltajında gerçekleştirildi. Numunelerin TiAlCN ile kaplanması esnasında azot gazının yanısıra ortama asetilen (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) gazı da gönderilmiştir.

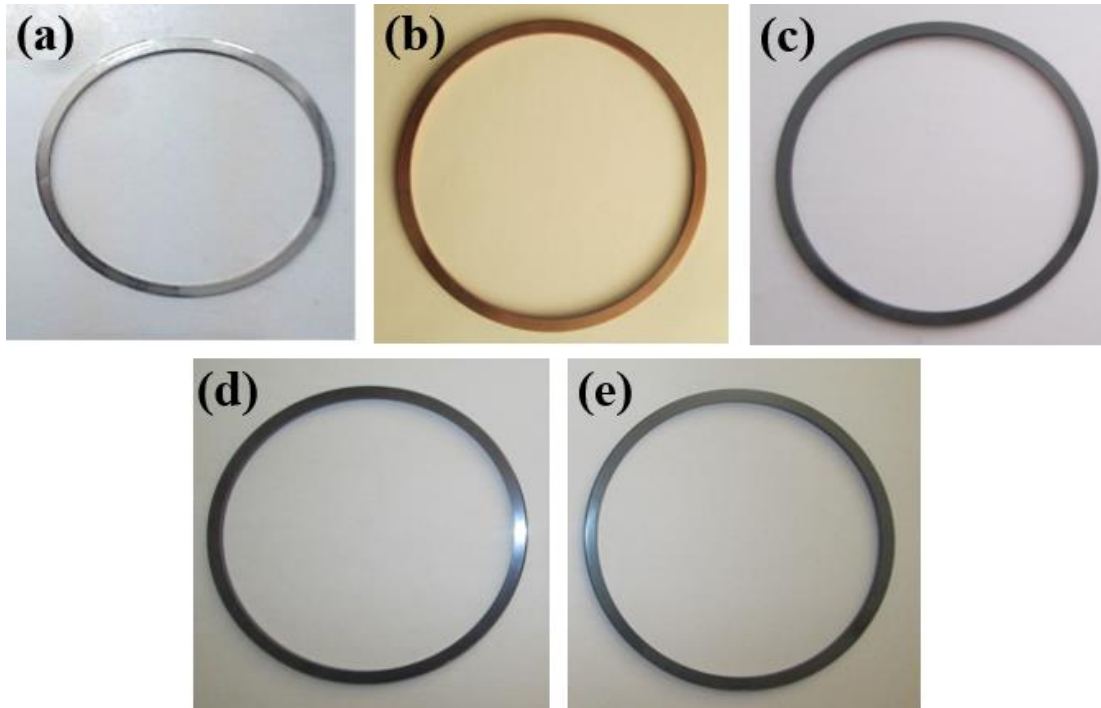
Bu yöntemde, bölüm 4.1.1.3.1.' de bahsedildiği üzere, hedef olarak kullanılan metal (Ti) ve metal alaşımlarının (TiAl ve AlCr) buharlaştırılması ve taban malzeme (segman) yüzeyinde biriktirilmesi esastır. Elektromanyetik ortama gönderilen azot gazı, buharlaşan iyonlarla birlikte nitrür bileşikleri oluşturularak taban malzeme yüzeyinde biriktirildi. Böylelikle farklı seramik malzemeler ile dökme demir segmanlarının kaplama işlemi gerçekleştirildi. Kaplama işleminde kullanılan katodik ark PVD cihazı Şekil 6.1'de verilmiştir. Kaplama parametreleri Tablo 6.2' de özetlenmiştir. Şekil 6.2'de kaplama işlemi gerçekleştirilen piston tepe segmanlarına ait fotoğraflar gösterilmiştir.



Şekil 6. 1. Katodik Ark PVD cihazı

Tablo 6. 2. Kaplama parametreleri

Kaplama Malz.	TiAlCN	AlCrN	tek katlı TiAlN	çok katlı TiAlN
Bias (V)	100	100	100	100
Katot Akımı (A)	100	100	55	55
Sıcaklık (°C)	450	450	450	450
Kaplamasüresi (dk.)	130	130	80	150
Hedef	TiAl	AlCr	TiAl	Ti/TiAl



Şekil 6. 2. a) Kaplamasız, b) TiAlCN, c) AlCrN, d) tek katlı TiAlN ve e) çok katlı TiAlN kaplama

### 6.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM/EDX) Analizleri

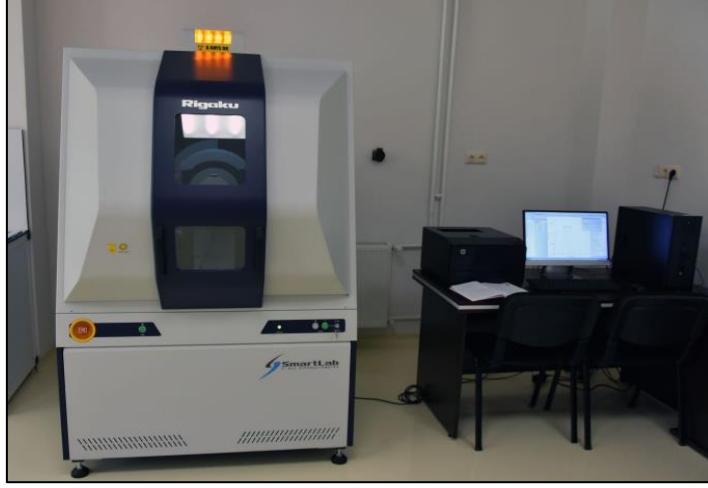
Yüzey işlemleri uygulanan ve yaklaşık 1 cm boyutunda kesilen tepeli segmanlarının kaplama kalınlıkları KİTAM’da Jeol marka JSM-701 model, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı ile ölçülmüştür (Şekil 6.3). Kaplamasız ve kaplanmış deney numunelerinin aşınma izleri ve aşınma mekanizmalarını tespit etmek için SEM cihazı kullanılmıştır. Kaplamada bulunan elementlerin kimlikleri ve yüzde bileşimleri EDX analizi ile belirlenmiştir.



Şekil 6. 3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

### 6.4. XRD Analizi

Kaplamasız ve kaplanmış segmanların yüzeyinde oluşan fazlar, OMÜ KİTAM’da bulunan Rigaku marka Smartlab model, X-Işını Kırınımı (XRD) cihazı kullanılarak incelendi (Şekil 6.4). Cu-K $\alpha$  radyasyonunda ( $\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$ ),  $2\theta = 30-80^\circ$  tarama aralığında  $2^\circ/\text{dak.}$  tarama hızında analiz gerçekleştirildi.



Şekil 6. 4. X-Işını Kırınım Cihazı (XRD)

### 6.5. Mikro-Sertlik Ölçümleri

Kaplama yapılan numunelerin yüzeylerine ait sertlik değerleri, ETÜ YÜTAM'da bulunan, Shimadzu marka mikro-sertlik cihazı kullanılarak vickers yöntemiyle ölçüldü (Şekil 6.5). Her bir numune için sertlik testi, 10 gramlık yük ve 10 saniyelik bir bekleme süresi altında gerçekleştirildi. Ölçümler beş ayrı noktada yapılarak, numunelerin ortalama sertlik değerleri belirlendi.



Şekil 6. 5. Mikro-Sertlik Cihazı

### 6.6. Aşınma Testi

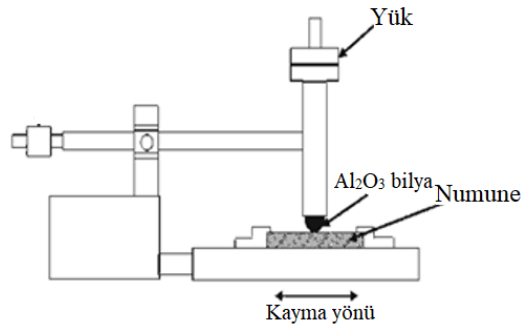
Numunelerin aşınma testleri, Gebze Teknik Üniversitesi laboratuvarında, CSM/Anton Paar Instrument marka Tribometre cihazında yapıldı (Şekil 6.6).

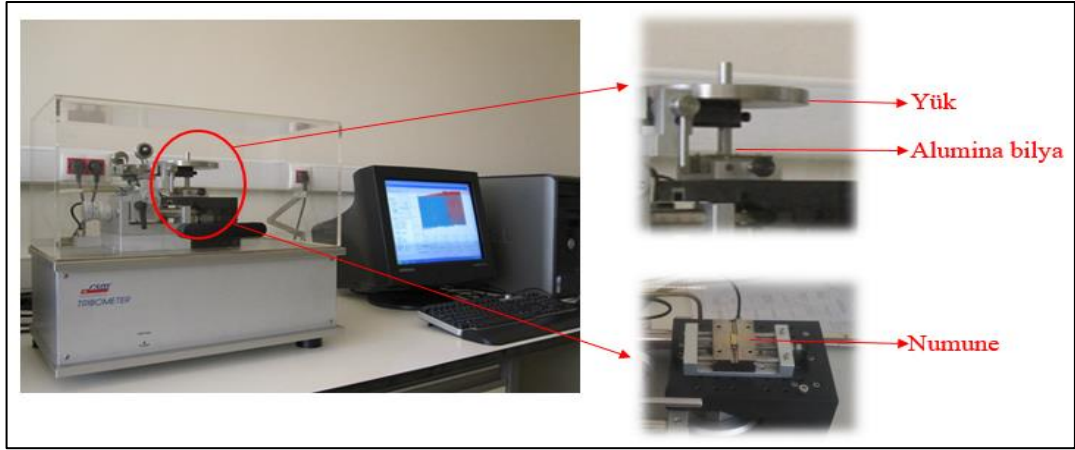
Tribometre, temas eden iki yüzey arasındaki sürtünme katsayısı ve aşınma oranı gibi tribolojik özelliklerin belirlenmesini sağlayan bir araçtır.

Aşınma testine başlamadan önce, numuneler yaklaşık olarak 12-14 mm uzunluğunda sulu ortamda kesilmiştir. Numune yüzeyleri etanolle temizlenerek testin yapılmasına hazır hale getirilmiştir. Kaplamasız ve kaplama işlemi gerçekleştirilen segmanların tribolojik özellikleri, 6 mm çapında alumina ( $Al_2O_3$ ) karşı bilya kullanılarak ileri-geri (reciprocating) aşınma sistemi ile incelenmiştir. Aşınma testi oda sıcaklığında, 10 N yük altında, 0,18 m/s kayma hızında, 220 m kayma mesafesinde gerçekleştirildi. Deney sonucunda kaplamasız ve kaplanan numunelerin aşınma oranları ve ortalama sürtünme katsayıları belirlendi. Tablo 6.3’de aşınma testlerinde kullandığımız parametreler verilmiştir.

Tablo 6. 3. Aşınma testi parametreleri

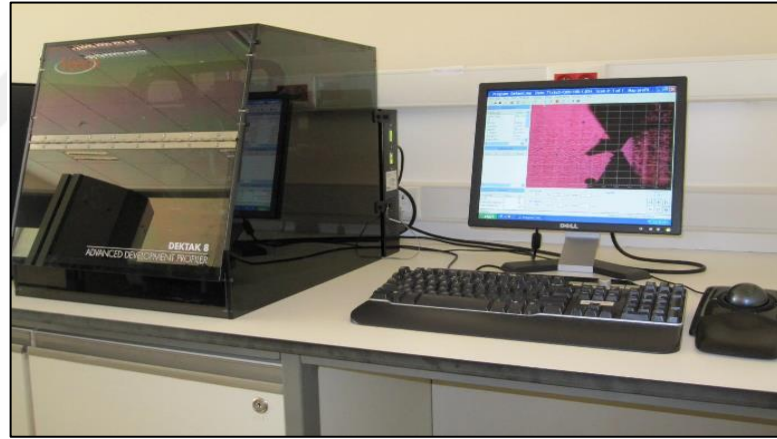
Parametreler	Değerler
Test türü	ileri-geri
(Reciprocating)	
Uygulanan Yük (N)	10
Aşındırma hızı (m/s)	0,18
Süre (s)	2400
Karşı bilya malzemesi	Alumina
Sıcaklık (°C)	Oda sıcaklığı
(23±2)	
Ortam	Kuru şartlar





Şekil 6. 6. Tribometre Cihazı

Numunelerin aşınma oranlarını belirlemek için Veeco marka Dektak 8 model yüzey profilometre cihazı kullanıldı (Şekil 6.7). Yüzey profilometre ile numunelerin aşınma profillerinden yararlanılarak, aşınma izlerinin alanı ölçüldü ve bulunan değerler tribometrenin yazılımına girilerek numunelerin aşınma oranları tespit edildi.



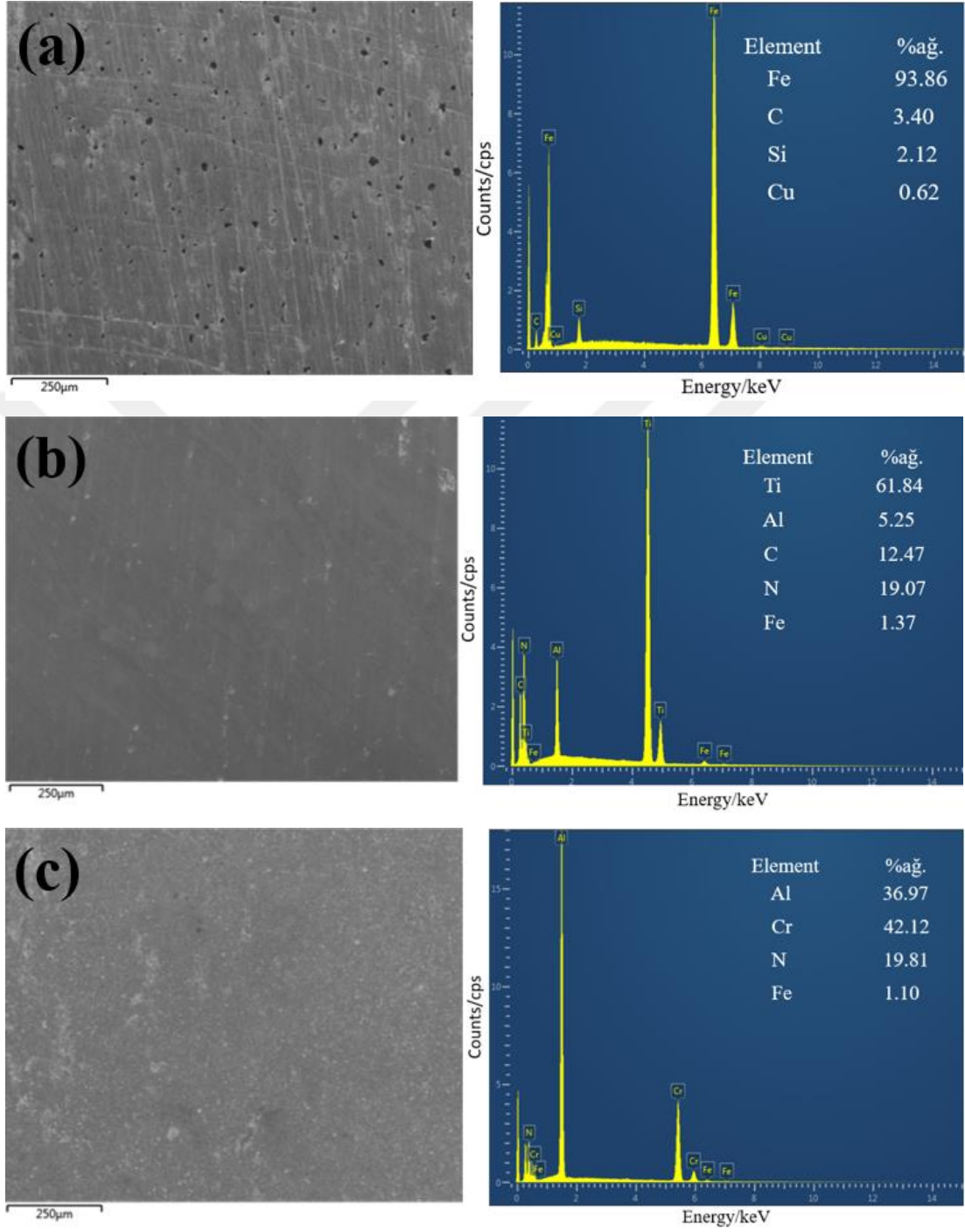
Şekil 6. 7. Yüzey Profilometre Cihazı

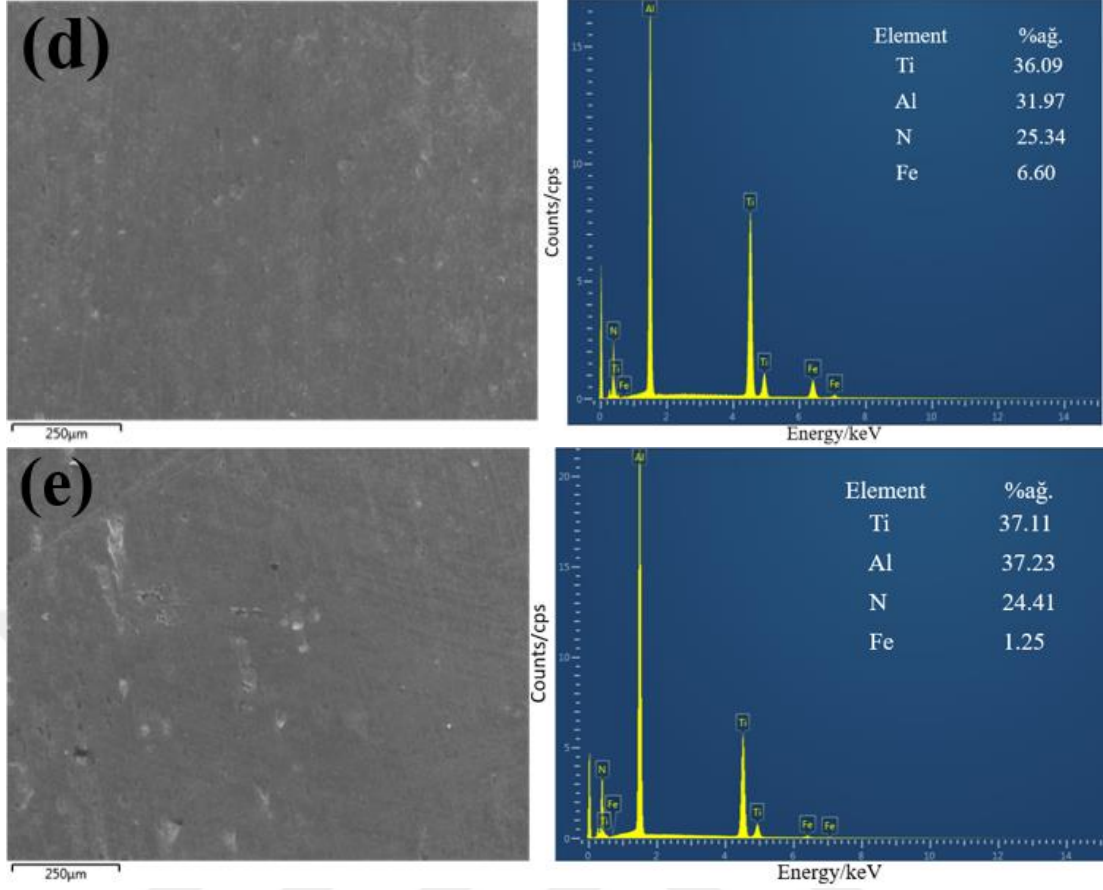
## 7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 7.1. Kimyasal Bileşim Analiz Sonuçları

EDX analizi ile elde edilen kaplama elementlerinin yüzdesel dağılımı Şekil 7.1'de gösterilmiştir. Kaplamasız numuneden dökme demire ait Fe, C, Si ve Cu elementleri belirlenmiştir (Şekil 7.1 (a)). Kaplama kalınlıklarının ince olmasından dolayı taban malzemedeki gelen Fe elementi tüm kaplama türü içinde görülmüştür. Elde edilmek istenen TiAlCN, AlCrN, tek ve çok katlı TiAlN kaplamaların analiz sonucunda istenilen kaplama elementlerine sahip olduğu belirlenmiştir. EDX analizi

ile elde edilen sonuçlar, hedeflenen bileşime sahip kaplamaların numune yüzeyinde başarıyla oluşturduğunu göstermektedir.



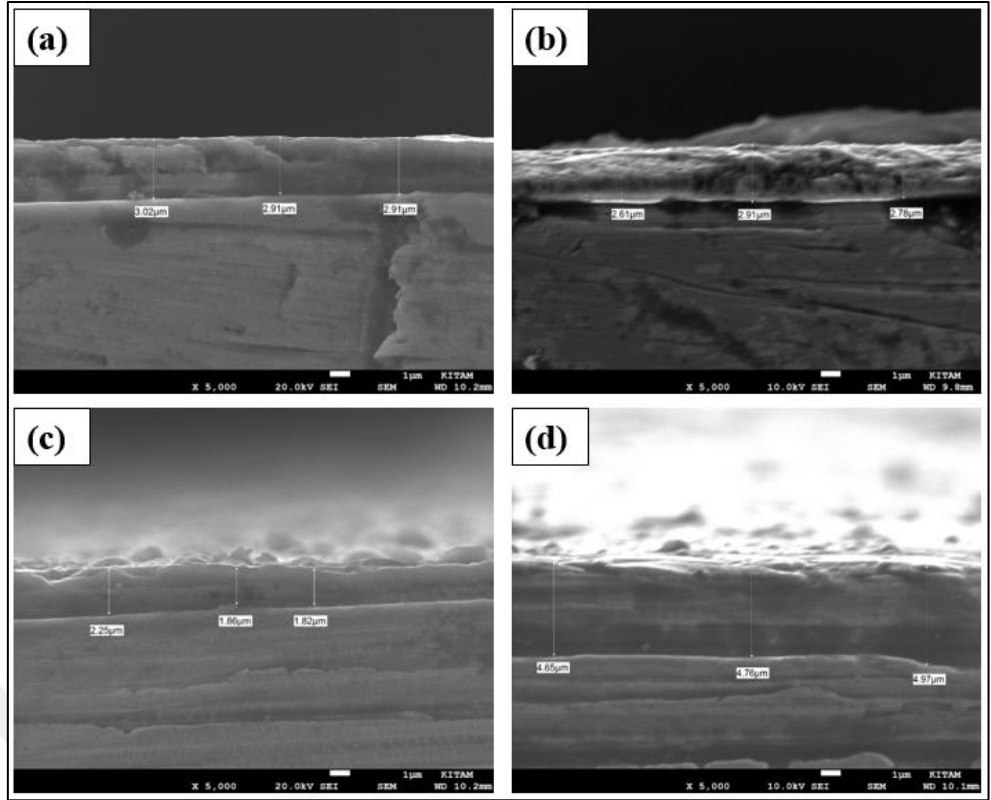


Şekil 7. 1. SEM/EDX analizi ile elde edilen element bileşimleri; a) kaplamasız b)TiAlCN, c) AlCrN, d) tek katlı TiAlN ve e) çok katlı TiAlN kaplama

## 7.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi Sonuçları

Yüzey işlemleri uygulanan segmanların kaplama kalınlıkları Şekil 7.2’de verilen yanal yüzeyden alınan SEM görüntüleri ile incelendi. Kaplama kalınlıkları üç farklı noktanın ortalaması alınarak belirlendi. İnceleme sonucunda, katodik ark PVD yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen TiAlCN, AlCrN, tek katlı TiAlN ve çok katlı TiAlN kaplamaların kalınlık değerleri sırasıyla 2,94µm, 2,76µm, 1,97µm ve 4,8µm bulunmuştur. Her kaplama için SEM görüntüleri incelendiğinde, kaplamaların dökme demir segmana iyi yapıştığı ve kaplamaların homojen olarak yapıldığını göstermektedir.



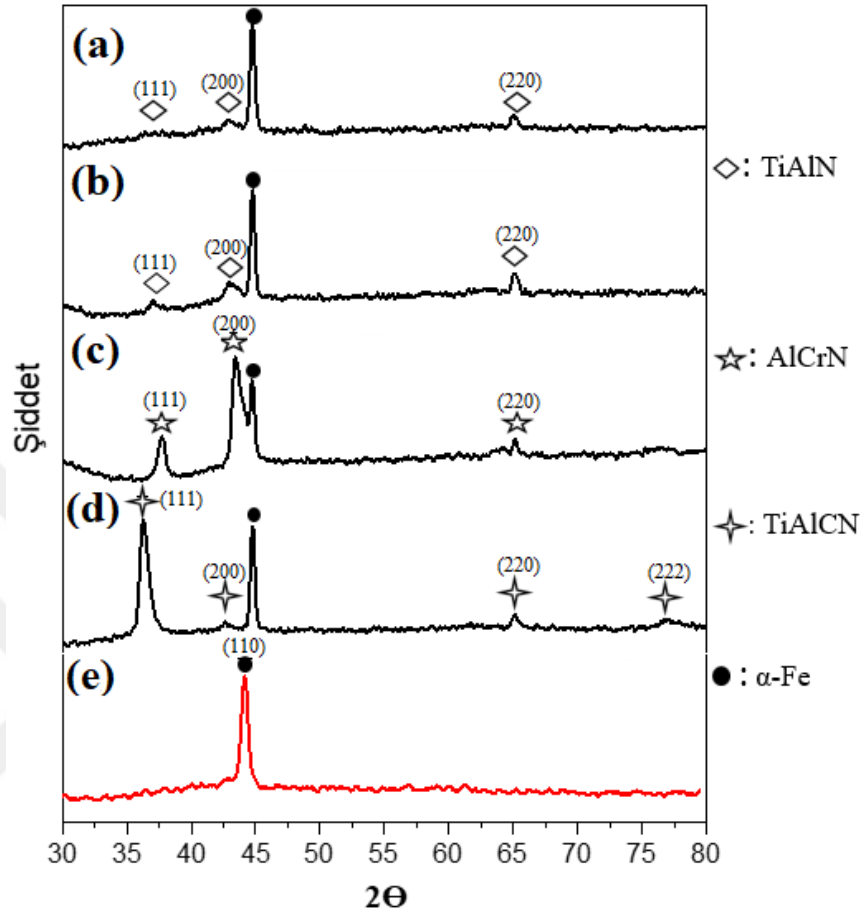


Şekil 7. 2. SEM kaplama kalınlığı ölçümü; a) TiAlCN, b) AlCrN, c) tek katlı TiAlN ve d) çok katlı TiAlN kaplama

### 7.3. XRD Analizi Sonuçları

Dökme demirden yapılmış taban malzeme ve seramik filmlerle kaplanmış numunelere ait XRD grafikleri Şekil 7.3’de verilmiştir. Grafiklerde yer alan piklerin kimliklerinin tespiti için literatürdeki benzer çalışmalar kullanılmıştır. Bunlar dikkate alınarak elde edilen kırınım desenlerindeki fazlar ve kırınım düzlemleri belirlenmiştir. Tüm numunelerin XRD eğrilerinde, kaplama kalınlıklarının düşük olması sebebiyle taban malzemedeki  $\alpha$ -Fe’den kaynaklanan  $44,65^\circ$  de (110) düzlemine ait kırınım piki gözlenmiştir (Idham vd., 2013). TiAlCN fazına ait  $36,19^\circ$ ,  $42,58^\circ$ ,  $65,12^\circ$  ve  $77,8^\circ$  de oluşan pikler sırasıyla (111), (200), (220) ve (222) düzlemlerine atfedilmiştir (Klimovich vd., 2018). AlCrN fazına ait  $37,78^\circ$ ,  $43,30^\circ$  ve  $65,22^\circ$  de meydana gelen piklerin sırasıyla (111), (200) ve (220) düzlemlerine ait olduğu gözlenmiştir (Birol., 2013). TiAlN kaplamalardan alınan XRD deseninde ise  $37,4^\circ$ ,  $42,91^\circ$  ve  $65,24^\circ$  de elde edilen piklerin sırasıyla (111), (200) ve (220) düzlemlerine ait olduğu belirlenmiştir (Kamenetskih vd., 2015). Kalınlığa bağlı olarak, çok katlı kaplamanın pik yoğunluğunun (111), (200) ve (220) düzlemlerinde tek tabakalı kaplamaya göre arttığı bulunmuştur. XRD sonuçlarının, literatür ile

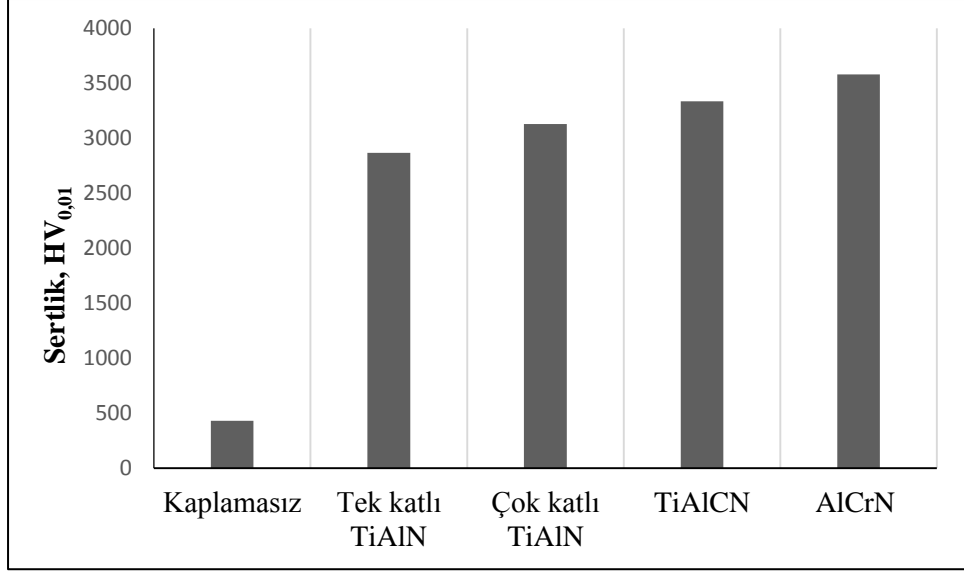
uyumlu olduğu ve ilgili kaplama türleri için beklenen fazların oluştuğu gözlenmiştir. Kaplamaların dökme demir yüzey üzerinde başarıyla kaplandığı belirlenmiştir.



Şekil 7. 3. Numunelere ait XRD grafikleri; a) tek katlı TiAlN, b) çok katlı TiAlN, c) AlCrN, d) TiAlCN, ve e) dökme demir

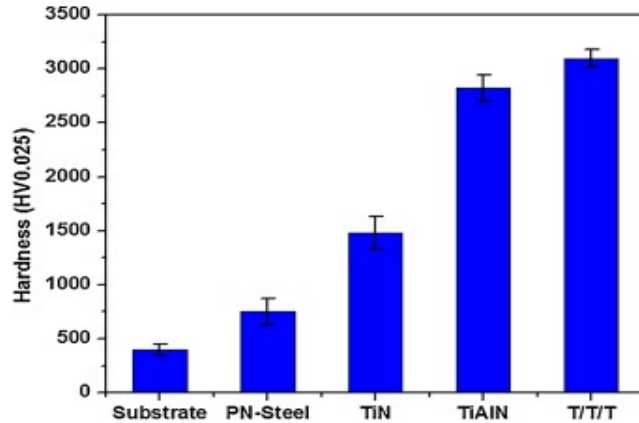
#### 7.4. Mikro-Sertlik Testi Sonuçları

Taban malzeme üzerine kaplaması gerçekleştirilen seramik filmlerin mikrosertlik değerleri Şekil 7.4' de verilmiştir. En düşük sertlik değeri taban malzemeden elde edilmiş olup, sertlik değeri yaklaşık olarak  $429 \pm 13 \text{ HV}_{0,01}$  olarak ölçülmüştür. Farklı seramik filmler ile kaplanan numunelerin sertliğinin, taban malzemenin sertliğine göre 6-8 kat arttığı görülmüştür. TiAlCN, AlCrN, tek ve çok TiAlN kaplanmış numunelerin sertlik değerleri sırasıyla  $3334 \pm 35$ ,  $3580 \pm 46$ ,  $2866 \pm 25$  ve  $3129 \pm 15 \text{ HV}_{0,01}$  olarak ölçülmüştür. En yüksek sertlik değeri AlCrN kaplı numuneden elde edilmiştir.



Şekil 7. 4. Numunelerin sertlik değerleri

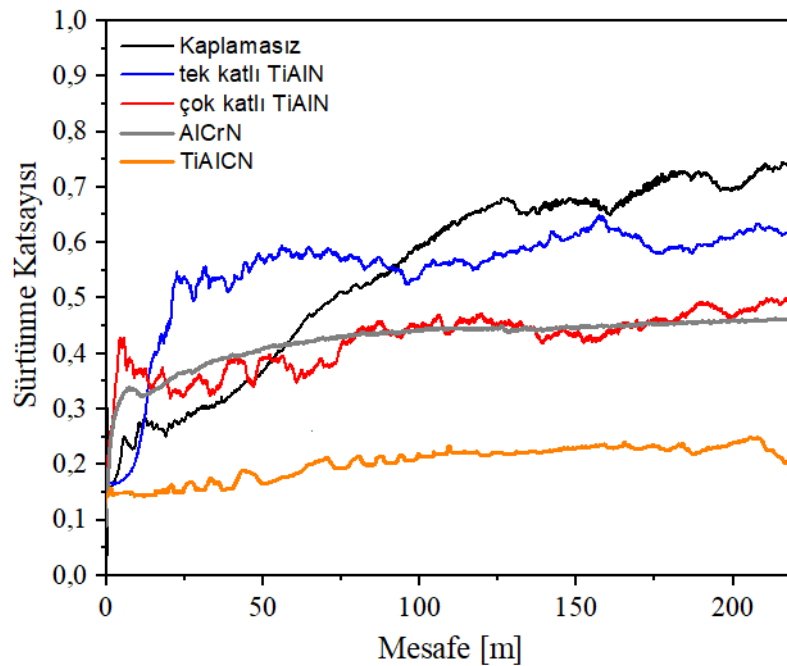
Benzer sonuçlar gösteren çalışmalar incelendiğinde; Birol, PVD yöntemi ile AISI H13 sıcak iş takım çelik yüzeyine AlCrN kaplamış ve sertlik değerini  $3514 \pm 112$  HV olarak bildirmiştir (Birol, 2013). Zhang vd. de PVD yöntemini kullanarak, Si plakalar üzerinde gerçekleştirdikleri TiAlCN kaplamaların, artan nitrojen akışı ile sertlik değerlerinin arttığını ve en yüksek sertlik değerini 3080 HV olarak raporlamışlardır (Zhang vd., 2009). Tek katlı TiAlN kaplamaya kıyasla çok katlı TiAlN kaplama numunelerinde daha yüksek sertlik değeri elde edilmiştir. Elmkhah vd. de çelik substratlar üzerinde biriktirdikleri tek ve çok katlı TiAlN kaplamalarının sertlik değerlerini sırasıyla 2820 ve 3150 HV olarak raporlamışlardır (Şekil 7.5) (Elmkhah vd., 2018). Sonuçta çok katmanlı TiAlN kaplamanın tek katmanlı TiAlN kaplamaya göre sertliğinin arttığı ve literatürle benzer sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür.



Şekil 7. 5. Çelik substrat, plazma nitrürlü çelik, TiN, tek ve çok katlı TiAlN kaplamalarının sertlik değerleri (Elmkhah vd., 2018)

## 7.5. Sürtünme Katsayısı Sonuçları

Dökme demir taban malzeme üzerine kaplanmış farklı seramik malzemelerin ve kaplamasız numunenin Mesafe-Sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.6'da verilmiştir. Başlangıçta tüm kaplamaların daha düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahip olduğu ancak mesafesinin uzamasıyla birlikte sürtünme katsayılarının da arttığı görülmüştür. Bu durum kayma mesafesinin uzamasıyla artan aşınma sonucu alümina bilye ile kaplamalar arasındaki temas alanının artması nedeniyle sürtünme katsayılarının arttığını göstermiştir (Çalışkan vd., 2014). Alınan yol arttıkça, en yüksek sürtünme katsayısı değeri ( $\mu=0,70$ ) kaplamasız numunenede gözlenmiştir. Bunun nedeni, plastik deformasyonun bir sonucu olarak artan demir oksit kalıntıları ve yüzeyin pürüzlülüğündeki artış olarak tanımlanabilir. Aşınma testi sonrasında kaplanmamış numunenin aşınmış yüzeyinden alınan SEM ve EDX analizleri, yüzeyde oksidasyonun oluştuğunu kanıtlamıştır (Şekil 7.9). Ayrıca sürtünme katsayısı eğrileri incelendiğinde, tek ve çok katlı TiAlN kaplamalarda aşırı dalgalanma olduğu görülmektedir. Bu duruma, filmlerin kırılması ve yüzeyde oluşan oksidasyon kalıntıları neden olmuştur. TiAlCN, AlCrN, tek ve çok katlı TiAlN kaplamalarının sürtünme katsayıları sırasıyla 0,21, 0,43, 0,60 ve 0,45 olarak bulunmuştur. Taban malzemeye kıyasla seramik kaplamaların daha düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı değeri TiAlCN ile kaplanmış numuneden elde edilmiştir.



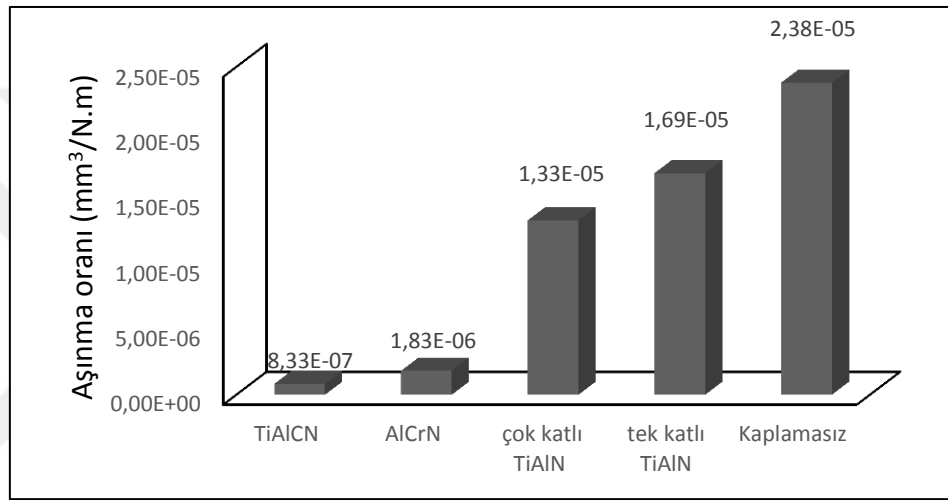
#### Şekil 7. 6. Numunelerin sürtünme katsayısı grafikleri

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, sürtünme katsayısının kaplamaların içeriğindeki C miktarı ile değiştiği görülmektedir (Zeng vd., 2015; Tillmann vd., 2020; Zhang vd., 2008). Zhang vd. TiAlCN kaplamalar üzerinde karbon içeriğinin etkisini araştırmışlardır. Yapılan bu çalışmada karbon içeriğinin arttırılması ile birlikte sürtünme katsayısının 0,8'den 0,19'a düştüğü ve %26,69 dan daha fazla karbon ilavesi ile sürtünme katsayısının yaklaşık 0,18-19 arasında sabit bir değerde kaldığı raporlanmıştır (Zhang vd., 2008). Lackner vd. çalışmalarında kuru kayma ve oda koşullarında 10 N yük, 200 m kayma mesafesi ve 0,1 m/s kayma hızında, TiAlCN kaplama için sürtünme katsayısı değerinin 0,20 olduğunu bulmuşlardır (Lackner vd., 2004). Mo vd., AlCrN kaplama için aynı ortam koşullarında, 10 N yük ve 100 m kayma mesafesinde yaptıkları aşınma testi sonucunda kaplamanın sürtünme katsayısı değerini 0,47 olarak raporlamışlardır (Mo vd., 2008). Çok katlı TiAlN kaplamanın tek katlı TiAlN kaplamadan daha düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahip olduğu gözlenmiştir. Li vd. çalışmalarında, martensitik paslanmaz çelik üzerinde farklı katman sayılarından oluşan çok katmanlı TiAlN kaplamanın biriktirilmesiyle benzer bir sonuç raporlamışlardır. Sonuçlar, artan katman sayısı nedeniyle sürtünme katsayısının 0,70'den 0,40'a düştüğünü göstermektedir (Li vd., 2019). Elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

#### 7.6. Aşınma Oranı Sonuçları

Kaplamasız ve kaplanmış numunelerin aşınma oranları Şekil 7.7'de gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlar neticesinde en yüksek aşınma oranı değeri kaplanmamış numunede olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni, hem sertliğinin az olması hem de sürtünme ısıyla oluşan demir oksit parçacıkların dayanımı düşürmesidir. Al içeren kaplamaların aşınma dirençlerinin yüksek olması oluşan alüminyum oksit tabakasına, yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayılarına sahip olmalarına bağlanmıştır. Aşınma direncinde en iyi sonucu kaplamasız numuneye kıyasla yaklaşık olarak %97 oranında, aşınma oranındaki azalma ile TiAlCN kaplı numune de tespit edilmiştir. Numunelerin aşınma oranlarıyla sürtünme katsayıları paralellik göstermiştir. Kısacası düşük sürtünme katsayısına sahip kaplamanın daha az aşındığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar SEM ve EDX analizleri ile desteklenmiştir. Kaplamaların aşınma oranlarının sürtünme katsayıları ile paralellik

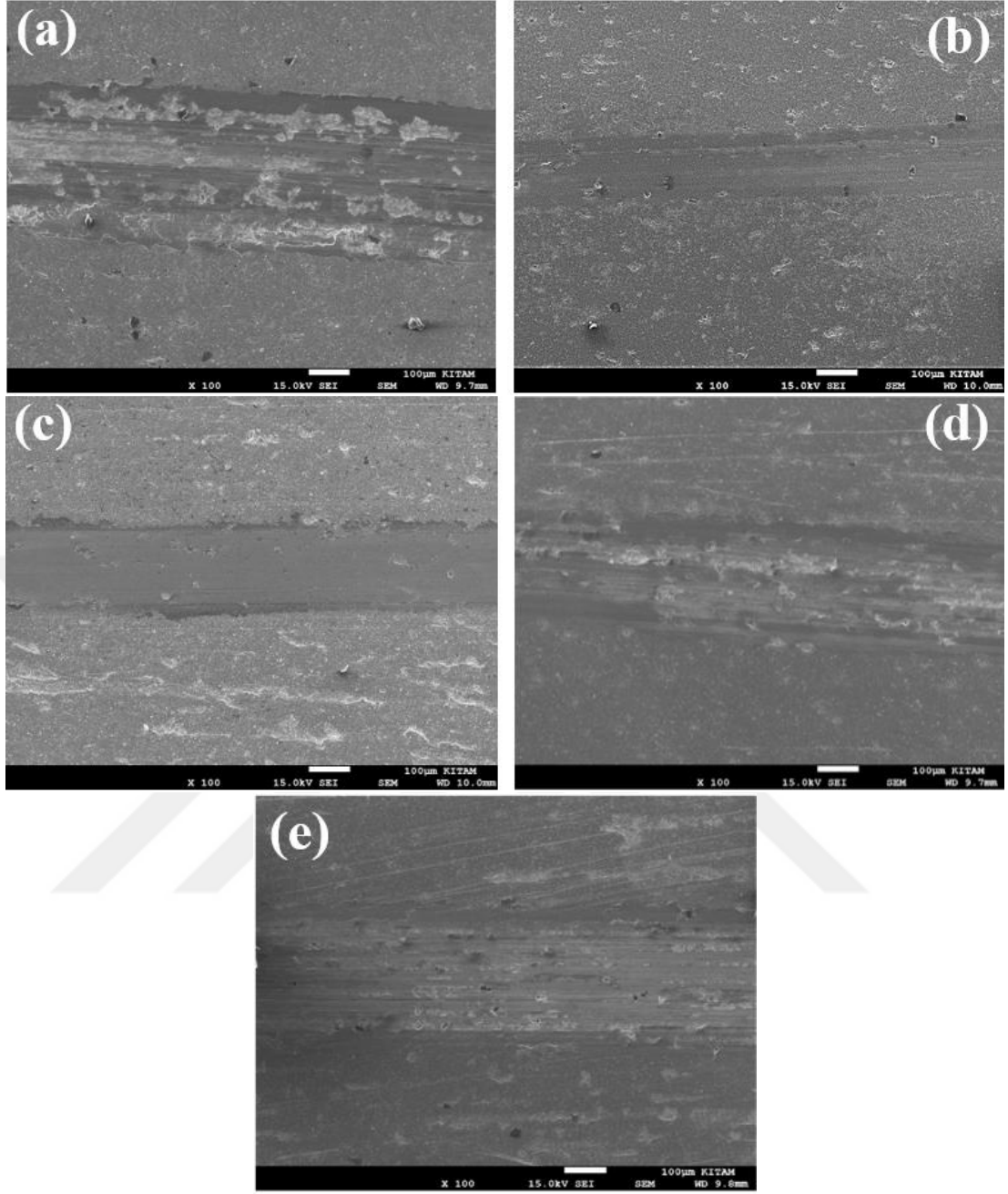
gösterdiği benzer sonuçlar literatürde yer alan çalışmalarla desteklenmektedir. Lackner'ın yapmış olduğu çalışmada sürtünme katsayısı düşük olan TiAlCN ( $\mu=0,20$ ) kaplamalı numunenin TiAlN ( $\mu=0,70$ ) göre daha az aşındığı raporlanmıştır. Daha düşük sürtünme katsayısına sahip olan kaplamanın daha iyi aşınma direnci gösterdiği tespit edilmiştir (Lackner vd., 2004). Benzer sonuçları Souza' da bulmuştur. Bu çalışmada da AlCrN ve TiAlN kaplamaların tribolojik özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, daha düşük sürtünme katsayısına sahip olan AlCrN ( $\mu=0,50$ ) kaplamanın aşınma direncinin TiAlN ( $\mu=0,78$ ) kaplamaya göre daha iyi olduğunu göstermiştir (Souza vd., 2020).



Şekil 7. 7. Numunelerin aşınma oranları

### 7.7. Aşınma İzi SEM Görüntüleri ve EDX Analizi

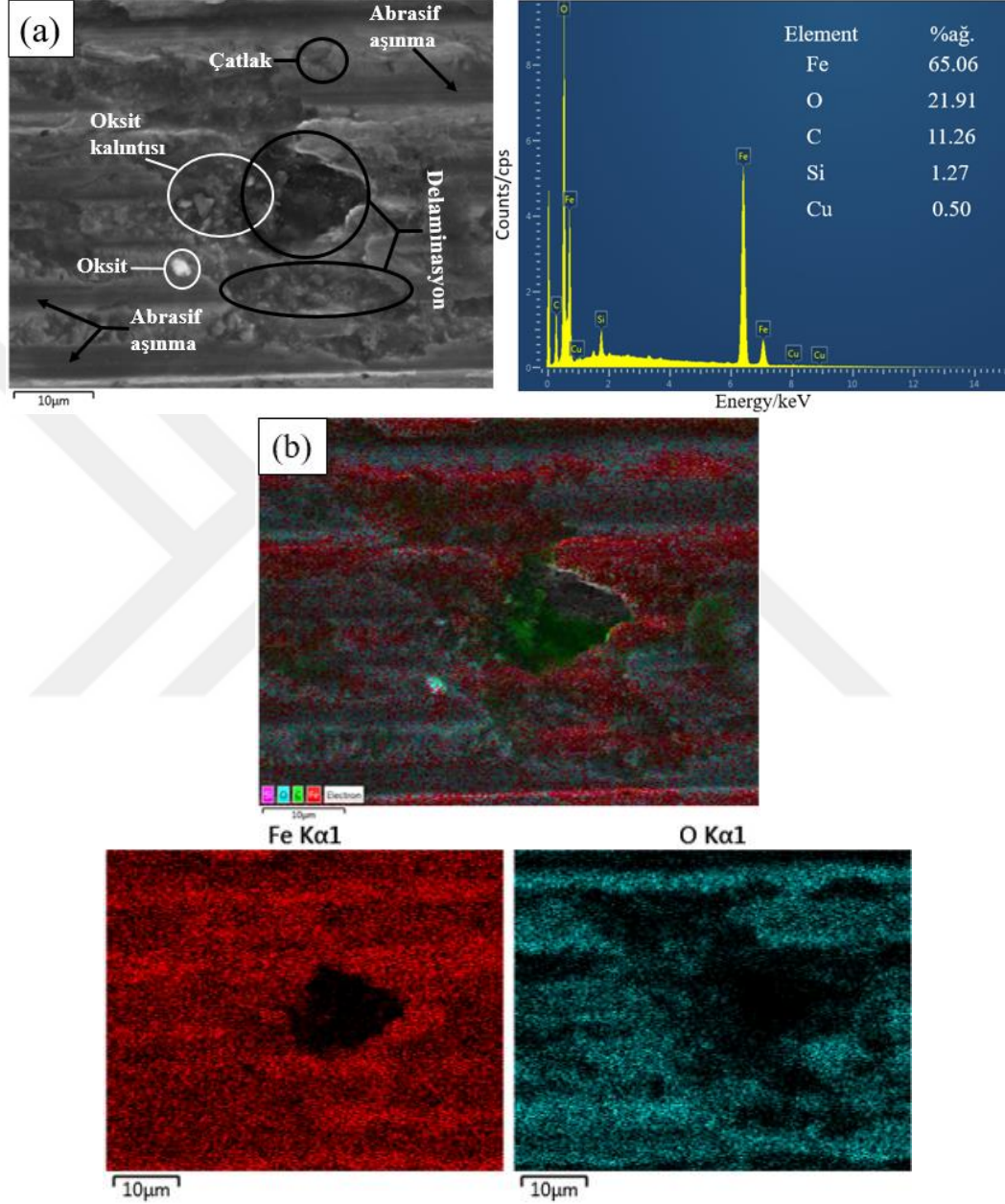
Aşınma testleri sonucunda numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma izi SEM görüntüleri Şekil 7.8 de verilmiştir. Elde edilen görüntüler incelendiğinde aşınma oranı sonuçlarına paralel olarak en geniş aşınma izi kaplamasız numunede görülmüştür. En dar aşınma izi TAICN kaplı numunede tespit edilmiştir. Kaplamaların aşınma izi genişlikleri, kaplamasız numuneye kıyasla önemli bir azalma göstermiştir.



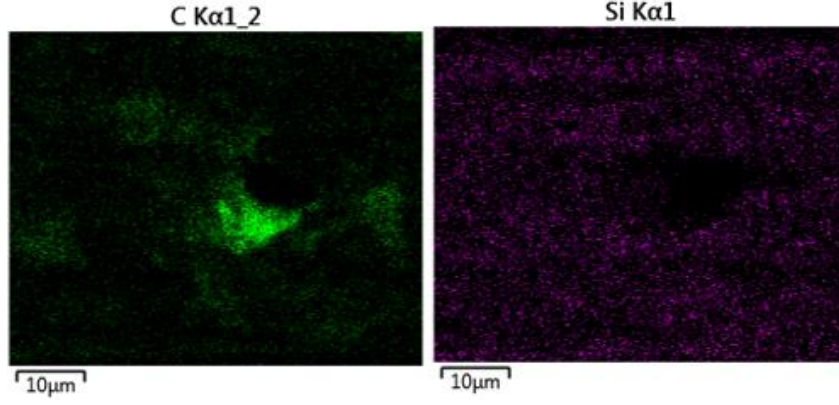
Şekil 7. 8. Aşınma izlerinin SEM görüntüleri; a) Kaplamasız, b) TiAlCN, c) AlCrN d) Tek katlı TiAlN ve e) Çok katlı TiAlN

Şekil 7.9’da taban malzemenin aşınma bölgesinden alınan SEM görüntüsü ve EDX analizi sonuçları verilmiştir. Elde edilen SEM görüntüsünde taban malzemenin yüksek plastik deformasyona uğradığı gözlenmiştir (Şekil 7.9 (a)). Bu durumun, sürtünmenin neden olduğu ısı yükselişine bağlı olarak oluşan demir oksitin dayanımı düşürmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Cho ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada da benzer bir sonuca ulaşılarak, metal yüzeylerde meydana gelen demir oksitin yüksek sürtünmeye neden olduğu tespit edilmiştir (Cho vd., 2013). EDX analizinde oksit oluşumunun tespit edilmesi bu durumu doğrulamaktadır.

Sürtünme olayı devam ettikçe adhesif aşınmayla oluşan demir oksit kalıntıları aşınmanın daha da artmasına neden olan abrasif aşınmayı ortaya çıkarmıştır. Ayrıca yüzeyde delaminasyonlar nedeniyle derin oyukların oluştuğu gözlenmiştir.

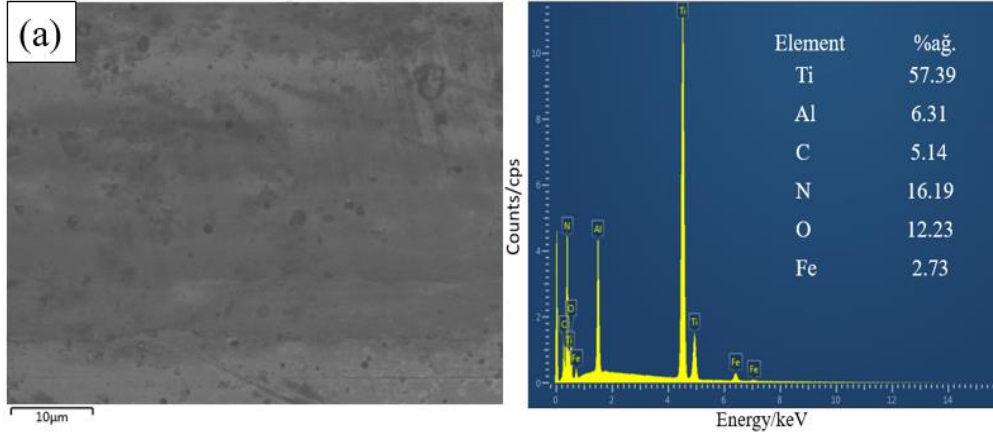


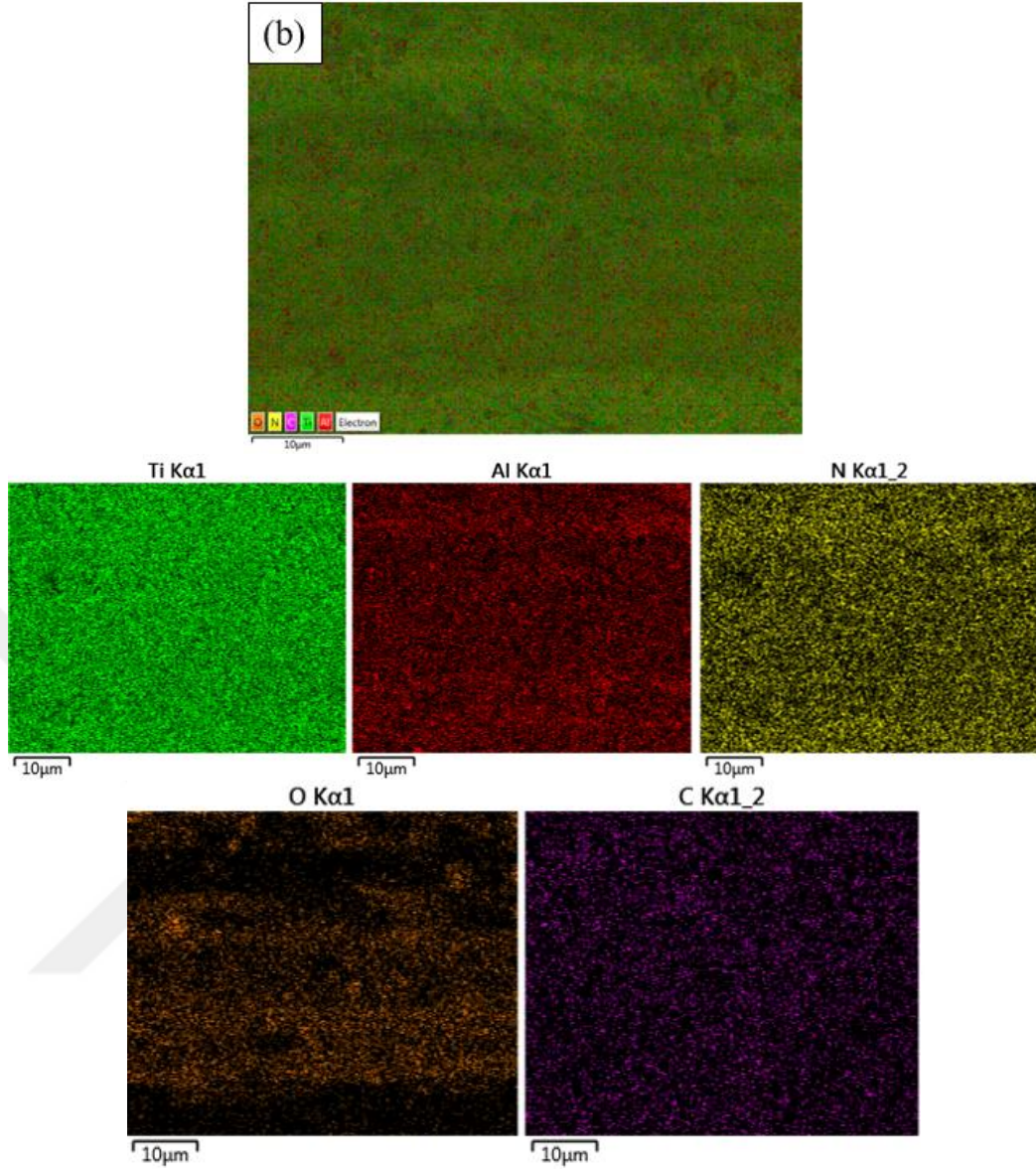




Şekil 7. 9. Kaplamasız numunenin aşınan bölgesinden alınan a) SEM görüntüsü ve EDX analizi b) EDX haritası

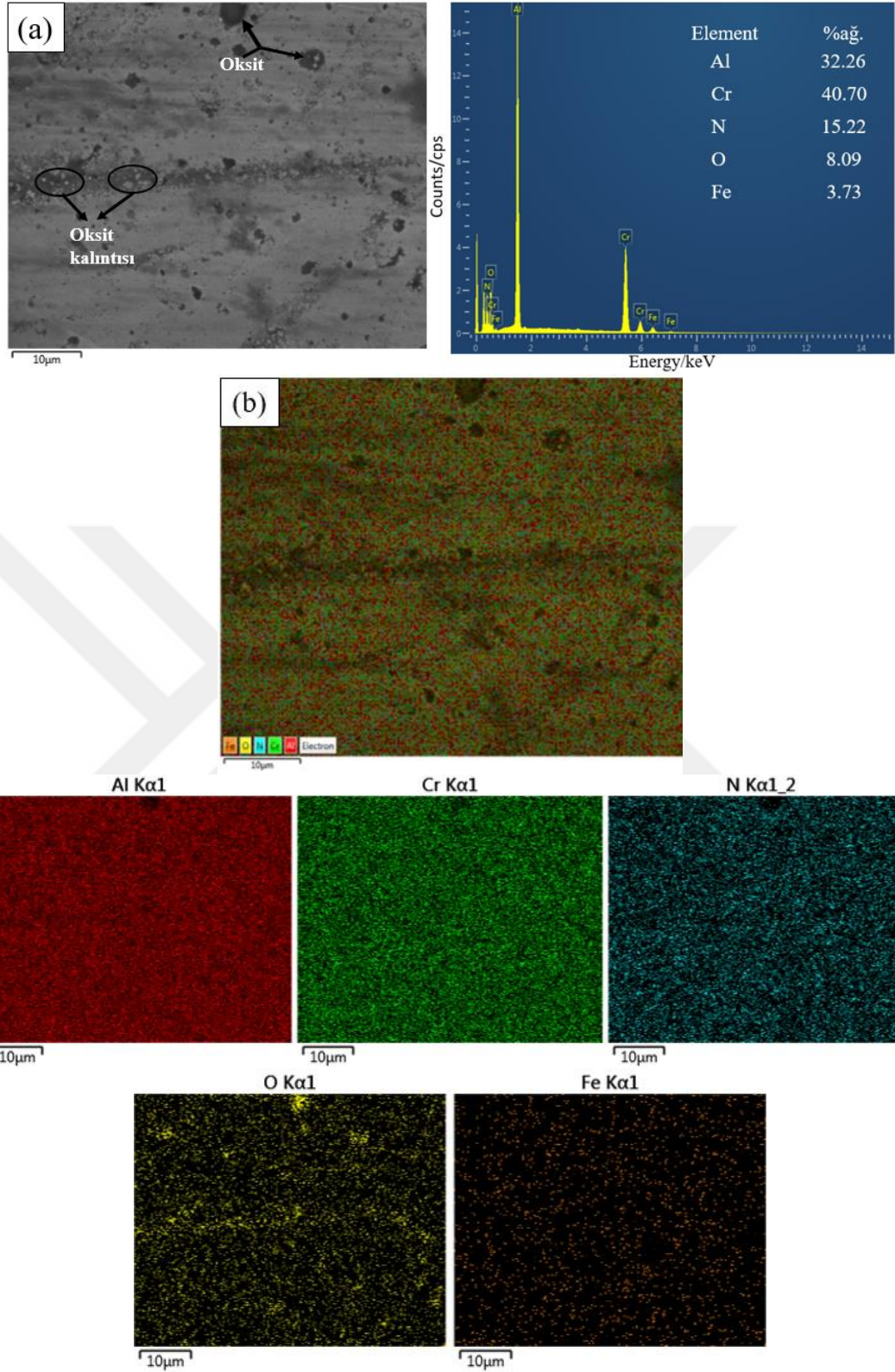
TiAlCN kaplamanın aşınma bölgesinden alınan SEM görüntüsü ve EDX analizi sonuçları Şekil 7.10'da gösterilmiştir. Elde edilen SEM görüntüsü bilyanın taban malzemeye inmediğini, kaplamanın taban malzeme yüzeyini koruduğunu göstermektedir (Şekil 7.10 (a)) EDX analizinde kaplama elementlerinin yüksek bulunması bu durumu desteklemektedir. EDX haritasına bakıldığında, Ti, Al, N, O ve C elementlerinin homojen bir şekilde yüzeyde dağıldığı görülmektedir (Şekil 7.10 (b)). Yüzeyde meydana gelen alüminyum oksit tabakasının bozulmadığı bu nedenle de kaplamanın taban malzemeyi koruduğu söylenebilir.





Şekil 7. 10.TiAlCN kaplı numunenin aşınma bölgesinden alınan a) SEM görüntüsü ve EDX analizi b) EDX haritası

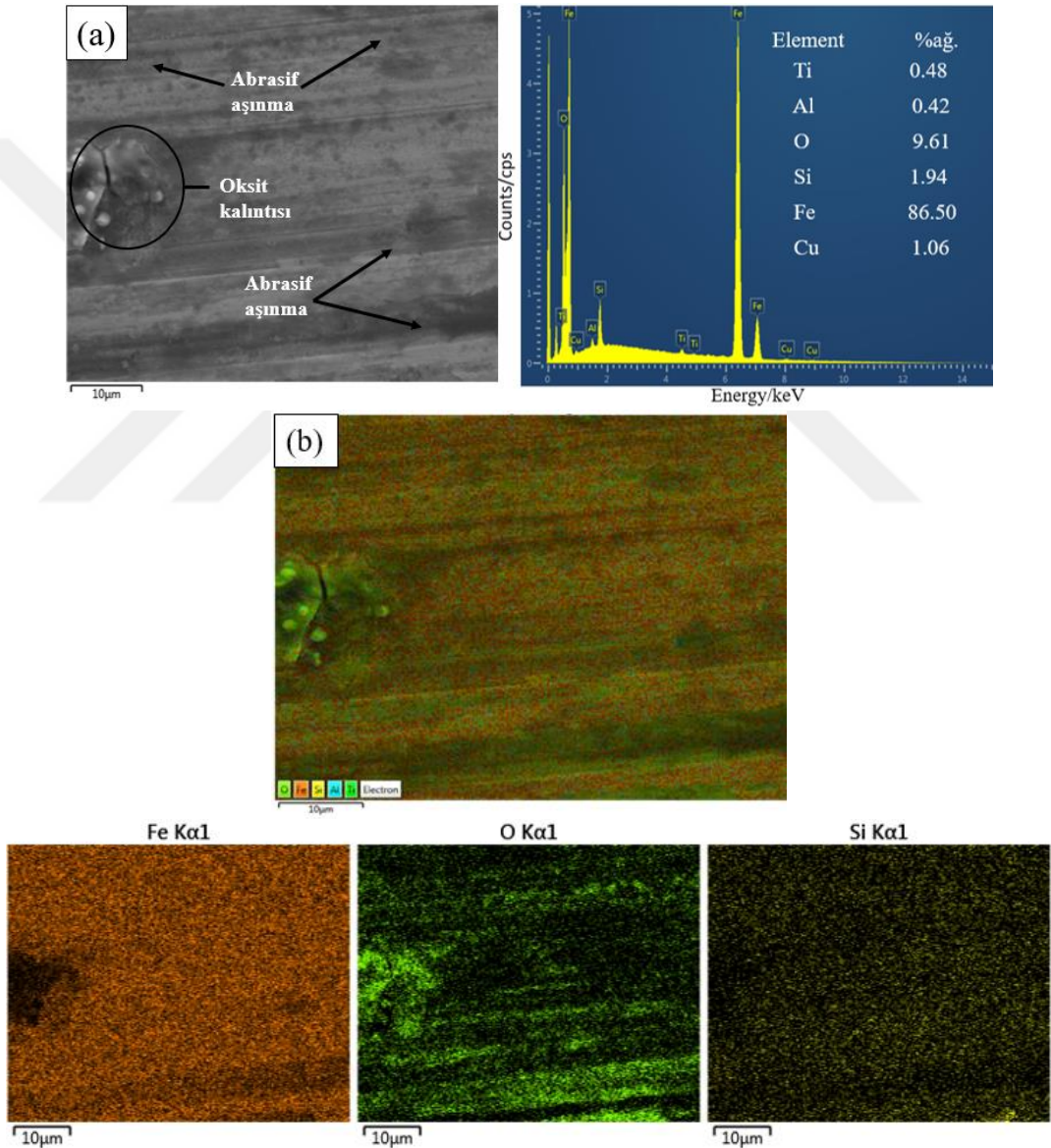
Şekil 7.11’de AlCrN kaplamaya ait aşınma bölgesinden alınan SEM görüntüsü ve EDX analizi sonuçları verilmiştir. AlCrN kaplı numunede, sürtünme ısısı nedeniyle aşınma hattı üzerinde adhesif aşınmanın neden olduğu oksit kalıntılarının oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 7.11 (a)). EDX analizi sonucunda kaplama elementlerinin %ağ.’nın yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum kaplamanın taban malzemeyi koruduğunu desteklemektedir.

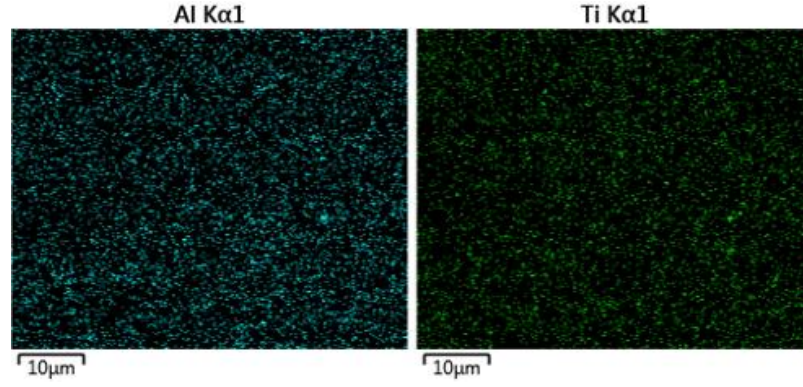


Şekil 7. 11. AlCrN kaplı numunenin aşınma bölgesinden alınan a) SEM görüntüsü ve EDX analizi b) EDX haritası

Tek katlı TiAlN kaplamanın aşınma bölgesinden alınan SEM görüntüsü ve EDX analizi sonuçları Şekil 7.12'de gösterilmiştir (Şekil 7.12 (a)). EDX analizi sonucuna göre aşınma hattında kaplama elementlerinin neredeyse kalmadığı

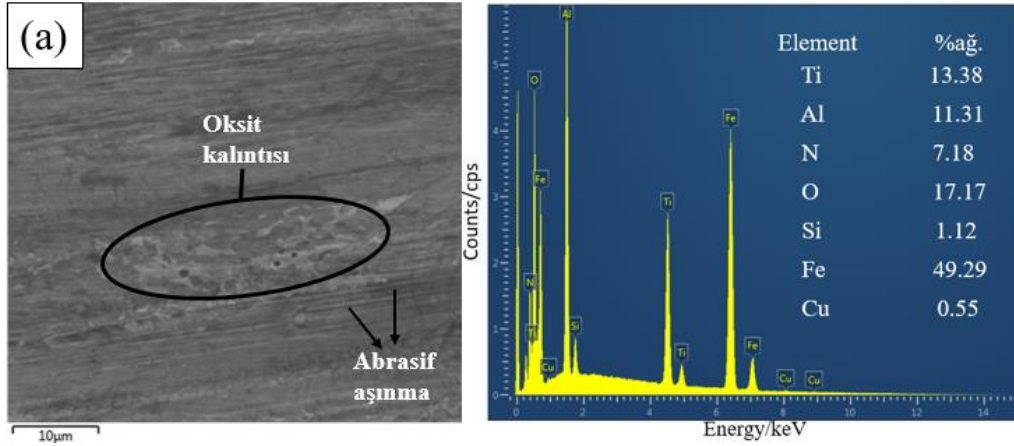
gözlenmiştir. Azalan alüminyumun bir sonucu olarak alüminyum oksit tabakasının tamamen bozulduğu ve artık yüzeyi korumadığı söylenebilir. Bu nedenle de artan demir oksit miktarı yüzeyin daha fazla aşınmasına neden olmuştur. Adhesif aşınmayla oluşan oksit kalıntılarının neden olduğu abrasif aşınmalar yüzeyde derin ve derin olmayan çizgiler şeklinde görülmüştür. EDX haritası ile kaplama elementlerinin yüzeydeki dağılımının oldukça azaldığı belirlenmiştir. Aşınmanın daha da artmasına neden olacak demir oksitlerin yüzeyde homojen olarak dağıldığı görülmüştür (Şekil 7.12 (b)).

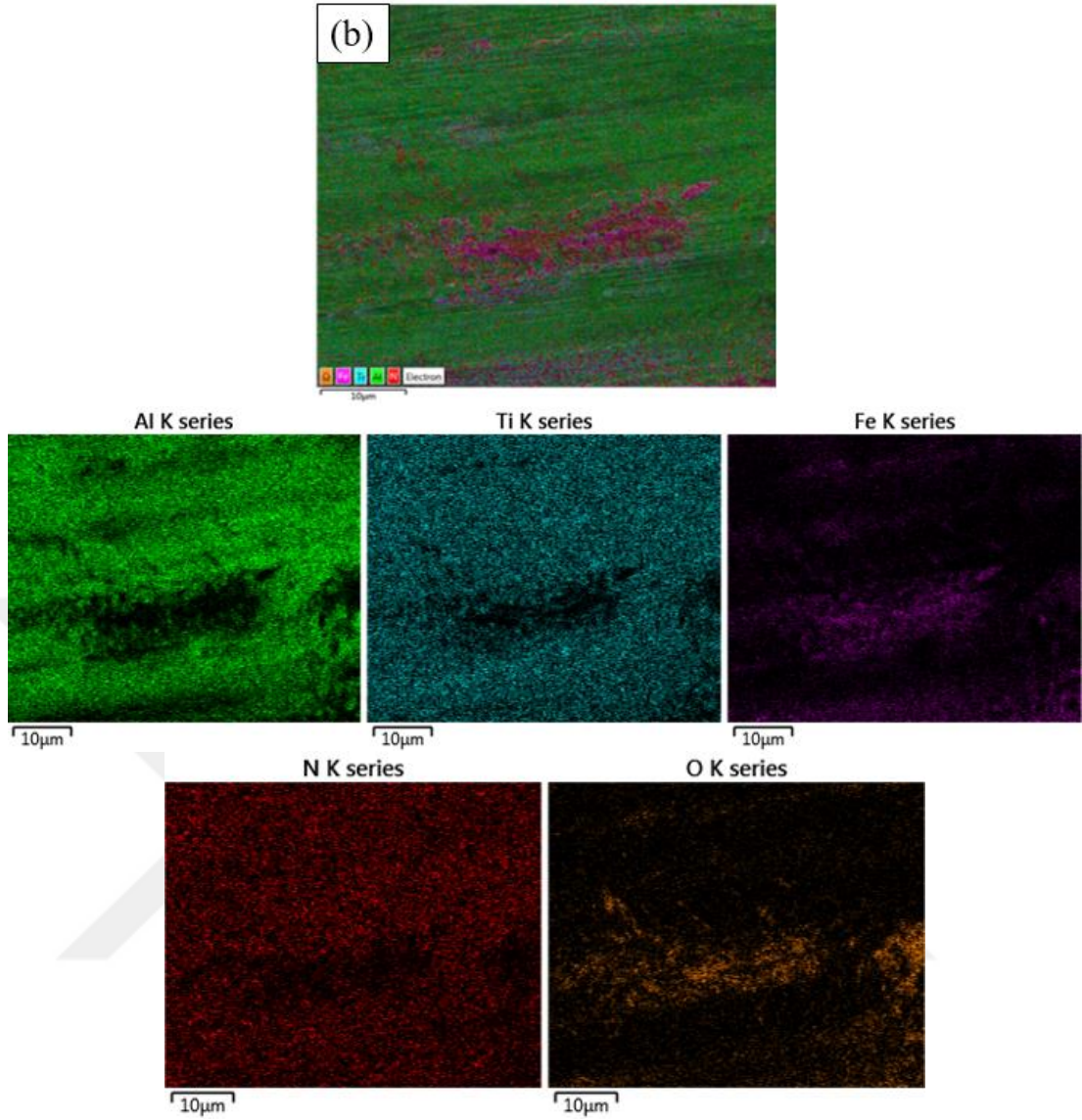




Şekil 7. 12. Tek katlı TiAlN kaplı numunenin aşınma bölgesinden alınan a) SEM görüntüsü ve EDX analizi b) EDX haritası

Çok katlı TiAlN kaplamanın aşınma bölgesinden alınan SEM görüntüsü ve EDX analizi sonuçları Şekil 7.13’de verilmiştir (Şekil 7.13 (a)). Elde edilen SEM görüntüsü tek katlı TiAlN kaplamayla karşılaştırıldığında oluşan abrasif aşınma çizgilerinin çok derin olmadığını göstermiştir. Çok katlı TiAlN kaplamanın aşınmış yüzeyinden alınan EDX verileri, tek katlı kaplamaya göre daha yüksek dayanıma sahip olduğunu göstermektedir. EDX haritasında da görüldüğü 220 m aşınma sonucunda yüzeyde bulunan TiAlN kaplamanın tamamen ayrılmadığı gözlenmiştir. Bu da numunenin daha az aşınmasına neden olmuştur.





Şekil 7. 13. Çok katlı TiAlN kaplı numunenin aşınma bölgesinden alınan a) SEM görüntüsü ve EDX analizi b) EDX haritası

Numunelere ait, aşınan bölgelerin üzerinde gerçekleştirilen EDX analizi sonucunda TiAlCN ve AlCrN kaplamalarının 220 m kayma mesafesi için taban malzeme yüzeyini koruduğu belirlenmiştir. TiAlCN ve AlCrN kaplamaların aşınma bölgelerinden alınan EDX analizinde, oluşan koruyucu oksit tabakanın bozulmadan kaldığı ve bu nedenle de kaplamaların taban malzemeyi koruduğu düşünülmektedir. Tek katlı TiAlN kaplamanın aşınma bölgelerinden alınan EDX analizi sonucuna göre koruyucu oksit tabakasının tamamen bozulduğu aşınmanın artmasına neden olan demir oksit miktarının arttığı ve kaplamanın artık taban malzeme yüzeyini korumadığı görülmüştür. Çok katlı TiAlN kaplamanın aşınmış bölgesinden alınan EDX analizinde ise kaplama elementlerinin %ağ.'nın tek katlı TiAlN kaplamaya göre daha yüksek bulunması kaplamanın taban malzemedan tamamen ayrılmadığını

göstermektedir. Sürtünme kaynaklı ısı yükselişine bağlı olarak oluşan demir oksitler kaplamanın aşınmasının artmasına neden olurken seramik yüzeylerde oluşan koruyucu oksit tabakası bozularak yüzeyden ayrılmadığı sürece kaplama yüzeyini koruduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Aşınma mekanizmaları incelendiğinde, kaplanmamış numunede delaminasyon nedeniyle derin oyukların oluştuğu ve abrasif aşınmanın baskın olduğu görülmüştür. TiAlCN kaplama da yüzeyin düzgün olması nedeniyle aşınma mekanizması tanımlanamamıştır. AlCrN kaplama da aşınma hattında adhesif aşınmayla oluşan oksit kalıntıları tespit edilmiştir. Tek katlı TiAlN kaplamada artan demir oksit miktarının bir sonucu olarak meydana gelen oksit kalıntıları yüzeyde abrasif aşınmanın hakim olmasına neden olmuştur. Çok katlı TiAlN kaplama tek katlı kaplamaya göre kıyaslandığında abrasif aşınma çizgilerinin yüzeysel olduğu gözlenmiştir. Çok katlı kaplamanın tek katlı kaplamaya göre daha iyi aşınma davranışına sahip olması daha yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı ve kalın kaplama tabakasına sahip olmasına bağlanmıştır.

## **8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

Bu tez çalışması, motorda enerji kaybına neden olan piston segmanlarının yüzey iyileştirmesini içermektedir. Bu amaca ulaşmak için, dökme demirden yapılmış piston segmanları, çevre dostu katodik ark PVD yöntemi kullanılarak TiAlCN, AlCrN, tek ve çok katlı TiAlN ile kaplanmıştır. Çalışma kapsamında kaplanmış numunelerin morfolojik özellikleri, mikro sertliği, sürtünme katsayısı, aşınma oranları ve aşınma mekanizmaları incelenmiştir. Bu çalışmaya dayanarak aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

- Piston segmanları, TiAlCN, AlCrN, tek ve çok katmanlı TiAlN kaplama ile homojen bir şekilde kaplanmıştır.
- TiAlCN, AlCrN, tek ve çok katmanlı TiAlN kaplamaların ortalama kalınlığının sırasıyla 2.94, 2.76, 1.97 ve 4.80  $\mu\text{m}$  olduğu belirlenmiştir.
- Mikro sertlik testi sonucunda, kaplamasız numuneye ( $429 \pm 13 \text{ HV}_{0.01}$ ) kıyasla kaplanan segman halkalarının sertliklerinde 6-8 katlık bir artış olduğu görülmüştür. En yüksek sertlik AlCrN kaplı numuneden ( $3580 \pm 46 \text{ HV}_{0.01}$ ) elde edilmiştir.
- Tek katlı TiAlN kaplamaya ( $2866 \pm 25 \text{ HV}_{0.01}$ ) kıyasla çok katlı TiAlN kaplama ( $3129 \pm 15 \text{ HV}_{0.01}$ ) numunelerinde daha yüksek sertlik değeri belirlenmiştir.
- Elde edilen sürtünme katsayılarına göre en düşük sürtünme katsayısı TiAlCN kaplı ( $\mu=0,21$ ) numunede olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni kaplamanın içeriğindeki karbonun sürtünme katsayısını düşürmesi ile ilgili olmasıdır.
- Kaplamasız, AlCrN, tek ve çok katlı TiAlN kaplanmış numunelerin sürtünme katsayı değerleri sırasıyla 0.70, 0.43, 0.60 ve 0.45 olarak bulunmuştur. Kaplamasız numuneye kıyasla seramik kaplamaların daha düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Aşınma oranları incelendiğinde, en yüksek aşınma oranı kaplamasız numune için bulunmuştur. Bunun nedeni, hem sertliğinin az olması hem de sürtünme ısıyla oluşan demir oksit kalıntılarının dayanımı düşürmesidir.
- Kaplamalar arasında en iyi aşınma direnci TiAlCN kaplamada belirlenmiştir. Kaplamasız numuneye kıyasla TiAlCN kaplı numunenin aşınma oranı  $\sim$  %97 azalmıştır. Aşınma direncinde en iyi bir diğer sonuç AlCrN kaplama için gözlenmiştir. Kaplamasız numuneye kıyasla aşınma oranı %92 azalmıştır.
- Tek ve çok katlı TiAlN kaplamaların aşınma oranları incelendiğinde kaplama kalınlığı arttıkça aşınma direncinin arttığı ortaya konulmuştur.
- Numunelerin aşınma oranlarıyla sürtünme katsayıları arasında paralellik görülmüştür. Düşük sürtünme katsayısına sahip kaplamanın daha az aşındığı tespit edilmiştir.
- Kaplamasız numuneye göre Al içeren kaplamaların aşınma dirençlerinin yüksek olması oluşan alüminyum oksit tabakasına, yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayılarına sahip olmalarına bağlanmıştır.



- Aşınma izleri incelendiğinde, kaplamasız numune için en geniş aşınma izi elde edilmiştir. Seramik malzemelerle kaplanan numunelerin iz genişliğinde ciddi bir azalma gözlenmiştir.
- Aşınma mekanizmaları incelendiğinde, kaplamasız numunede baskın abrasif aşınma ve delaminasyonun olduğu belirlenmiştir. Kaplanmış numunelerde ise tek katlı TiAlN kaplama için abrasif aşınmanın hakim olduğu görülmüştür.
- Bu tez çalışmasında, motorun önemli bir parçası olan dökme demir piston segmanına katodik Ark PVD metoduyla uygulanan farklı seramik kaplamaların, kaplanmamış numuneye göre daha üstün sürtünme katsayısı, sertlik ve aşınma direncine sahip oldukları tespit edilmiştir.
- Sonuç olarak farklı seramik malzemelerle kaplanan segmanların yüzey özellikleri iyileştirilmiştir.
  - Çalışmada oda sıcaklığında ve kuru ortamda yapılan aşınma testleri, yağlı ve sıcak ortamda tekrarlanarak segmanların gerçek çalışma koşullarındaki aşınma davranışları irdelenebilir.
  - PVD yöntemi ile elde edilen kaplamalarla hali hazırda satışta bulunan krom kaplı örneklerin aynı koşullarda yapılan aşınma özellikleri kıyaslanabilir.
  - PVD ile kaplanan motor elemanlarının, motor performans testleri yapılarak yağ ve yakıt sarfiyatı bakımından etkilerinin ne olduğu incelenebilir.
  - Emisyon testleri yapılarak çevreye olan etkileri üzerinde çalışmalar yapılabilir. Böylelikle kaplamaların gerçek performansları belirlenebilir.

## KAYNAKLAR

- Aihua, L., Jianxin, D., Haibing, C., Yangyang, C., and Jun, Z. (2012). *Friction and wear properties of TiN, TiAlN, AlTiN and CrAlN PVD nitride coatings*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 31, 82-88.
- Akgündüz., M. (2019). *Farklı malzemelerle kaplanmış segman-silindir çiftinin sürtünme ve aşınma özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 67, Sakarya.

- Alışır S., Çevik S. (2020). *The effects of foundry sand components on the cast iron*. Res. Eng. Struct. Mater., 6(2), 127-140.
- Akbal, T. (2014). *Fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemiyle yapılan alüminyum krom nitrid (AlCrN) ince film kaplamaların üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 113, İstanbul.
- Anonim (2017). *Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2017-2023*. Ankara.
- Aydın, Z. (2015). *Deniz taşıtlarında kullanılan farklı yağların segmansilindir çifti yüzeylerindeki tribolojik özelliklerine etki eden parametrelerin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, 84, İstanbul.
- Banerji, A., Bhowmick, S., & Alpas, A. T. (2014). *High temperature tribological behavior of W containing diamond-like carbon (DLC) coating against titanium alloys*. Surface and Coatings Technology, 241, 93-104.
- Becker, E. P. (2004). *Trends in tribological materials and engine technology*. Tribology International, 37(7), 569-575.
- Biröl, Y. (2013). *Sliding wear of CrN, AlCrN and AlTiN coated aısı H13 hot work tool steels in aluminium extrusion*. Tribology International, 57, 101-106.
- Blau, P. J. (2010). *Elevated-temperature tribology of metallic materials*. Tribology international, 43(7), 1203-1208.
- Boynueyri, D. (2019). *PVD yöntemi ile ince kaplanmış kesici takımların mikro ölçekli aşınma testi ile aşınma dayanımının belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 114, Bartın.
- Bozkurt, T. (2006). *TiN, TiAlN ve AlTiN kaplamaların aşınma performanslarının incelenmesi ve farklı altlık malzemede tin kaplamanın etkisinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Gebze Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, 67, Gebze.
- Bozyazı, E., Ürgen M., and Çakır A. F. (2004). *Comparison of reciprocating wear behaviour of electrolytic hard chrome and arc-pvd CrN Coatings*, Wear, 256, 832-839.
- Bull, S. J. (2006). *Physical vapour deposition methods for protection against wear*. Surface coatings for protection against wear, 146-183.
- Buyukkaya, E., and Cerit, M. (2007). *Thermal analysis of a ceramic coating diesel engine piston using 3-D finite element method*. Surface and coatings technology, 202(2), 398-402.
- Caliskan, H., Panjan, P., and Kurbanoglu, C. (2017). *Hard coatings on cutting tools and surface finish*. Comprehensive Materials Finishing, 3, 230-242
- Chim, Y. C., Ding, X. Z., Zeng, X. T., & Zhang, S. (2009). *Oxidation resistance of TiN, CrN, TiAlN and CrAlN coatings deposited by lateral rotating cathode arc*. Thin Solid Films, 517(17), 4845-4849.
- Cho, C. W., and Lee, Y. Z. (2003). *Effects of oxide layer on the friction characteristics between TiN coated ball and steel disk in dry sliding*. Wear, 254(3-4), 383-390.
- Cho, D.H. and Lee, Y.Z. (2009). *Evaluation of ring surfaces with several coatings for friction, wear and scuffing life*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 19(4), 992-996.

- Comfort, A. (2003). *An introduction to heavy-duty diesel engine frictional losses and lubricant properties affecting fuel economy Part I*, SAE Technical Paper Series, 2003-01-3225.
- Çakır, U. (2007). *Seramik kaplı bir dizel motor yanma odasının termal analizi*. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 64, Sakarya.
- Çalışkan, M. (2005). *Katodik ark pvd yöntemiyle ZrN ve Zr/ZrN kaplamaların biriktirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 103, İstanbul.
- Çalışkan, H., Panjan, P., and Paskvale, S. (2014). *Monitoring of wear characteristics of TiN and TiAlN coatings at long sliding distances*. Tribology Transactions, 57(3), 496-502.
- Dejun, K., and Haoyuan, G. (2015). *Friction-wear behaviors of cathodic arc plating AlTiN coatings at high temperatures*. Tribology international, 88, 31-39.
- Dhokey, N. B., Jadhav, A. G., Kandula, M. L., and Nimbalkar, V. (2020). *Effect of Hot Deformation and Aging of AA7075-Based 10 wt.% Graphite-Reinforced Composite on Wear Behavior and Microstructural Subsurface Deformation*, Metallography microstructure and analysis, 9, 393-402.
- Demirler, U., and Taptık, Y. (2010). *Fbb TiN kaplamalarda taban malzemenin kalıntı gerilme üzerine etkisi*. İTÜ DERGİSİ/d, 4(1), 95-102.
- Demirtaş, S. (2017). *İçten yanmalı motorda üst ölü noktada meydana gelen aşınma mekanizmalarının deneysel olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 73, İstanbul.
- Durmaz, Y. M., and Yıldız, F. (2019). *The wear performance of carbide tools coated with TiAlSiN, AlCrN and TiAlN ceramic films in intelligent machining process*. Ceramics international, 45(3), 3839-3848.
- Durmaz, Y. M. (2018). *TiAlSiN, AlCrN ve TiAlN seramik filmleri ile kaplanmış karbür takımların yüksek hızlı frezeleme işleminde aşınma performansının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 64, Erzurum.
- Dobrzański, L.A., Lukaszewicz, K., and Labisz K. (2006). *Structure of monolayer coatings deposited by pvd techniques*. Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 18, 1-2.
- Dolatabadia, N., Fordera, M., Morrissa, N., Rahmania, R., Rahnejata, H., and Smitha, S.H. (2020), *Influence of advanced cylinder coatings on vehicular fuel economy and emissions in piston compression ring conjunction*, Applied Energy, 259, 114-129.
- Ebrinç, A. (2015). *Influence of piston ring-pack design on inter-ring pressure of a heavy duty diesel engine*. Master Thesis. Istanbul Technical University Graduate School Of Science Engineering And Technology Faculty of Mechanical Engineering, 69, İstanbul.
- Elmkhah, H., Mahboubi, F., Abdollah-Zadeh, A., and Rouhaghdam, A. S. (2018). *A new approach to improve the surface properties of H13 steel for metal forming applications by applying the TiAlN multi-layer coating*. Journal of Manufacturing Processes, 32, 873-877.
- Endrino, J. L., Fox-Rabinovich, G. S., Reiter, A., Veldhuis, S. V., Galindo, R. E., Albella, J. M., and Marco, J. F. (2007). *Oxidation tuning in AlCrN coatings*. Surface and Coatings Technology, 201(8), 4505-4511.

- Ergüler, M. (2005). *Buzdolabı kompresörlerinin aşınma davranışının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mühendislikte İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, 76, İstanbul.
- Ferreira, R., Martins, J., Carvalho, Ó., Sobral, L., Carvalho, S., & Silva, F. (2020). *Tribological solutions for engine piston ring surfaces: an overview on the materials and manufacturing*. *Materials and Manufacturing Processes*, 35(5), 498-520.
- García, L., Criado, A., Chamon, J., Penco, F., Alonso, J., Arevalo, R., and Dietz, C. (2011). *Evidence for artificial magnetite coating on Iberian armoury*. *Revista de metalurgia*, 47(2), 101-111.
- Grabon, W., Koszela, W., Pawlus, P., and Ochwat S. (2013), *Improving tribological behaviour of piston ring–cylinder liner frictional pair by liner surface texturing*, *Tribology International*, 61,102-108.
- Grzesik, W., Zalisz, Z., Krol, S., and Nieslony, P. (2006). *Investigations on friction and wear mechanisms of the PVD-TiAlN coated carbide in dry sliding against steels and cast iron*. *Wear*, 261(11-12), 1191-1200.
- Guo, X., Liu, F., Zhang, K., Wang, C., Piao, Z., and Sun L. (2020). *Controllable preparation of micro-textures on wc/co substrate surface by an integrated laser-dry etching process for improving PVD coatings adhesion*. *Applied Surface Science*, 534, 147-580.
- Hazar, H., and Öner, C. (2007). *CrN kaplamanın bir dizel motoru üzerindeki etkileri*. *Mühendis ve Makine*, 48(574).
- Idham, M. F., Abdullah, B., Syarif, J., Jaffar, A., Alias, S. K., and Saad, N. H. (2013). *Microstructure and XRD of ductile iron using annealing-tempering heat treatment process*. In *Applied Mechanics and Materials* 393, 83-87.
- İnçal, E. (2007). *PVD yöntemiyle kaplanan hss takım çeliklerinin karakterizasyonu ve aşınma dayanımlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 70, İstanbul.
- Kalkan, N. (2008). *PVD yöntemi ile Ti, CrN ve TiN/CrN kaplanmış soğuk iş takım çeliğinin aşınma performanslarının deneysel incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 93, Konya.
- Kamenetskih, A. S., Kukhareno, A. I., Kurmaev, E. Z., Skorikov, N. A., Gavrilov, N. V., Cholakh, S. O., and Korotin, M. A. (2015). *Characterization of tialion coatings deposited by plasma enhanced magnetron sputtering: xrd, xps, and dft studies*. *Surface and Coatings Technology*, 278, 87-91.
- Kara, L., Özkan, D., Barış Yağcı, M., Sulukan, E., Sert, Y., and Sonsuz Sert, T. (2019). *Friction and wear behaviors of TiN coatings under dry and vacuum conditions*. *Tribology Transactions*, 62(3), 362-373.
- Kapsız, M. (2011). *Segman silindir çifti yüzeylerinde bor dop edilmiş kaplamanın motor sürtünme kayıplarına etkisinin incelenmesi*. Doktora Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 199, Sakarya.
- Klimovich, I., Komarov, F., Zaikov, V., Opielak, M., and Koltunowicz, T. N. (2018). *Optical properties of Ti-Al-CN films: effects of deposition parameters and carbon content*. *Przełąd Elektrotechniczny*, 94, 78-81.
- Krella, A. K. (2016). *Degradation of protective PVD coatings*. In *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Chemicals, Concrete and Power Industries* (s. 411-440). Butterworth-Heinemann.

- Kurgun, S. (2014). *Molibden kaplı piston segmanlarının aşınma davranışlarının incelenmesi ve optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 98, Sakarya.
- Küçükköse, M. (2017). *aC:N/TiAlN kaplamaların karakterizasyonu ve aşınma davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 69, Bartın.
- Lackner, J. M., Waldhauser, W., Ebner, R., Keckés, J., and Schöberl, T. (2004). *Room temperature deposition of (Ti, Al) n and (Ti, Al)(C, N) coatings by pulsed laser deposition for tribological applications*. Surface and Coatings Technology, 177, 447-452.
- Larbi, A. B. C., and Tlili, B. (2006). *Fretting wear of multilayered pvd TiAlCN/TiAlN/TiAl on aısı 4140 steel*. Surface and Coatings Technology, 201(3-4), 1511-1518.
- Lee, S. H., Son, B. S., Park, G. T., Ryu, J. S., and Lee, H. (2020). *Investigation of short-term, high-temperature oxidation of alcrn coating on wc substrate*. Applied Surface Science, 505, 144587.
- Li, G., Zhang, L., Cai, F., Yang, Y., Wang, Q., and Zhang, S. (2019). *Characterization and corrosion behaviors of TiN/TiAlN multilayer coatings by ion source enhanced hybrid arc ion plating*. Surface and Coatings Technology, 366, 355-365.
- Lin, J., Sproul, W. D., Moore, J. J., Lee, S., and Myers, S. (2011). *High rate deposition of thick CrN and Cr<sub>2</sub>N coatings using modulated pulse power (MPP) magnetron sputtering*. Surface and Coatings Technology, 205(10), 3226-3234.
- Lin, J., Wei, R., Bitsis, D. C., and Lee, P. M. (2016). *Development and evaluation of low friction TiSiCN nanocomposite coatings for piston ring applications*. Surface and Coatings Technology, 298, 121-131.
- Lin, N., Huang, X., Zhang, X., Fan, A., Qin, L., and Tang, B. (2012). *In vitro assessments on bacterial adhesion and corrosion performance of tin coating on Ti6Al4V titanium alloy synthesized by multi-arc ion plating*. Applied surface science, 258(18), 7047-7051.
- Lorenzo Martin, C., Ajayi, O. O., Torrel, S., Demas, N., Erdemir, A., and Wei, R. (2013). *Effect of coating thickness on tribological performance of CrN in dry sliding contact*. In International Joint Tribology Conference, 45080, 75-77.
- Lyubimov, V. V., Voevodin, A. A., Yerokhin, A. L., Timofeev, Y. S., and Arkhipov, I. K. (1992), *Development and testing of multilayer physically vapour deposited coatings for piston rings*. Surface and Coatings Technology, 52(2), 145-151.
- Mattox, D. M. (2010). *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. William Andrew.
- Mehran, Q. M., Fazal, M. A., Bushroa, A. R., and Rubaiee, S. (2018). *A critical review on physical vapor deposition coatings applied on different engine components*. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 43(2), 158-175.
- Meta, B. (2012). *Piston grubu sürtünme kayıplarının azaltılması ile taşıt yakıt ekonomisi iyileştirme potansiyelinin analizi*. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 119, İstanbul.
- Mohamed, E. S. (2018). *Performance analysis and condition monitoring of ice piston-ring based on combustion and thermal characteristics*. Applied Thermal Engineering, 132, 824-840.
- Mo, J. L., Zhu, M. H., Lei, B., Leng, Y. X., and Huang, N. (2007). *Comparison of tribological behaviours of AlCrN and tialn coatings—deposited by physical vapor deposition*. Wear, 263(7-12), 1423-1429.

- Mo, J. L., and Zhu, M. H. (2008). *Sliding tribological behavior of AlCrN coating*. Tribology International, 41(12), 1161-1168.
- Mo, J. L., and Zhu, M. H. (2009). *Sliding tribological behaviors of PVD CrN and AlCrN coatings against Si3N4 ceramic and pure titanium*. Wear, 267(5-8), 874-881.
- Müjdeci, S. (2003). *İçten yanmalı motorlarda meydana gelen aşınma mekanizmaları ve örnek motorlardaki piston, segman ve silindir yüzeylerinde oluşan aşınmaların mikroskopik olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 83, İstanbul.
- Okay, F. (2006). *PVD yöntemi ile tin kaplı östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin adhesiv aşınma davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 185, Ankara.
- Okay, F., Yelmen, B., Sert, H., Habalı K., Gül, F. (2012). *TiN kaplanmış östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirde pim sıcaklığının aşınma davranışı üzerine etkisi*. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 16-2, 218-226.
- Oliva, A., and Held, S. (2016). *Numerical multiphase simulation and validation of the flow in the piston ring pack of an internal combustion engine*. Tribology International, 101, 98-109.
- Paldey, S. and Deevi, S. (2003). *Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti, Al) n: a review*. Mater. Sci. Eng., 342 (1), 58-79.
- Polcar, T., Novák, R., and Široký, P. (2006). *The tribological characteristics of TiCN coating at elevated temperatures*. Wear, 260(1-2), 40-49.
- Priest, M., Dowson, D., Taylor, C.M. (1999). *Predictive wear modelling of lubricated piston rings in a diesel engine*. Wear, 231, 89-101.
- Priest, M. (2000). *Factors influencing boundary friction and wear of piston rings*. In Tribology series, 38, 409-416.
- Rozario, A., Baumann, C., & Shah, R. (2019). *The Influence of a Piston Ring Coating on the Wear and Friction Generated during Linear Oscillation*. Lubricants, 7(1), 8.
- Samim, P. M., Fattah-alhosseini, A., Elmkhah, H., Imantalab, O., and Nouri, M. (2020). *A study on comparing surface characterization and electrochemical properties of single-layer CrN coating with nanostructured multilayer ZrN/CrN coating in 3.5 wt.% NaCl solution*. Surfaces and Interfaces, 21, 100721.
- Shan, L., Wang, Y., Li, J., Li, H., Wu, X., and Chen, J. (2013). *Tribological behaviours of pvd TiN and TiCN coatings in artificial seawater*. Surface and Coatings Technology, 226, 40-50.
- Sharma, N., Alam, S. N., Ray, B. C., Yadav, S., and Biswas, K. (2019). *Wear behavior of silica and alumina-based nanocomposites reinforced with multi walled carbon nanotubes and graphene nanoplatelets*. Wear, 418, 290-304.
- Silva, F.S. (2006). *Fattigue on engine pistons - A compendium of case studies*. Engineering Failure Analysis, 13, 480-492.
- Soner, S. (2010). *Manyetik alanda sıçratma metodu ile üretilen TiAlN kaplamaların yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi*. Doktora Tezi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 170, Kayseri.
- Souza, P. S., Santos, A. J., Cotrim, M. A., Abrão, A. M., and Câmara, M. A. (2020). *Analysis of the surface energy interactions in the tribological behavior of AlCrN and TiAlN coatings*. Tribology International, 146, 106206.

- Şafak, H. E. (2008). *Yüzeyi PVD yöntemiyle kaplanmış metallerde tribolojik özelliklerin belirlenmesi*. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 113, İzmir.
- Taymaz, I., Çakır, K., & Mimaroglu, A. (2005). *Experimental study of effective efficiency in a ceramic coated diesel engine*. Surface and Coatings Technology, 200(1-4), 1182-1185.
- Teber, M. (2015). *Yüzey kaplama ile Ti6Al4V alaşımının aşınma ve korozyon direncinin artırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 155, Kayseri.
- Tekin, U., Güngör, M. A., Çömlekoğlu, M. E., Aladağ, A., and Dündar Çömlekoğlu, M. (2016). *Dental İmplantların Yüzey Yapıları*. Türkiye Klinikleri. Dishekimliği Bilimleri Dergisi, 22(1).
- Temir, O. (2013). *Farklı bileşime sahip sert maden kesici uçların mikro aşınma davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, 85, Elazığ.
- Tillmann, W., Grisales, D., Tovar, C. M., Contreras, E., Apel, D., Nienhaus, A., and Dias, N. F. L. (2020). *Tribological behaviour of low carbon-containing tialcn coatings deposited by hybrid (dcms/hipims) technique*. Tribology International, 151, 106528.
- Tuğcu, A., and Kaçal, A. (2001). *Kesici takımların seramik kaplanması*. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 002, 152-165.
- URL (2007) <http://www.kapco.com.tr/tr/>. Erişim tarihi: 13.10.2020
- Uyaroğlu, A. (2008). *İçten yanmalı motorlarda kullanılan pistonlarda meydana gelen arızaların analizi*. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 68, Ankara.
- Vernhes, L., Azzi, M., and Klemberg-Sapieha J.E. (2013), *Alternatives for hard chromium plating: nanostructured coatings for severe-service valves*. Materials Chemistry and Physics, 140, 522-528.
- Vinoth, I. S., Detwal, S., Umasankar, V., and Sarma, A. (2019). *Tribological studies of automotive piston ring by diamond-like carbon coating*. Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces, 13(1), 31-38.
- Wan, S., Li, D., Tieu, A. K., and Zhang, B. (2017). *Comparison of the scuffing behaviour and wear resistance of candidate engineered coatings for automotive piston rings*. Tribology International, 106, 10-22.
- Wood, R. J. K., and Wharton, J. A. (2011). *Coatings for tribocorrosion protection*. In Tribocorrosion of Passive Metals and Coatings, 296-333. Woodhead Publishing.
- Wigger, S., Füber, H. J., Fuhrmann, D., Schulz, C., and Kaiser, S. A. (2016). *Quantitative two-dimensional measurement of oil-film thickness by laser-induced fluorescence in a piston-ring model experiment*. Applied optics, 55(2), 269-279.
- Xu, Y., Zheng, Q., Geng, J., Dong, Y., Tian, M., Yao, L., and Dearn, K. D. (2019). *Synergistic effects of electroless piston ring coatings and nano-additives in oil on the friction and wear of a piston ring/cylinder liner pair*. Wear, 422, 201-211.
- Yeşilada, Ö. (1997). *Segmanlar*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Anabilim Dalı, 87, İstanbul.
- Zabala, B., Igartua, A., Fernández, X., Priestner, C., Ofner, H., Knaus, O., and Nevshupa, R. (2017). *Friction and wear of a piston ring/cylinder liner at the top dead centre: Experimental study and modelling*. Tribology International, 106, 23-33.

- Zeng, Y., Qiu, Y., Mao, X., Tan, S., Tan, Z., Zhang, X., and Jiang, J. (2015). *Superhard TiAlCN coatings prepared by radio frequency magnetron sputtering*. Thin Solid Films, 584, 283-288.
- Zhang, K., Deng, J., Guo, X., Sun, L., and Lei, S. (2018). *Study on the adhesion and tribological behavior of pvd TiAlN coatings with a multi-scale textured substrate surface*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 72, 292-305.
- Zhang, X., Jiang, J., Yuqiao, Z., Lin, J., Wang, F., and Moore, J. J. (2008). *Effect of carbon on TiAlCN coatings deposited by reactive magnetron sputtering*. Surface and Coatings Technology, 203(5-7), 594-597.
- Zhang, X., Jiang, J., Lin, J., and Moore, J. J. (2009). *Effect of n<sub>2</sub> flow on low carbon TiAlNC coatings*. Surface and Coatings Technology, 203(22), 3450-3453.
- Zhang, X., Qiu, Y., Tan, Z., Lin, J., Xu, A., Zeng, Y., and Jiang, J. (2014). *Effect of al content on structure and properties of TiAlCN coatings prepared by magnetron sputtering*. Journal of alloys and compounds, 617, 81-85.
- Zhuo, S., Peijun, Z., Leheng, Z., Xinfu, X., Aimin, H., and Wenquan, Z. (2000). *Multi-layer compound coating on cast iron piston ring by multi-arc and magnetron sputtering ion compound plating technique*. Surface and Coatings Technology, 131(1-3), 422-4

## ÖZ GEÇMİŞ

Dileknur EVRENSEL, ilköğrenimini Çeştepe Atatürk Ortaokulu, orta



öğrenimini Aydın Efeler Ortaokulunda tamamladı. Aydın Efeler Lisesi'nden 2012 yılında mezun oldu. 2013 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. Lisans eğitimini 2017 yılında tamamladıktan sonra Lisansüstü eğitimine 2018 yılında Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde başladı. Lisansüstü eğitimini 2021 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda tamamladı.

### **Çalıştığı Kurum/Kurumlar Yılı**

Kalite Güvence Mühendisi, Yüksel Seramik San. ve Tic. A.Ş. (2017-2018)

### **Yabancı Dil**

İngilizce

### **Yayımlar**

1. Alışır, S. ve Evrensel, D. (2019). Titanyum Esaslı Seramik Malzemelerle Kaplanmış Segmanların Tribolojik Özelliklerinin Araştırılması. 2. Uluslararası 19 Mayıs Yenilikçi Bilimsel Yaklaşımlar Kongresi, 27-29 Aralık, Bildiri Özetleri Kitabı, 938-943, Samsun.
2. Alışır, S. ve Evrensel, D. (2019). Tek ve Çok Katlı AlTiN Kaplaması Yapılan Segmanların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. 2. Uluslararası 19 Mayıs Yenilikçi Bilimsel Yaklaşımlar Kongresi, 27-29 Aralık, Bildiri Özetleri Kitabı, 931-937, Samsun.
3. Alışır, S and Evrensel, D. (2017). Mechanical Properties Of Polylactic Acid Based Bio-Composites. 2. International Conference On Material Science And Technology, October 11-13, Nevşehir.

### **Proje**

1. BAP Farklı Seramik Malzemelerle Kaplanmış Segmanların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi. (Proje numarası: PYO.MUH.1904.19.023)

ORCID ID: 0000 0003 2049 6261

