

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİR DİZEL MOTORU SİLİNDİR YÜZEYİNİN SERAMİK
MALZEME İLE KAPLANARAK AŞINMA
DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

Hanbey HAZAR

DOKTORA TEZİ

MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

**Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi
(FÜBAP) tarafından desteklenmiştir.**

ELAĞIĞ, 2004

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

169317

**BİR DİZEL MOTORU SİLİNDİR YÜZEYİNİN SERAMİK
MALZEME İLE KAPLANARAK AŞINMA
DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

Hanbey HAZAR

DOKTORA TEZİ

MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

**Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi
(FÜBAP) tarafından desteklenmiştir.**

ELAĞIĞ, 2004

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR DİZEL MOTORU SİLİNDİR YÜZEYİNİN SERAMİK
MALZEME İLE KAPLANARAK AŞINMA
DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

Hanbey HAZAR

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

Bu tez, 13.../11.../2004.....tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği/~~oybirliği~~ ile başarılı / ~~başarılı~~ olarak değerlendirilmiştir

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Cengiz ÖNER

Üye: Prof. Dr. M. Sahir SALMAN

Üye: Yrd.Doç.Dr. Halit Lütü YÜCEL

Üye: Yrd.Doç.Dr. Ahmet HASÇALIK

Üye: Yrd.Doç.Dr. Mehmet KAPLAN

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun...13.../12/2004...tarih ve...2004/46-1.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmamda beni teşvik eden ve her türlü yardımlarını esirgemeyen başta danışmam hocam Fırat Üniversitesi T.E.F. Makine Eğitimi Bölümü öğretim üyesi sayın Yrd.Doç. Dr. Cengiz ÖNER'e teşekkür etmeyi bir borç bilirim. Ayrıca İstanbul Teknik Üniversitesi öğretim üyelerinden sayın Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN' e, Fırat Üniversitesi T.E.F. öğretim üyelerine, Metal ve Makine bölümü araştırma görevlilerine, T.E.F. Otomotiv Atölyesi teknisyenlerine ve bu çalışmamda beni destekleyen değerli aileme sonsuz teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	I
ŞEKİLLER LİSTESİ	IV
TABLolar LİSTESİ	VII
EKLERİN LİSTESİ	VIII
SİMGELER	IX
ÖZET	X
ABSTRACT	XII
1. GİRİŞ	1
2. SERAMİK KAPLAMA MALZEMELERİ	5
2.1. Seramik Kaplamalar	6
2.1.1. Geleneksel ve Mühendislik Malzemeleri	9
2.1.1.1. Geleneksel Seramikler	9
2.1.1.2. Mühendislik Seramikleri	9
2.2. Seramik Malzemelerin Özellikleri	10
2.2.1. Mekanik Özellikleri	10
2.3. Seramik Malzemelerin Dayanımını Etkileyen Faktörler	11
2.4. Seramiklerin Yorulma Kırılması	12
2.5. Seramik Aşındırıcı Malzemeler	12
2.6. Seramiklerin Isıl Özellikleri	12
2.7. Seramik Güçerir Malzemeler	13
3. SERAMİK KAPLAMALAR VE KAPLAMA YÖNTEMLERİ	14
3.1. Seramik Kaplamada Kullanılan Malzemeler	16
3.2. Seramik Kaplama Yöntemleri	17
3.2.1. Termal Sprey Kaplamalar	17
3.2.2. Yüzey Kaplama Yöntemleri	18
3.2.2.1. Termal Sprey Kaplama Malzemeleri	18
3.2.2.2. Termal Sprey Yöntemi	18
3.2.2.3. Tel Alev Sprey Yöntemi	20
3.2.2.4. Toz Alev Sprey Yöntemi	21
3.2.2.5. Elektrik Ark Spreyleme	21
3.2.2.6. Detonasyon Yöntemi	22
3.2.2.7. Plazma Püskürtme Yöntemi	23

3.2.2.8. CVD (Kimyasal buhar biriktirme) Yöntemi	26
3.2.2.8. PVD (Fiziksel buhar biriktirme) Yöntemi	26
4. AŞINMA	27
4.1. Motorlarda Aşınma Mekanizması.....	28
4.2. Aşınma Türleri.....	35
4.2.1. Adhezif (Adhezyon) Aşınma	35
4.2.2. Abrasiv (Abrazyon) Aşınma	37
4.2.3. Yorulma Aşınması (Pitting)	39
4.2.4. Korozyif Aşınma	40
4.2.5. Kazımalı Aşınma	40
4.3. Seramiklerin Sürtünmesi	40
4.3.1. Seramiklerde Sürtünme	40
4.3.2. Seramiklerin Erozyonu	41
4.4. Seramik Kaplamalardaki Aşınma İle İlgili Yapılan Çalışmalar	41
5. MOTOR PERFORMANSI	46
5.1. Karakteristik Motor Değerleri	46
5.1.1. Motor Momenti	47
5.1.2. İndike Güç (İç güç).....	47
5.1.3. Efektif Güç (Faydalı güç)	47
5.1.4. Özgül Yakıt Tüketimi	48
6. UYGULAMANIN TARİHÇESİ VE MOTORLARDA YAPILAN ÇALIŞMALAR ...	49
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	57
7.1. Deney Motoru ve Teknik Özellikleri	57
7.2. Deney Donanımı ve Deneyin Yapılışı	58
7.2.1. Ölçüm Teknikleri	59
7.3. Kaplama Tekniği ve Kullanılan Seramik Malzemenin Özellikleri	60
7.4. Katodik Ark Fiziksel Buhar Biriktirme (Ark PVD) Yöntemi	62
7.5. Deney Sonuçları ve Tartışma	65
7.5.1. Egzoz Gazı Emisyon Sonuçları.....	65
7.5.2. Motor Performansı Sonuçları.....	71
7.5.3. Metalografik Çalışmalar.....	74
7.5.3.1. Yüzey Pürüzlülüğünün ve Sertliğinin Aşınma Üzerine Etkisi	74
7.5.3.2. Silindirlerin Mikro Yapısı ve Aşınma	79
7.5.3.3. EDS Sonuçları	89
7.5.3.4. X-Ray Analiz Sonuçları	95

7.5.3.5. Sekman ve Supaplar	95
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	97
KAYNAKLAR	100
ÖZGEÇMİŞ	105
EKLER	106



ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Turbo kombine bir motorun şematik görünüşü	3
Şekil 1.2. Standart ve adyabatik motorların enerji dağılımı	5
Şekil 2.1. Kalsiyum florürün (CaF_2) kristal yapısı	7
Şekil 2.2. Perovskitin kristal yapısı	7
Şekil 2.3. Korountun kristal yapısı	8
Şekil 2.4. Bir siliska biçimi olan yüksek kristobalitin yapısı	8
Şekil 2.5. Saf alüminanın enine dayanımında gözenekliliğin etkisi	12
Şekil 2.6. Seramik malzemelerin geniş bir sıcaklık aralığında ısı iletkenliği	13
Şekil 3.1. Tipik seramiklerin ve dökme demirin genleşme katsayıları	15
Şekil 3.2. Tipik seramiklerin ısı iletimi değerleri	15
Şekil 3.3. Tel alev spreyleme yönteminin şematik gösterilişi	20
Şekil 3.4. Toz alev spreyleme yönteminin şematik gösterilişi	21
Şekil 3.5. Elektrik ark spreyleme yönteminin şematik gösterilişi	22
Şekil 3.6. Detonasyon yönteminin şematik gösterilişi	23
Şekil 3.7. Plazma kaplama sisteminin şematik gösterilişi	24
Şekil 3.8. Plazma tabancasının şematik görünüşü	24
Şekil 4.1. Malzemelerdeki aşınma-zaman bağıntısı	28
Şekil 4.2. Silindir-sekman-pistonun kesit görünüşü	31
Şekil 4.3. Yanma odasında meydana gelen ısının silindir gömleğine geçişi	32
Şekil 4.4. Tribolojik sistemin şematik gösterimi	33
Şekil 4.5. Tribolojik sistemde giren enerjilerin dağılımı	34
Şekil 4.6. Çok iyi torna edilmiş bir metal yüzeyinin mikroskop altındaki görünüşü	34
Şekil 4.7. Sürtünen iki cismin temas alanları	35
Şekil 4.8. Kaynak bağları ve kopma şekilleri	37
Şekil 4.9. Abrasiv aşınma mekanizması	38
Şekil 4.10. Kaplamaların erozyon hızları üzerine aşındırıcı açısının etkisi	38
Şekil 5.1. Yanma başlangıcı ve basınç esnasındaki krank kolu-biyel eksenini	46
Şekil 6.1. Seramik kaplanmış (1) ve kaplanmamış (2) pistonlu motorun çeşitli motor hızlarındaki fren gücü	52
Şekil 6.2. Seramik kaplanmış (1) ve kaplanmamış (2) pistonlu motorun çeşitli motor hızlarındaki fren momenti	53
Şekil 6.3. Ortalama sürtünme katsayıları	56

Şekil 7.1. Motor ünitesi kontrol paneli	59
Şekil 7.2. Deney düzeneğinin fotoğrafı.....	61
Şekil 7.3. Kaplanmış motor parçasının fotoğrafı	61
Şekil 7.4. Katodik Ark PVD sisteminin şematik gösterimi	63
Şekil 7.5. Katodik Ark PVD yönteminde katotların arkasına yerleştirilen mıknatısların etkisiyle droplet sayısındaki değişimi	64
Şekil 7.6. NO _x emisyonlarının devir sayısı ile değişimi	66
Şekil 7.7. CO emisyonlarının devir sayısı ile değişimi	68
Şekil 7.8. Yağ sıcaklığının devir sayısı ile değişimi	69
Şekil 7.9. Egzoz sıcaklığının devir sayısı ile değişimi	69
Şekil 7.10. Özgül yakıt tüketiminin devir sayısı ile değişimi	71
Şekil 7.11. Motor momentinin devir sayısı ile değişimi	72
Şekil 7.12. Efektif gücün devir sayısı ile değişimi	73
Şekil 7.13. 13 no'lu numunenin SEM fotoğrafı	77
Şekil 7.14. 14 no'lu numunenin SEM fotoğrafı	77
Şekil 7.15. 1 no'lu numunenin SEM fotoğrafı	78
Şekil 7.16. 2 no'lu numunenin SEM fotoğrafı	78
Şekil 7.17. 9 no'lu numunenin SEM fotoğrafı	80
Şekil 7.18. 10 no'lu numunenin SEM fotoğrafı	80
Şekil 7.19. 3 no'lu numunenin SEM fotoğrafı	82
Şekil 7.20. 3 no'lu numunenin SEM fotoğrafı	82
Şekil 7.21. 4 no'lu numunenin SEM fotoğrafı	83
Şekil 7.22. 12 no'lu numunenin SEM fotoğrafı	85
Şekil 7.23. 5 no'lu numunenin SEM fotoğrafı	85
Şekil 7.24. 6 no'lu numunenin SEM fotoğrafı	86
Şekil 7.25. 11 no'lu numunenin SEM fotoğrafı	86
Şekil 7.26. 7 no'lu numunenin SEM fotoğrafı	88
Şekil 7.27. 8 no'lu numunenin SEM fotoğrafı	88
Şekil 7.28. 3 no'lu numunenin EDS analizi	90
Şekil 7.29. 4 no'lu numunenin matris ile modifikasyonun ara yüzeyi üzerinden EDS analizi	90
Şekil 7.30. 4 no'lu numunede modifikasyon üzerinden alınan EDS analizi	91
Şekil 7.31. 5 no'lu numunede matris üzerinden alınan EDS analizi	92
Şekil 7.32. 6 no'lu numunede modifikasyon üzerinden alınan EDS analizi	92
Şekil 7.33. 6 no'lu numunede ara yüzey üzerinden alınan EDS analizi	93

Şekil 7.34. 7 no'lu numunede modifikasyon üzerinden alınan EDS analizi	94
Şekil 7.35. 8 no'lu numunede matris üzerinden alınan EDS analizi	94



TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. Seramik bileşikleri ve erime sıcaklıkları	6
Tablo 2.2. Bazı killerin kimyasal bileşimleri	9
Tablo 2.3. Bazı mühendislik seramik malzemelerinin mekanik özellikleri	11
Tablo 3.1. Seramik kaplamalar ve uygulama alanları	17
Tablo 3.2. Seramik kaplama teknikleri ve kaplama malzemeleri	17
Tablo 3.3. Ticari termal sprej tekniklerine ait bazı önemli özellikler	19
Tablo 3.4. Plazma gazlarının temel, fiziksel ve kimyasal özellikleri	24
Tablo 3.5. Çeşitli endüstrilerde aşınmaya karşı dayanım amacıyla kaplama işleminin uygulandığı parçalar ve kullanılan kaplama malzemeleri	25
Tablo 4.1. Metallerin yapışmasını etkileyen faktörler	37
Tablo 6.1. DIK ve standart soğutmalı motorlarda yapılan deneysel çalışmaların Karşılaştırılması	54
Tablo 6.2. DIK ve standart soğutmalı motorlarda yapılan simülasyon çalışmalarının Karşılaştırılması	55
Tablo 7.1. Deney motoruna ait teknik özellikler	58
Tablo 7.2. Kullanılan seramik malzemesinin (CrN) teknik özellikleri	62
Tablo 7.3. Ark PVD CrN kaplamaların üretim parametreleri	62
Tablo 7.4. Motorda kullanılan silindir malzemesinin teknik özellikleri	62
Tablo 7.5. Deneyler sonucunda kaplamalı ve normal motordan elde edilen P_e (kw) ve M_d (Nm) değerleri	73
Tablo 7.6. Deneylerde kullanılan motor silindirlerinin ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri..	75
Tablo 7.7. Deneylerde kullanılan motor silindirlerinin ölçülen sertlik değerleri.....	75
Tablo 7.8. İncelenen numunelerin silindirlerdeki yerleri	76

EKLERİN LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1. Deneyler sonucunda kaplanmış motorda elde edilen sonuçlar.....	106
Tablo 2. Deneyler sonucunda kaplanmamış motorda elde edilen sonuçlar	107
Şekil 1. 6 no'lu numuneye ait X-ışınları difraksiyonu.....	108
Şekil 2. 4 no'lu numuneye ait X-ışınları difraksiyonu	108
Şekil 3. 7 no'lu numuneye ait X-ışınları difraksiyonu	109
Şekil 4. 5no'lu numuneye ait X-ışınları difraksiyonu	109
Şekil 5. 3 no'lu numuneye ait X-ışınları difraksiyonu	110
Şekil 6. 14 no'lu numuneye ait X-ışınları difraksiyonu	110



SİMGELER

Pe: Efektif güç (kW)

Ni: İndike güç (kW)

Md: Döndürme momenti (Nm)

l: Strok (mm)

n: Motor devri (d/dk)

Ah: Gerçek temas yüzey (mm^2)

Va: Malzemenin hacmi (mm^3)

ka: Aşınmaya katılan kısım (mm)

Hb: Yüzey sertliği

Sg: Gerçek temas alanı (mm^2)

Pmi: Ortalama indike basınç (N/m^2)

Pme: Ortalama efektif basınç (N/m^2)

Hu: Yakıtın yanma ısısı (kcal/kg)

be: Özgül yakıt tüketimi (g/kwh)

ÖZET

Doktora Tezi

BİR DİZEL MOTORU SİLİNDİR YÜZEYİNİN SERAMİK MALZEME İLE KAPLANARAK AŞINMA DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Hanbey HAZAR

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Eğitimi Anabilim Dalı
2004, Sayfa : 110

Bu çalışmada, bir dizel motorunun silindir yüzeyi CrN ile kaplanarak aşınma davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma için seçilen tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorunun silindir yüzeyi, katodik Ark PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi) kullanılarak $1,8 \pm 0,2$ μm kalınlığında CrN seramik malzeme ile kaplanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan motor önce kaplanmış olarak belirli yük ve devir sayılarında 200 saat test edilerek, performans değerleri alınmıştır. Daha sonra normal motor aynı yük ve devir sayılarında bu motor da 200 saat test edilmiş ve her iki motora ait performans değerleri karşılaştırılmıştır.

Silindirin aşınma etkilerini incelemek için kaplanmış ve kaplanmamış parçaların karşılıklı aynı bölgelerinden numuneler alınmıştır. Kaplanmış ve normal yüzeylerdeki mevcut fazları ve bunların kimyasal bileşenlerini analiz etmek için SEM (Scanning Electron Microscopy), EDS (Energy Dispersive Spectrograph), X- Ray, yüzey pürüzlülüğü ve mikro sertlik analizleri yapılmıştır.

Ayrıca özgül yakıt tüketimi, efektif güç, motor momenti, yağ sıcaklığı, egzoz gazı sıcaklığı, egzoz emisyonlarındaki değişimler kaplanmış ve normal motor için ölçülmüştür.

Yapılan analizler sonucunda, CrN kaplamalı silindirlerde, aşınmanın az ve aşınma çizgilerinin derinliğinin dökme demir silindire göre daha düşük olduğu görülmüştür. CrN kaplamalı silindirin yüzeyinde az da olsa mikro çatlakların olduğu tespit edilmiş, buna kaplama işlemi sırasında gelişen yüksek iç gerilmelerin sebep olduğu sonucuna varılmıştır.

CrN kaplanmış yüzeyin aşınma direncinin yüksek, sürtünme katsayısının düşük olması, aşınmayı önemli ölçüde azaltmıştır. Yapılan kaplama işleminde, kaplama kalınlığının düşük olması ($1,8 \pm 0,2$ μm) ısı yalıtımı açısından kayda değer bir fayda getirmediği, bunun

sonucu olarak motor performansında önemli bir değişimin olmadığı gözlenmiştir. Seramik kaplanmış motorda egzoz gazı sıcaklığının bir miktar yükseldiği ölçölmüştür. Sıcaklık artışının yanmayı olumlu etkilediği, özellikle CO emisyonunu azalttığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Seramik kaplama, CrN, silindir, aşınma



ABSTRACT

PhD Thesis

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOUR OF A DIESEL ENGINE WITH CYLINDER HAVING CERAMIC COATED SURFACE

Hanbey HAZAR

**Fırat University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Machine Education**

2004, Page : 110

In this study, wear behaviours of cylinder surface coated with CrN of a diesel engine were investigated. The engine selected for evaluation was a four-stroke, direct-injection, one cylinder diesel engine which the surface of the engine's cylinder was coated with $1.8 \pm 0,2 \mu\text{m}$ thickness of ceramic materials (CrN) using the katodik Ark PVD (Physical Vapour Deposition) technique.

First, the ceramic coated test engine was tested 200 hours at different speed and load conditions. Then, this teste engine was tested again under the same operation conditions as the standart engine without a coating.

The test data for both engine's performance were compared as diagrams. Samples the coated and uncoated cylinder surfaces were cut of same part for examine of wear effects. Phases present in the coated and uncoated surfaces and their chemical compositions were analyzed by SEM (Scanning Electron Microscopy), EDS (Energy Dispersive Spectrograph), X-Ray diffraction, surface roughness and micro-hardness.

In addition, the specific fuel consumption, effective power, the engine moment, exhaust and oil temperature and exhaust emissions to coated and uncoated engines have been measured.

Comparing the CrN coated cylinder with the uncoated cylinder, the poor wear and the worn depth observed on samples. The surfaces of wear specimens were observed by an SEM.

Microstructural analysis of the CrN coated surfaces showed that micro-cracks were formed on the coated surfaces, which considered as a result of the a reaction during coating process.

The micro-hardness and corrosion resistance of CrN coated cylinder is higher compared with gray cast iron cylinder, moreover the friction coefficient and surface roughness of CrN coated cylinder is smaller than gray cast iron cylinder. That affects wear resistance. The coating ($1.8 \pm 0,2 \mu\text{m}$) thickness of ceramic materials (CrN) of the surface of the engine's cylinder is less significant to engine performance.

In the case of coated engine, exhaust gas temperatures increased addition of insulation. The experimental results show that, the ceramic coated engine affects CO emission parameter.

Keywords : Ceramic coating, CrN, cylinder, wear.



1. GİRİŞ

Günümüzde malzeme bilimindeki gelişmelere rağmen malzemelerin kullanıldığı yerlerde istenen bütün özellikler ideal bir şekilde sağlanamamaktadır. Motorların çeşitli kısımlarında kullanılan malzemelerin özellikleri çok farklılık arz etmektedir. Malzeme bilimindeki yapılan çalışmaların amacı malzemelerin fiziksel, termal ve kimyasal özelliklerini malzemenin kullanıldığı yere göre arzu edilen seviyeye yaklaştırmaktır. Çeşitli nedenlerden dolayı malzemedeki oluşan gerilme, sürtünme, aşınma ve ısınma gibi etkiler, bir malzemenin üzerinde deformasyona sebep olmaktadır. Malzemelerin maliyeti, kısa sürede parçaların değiştirilmesinin istenmemesi, malzemelerin daha fazla yüke, ısıya ve gerilmeye dayanmasının arzu edilmesi bu alanda yapılan çalışmaların devamını sağlamaktadır.

Dünya üzerinde bulunan hammaddelerin aşırı bir şekilde tüketimi, diğer kaynaklarda olduğu gibi metal kökenli malzemelerin de sınırlı olduğunun altının çizilmesi gerektiğini ortaya çıkarmıştır. Dolayısıyla kaynak tüketiminin azaltılmasının yolu, nitelikleri yüksek malzemeler geliştirmek ve üretmektir. Malzemenin ekonomik bir şekilde kullanılması, bu alanda yapılan harcamaları azaltacaktır. Bu bağlamda malzeme bilimi önem kazanmaktadır. Malzemelere çeşitli işlemler yapılarak kalitesinin artırılması, ömrünün daha fazla olmasını sağlamaktadır. Birbiri üzerinde sürtünerek hareket eden motor parçalarının zamanla aşınması kaçınılmazdır. Aşınmayı azaltmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunların başında malzemenin yüzey kalitesinin artırılması gelmektedir. Bugün ileri teknoloji kaplama yöntemleri yardımıyla, çeşitli kompozit malzemeler kullanılarak bir makine parçasının yüzey kimyası değiştirilmekte ve daha nitelikli olması sağlanmaktadır.

İçten yanmalı motorlarda maliyetin azaltılması ve yakıt sarfiyatının düşürülmesine yönelik araştırmalar büyük bir hızla devam etmektedir. Bu amaçla, motor parçalarının ömrünün uzatılması, birim yakıttan daha fazla verim elde edilmesi, yakıt sarfiyatının ve aşınmanın azaltılması gibi sebepler bu tür araştırmaların daha ileri safhalara geçmesini zorunlu kılmıştır.

Konuyla ilgili olarak yapılan ilk çalışmalar daha çok gaz türbin kanatları ile ilgili olmasına karşın, bugün dizel motorlarındaki uygulama sahası ve sonuçları oldukça ümit vericidir.

Günümüzde petrol fiyatlarının sürekli artması, otomotiv sektörünü olumsuz yönde etkilemekte ve yakıt ekonomisine verilen değerin her geçen gün artmasına sebep olmaktadır. Bilim ve teknolojiye gelişmelere paralel olarak motorların konstrüktif ve işletme faktörlerinin iyileştirilmesine ve yakıtın daha verimli biçimde kullanılmasına çalışılmaktadır [1].

Motorlardan maksimum gücü, daha ekonomik ve çevreyi kirletmeden alabilmek için özellikle bazı motor parametreleri üzerindeki araştırmalar yoğunlaştırılmıştır. Motorun bütün çalışma şartlarında; volümetrik ve termik verimin artırılması, iyi bir yanma sağlanması, güç kayıplarının azaltılması, egzoz emisyonlarının düşürülmesi ve motor ömrünün artırılması bu alanda yapılan bilimsel çalışmaların ana amacını oluşturmaktadır.

İçten yanmalı motorlarda motora verilen toplam enerjinin çok az bir kısmı faydalı enerjiye dönüşmektedir. Bu enerjinin yarıdan fazlası ise, motor parçalarını aşırı ısıdan korumak amacıyla soğutma sistemi, sürtünme kayıpları, egzoz kayıpları ve diğer kayıplar olarak sistemden atılmaktadır. Bu enerjilerin toplamı, motor için enerji kaybı olarak ifade edilebilir. Motorun faydalı işini arttırmanın en etkin yolu, yukarıda bahsedilen bu kayıp enerjiyi azaltmaktır. Bunun için malzeme teknolojisine dayanan ve sürtünme yoluyla oluşan enerji kayıplarının azaltılmasına çalışılmaktadır. Bunun sağlanması, yanma odasını oluşturan parçaların ısı iletkenliği düşük, yüksek çalışma sıcaklığına dayanabilen bir malzemeden üretilmesi veya kaplanması “adyabatik motorlar” kavramını ortaya çıkarmıştır. Bu amaçla motor ve gaz türbinlerinin yanma odasının, silindir yüzeyinin ve diğer parçaların seramik bir malzeme ile kaplanması veya seramik malzemeden yapılması önemli bir gelişme göstermektedir.

Isıl iletkenliği düşük olan seramikler, malzemelerin fiziksel, termal ve kimyasal özelliklerinin arzu edilen şartlara yaklaştırarak bize geniş bir alanda kullanım imkanı sunmaktadır.

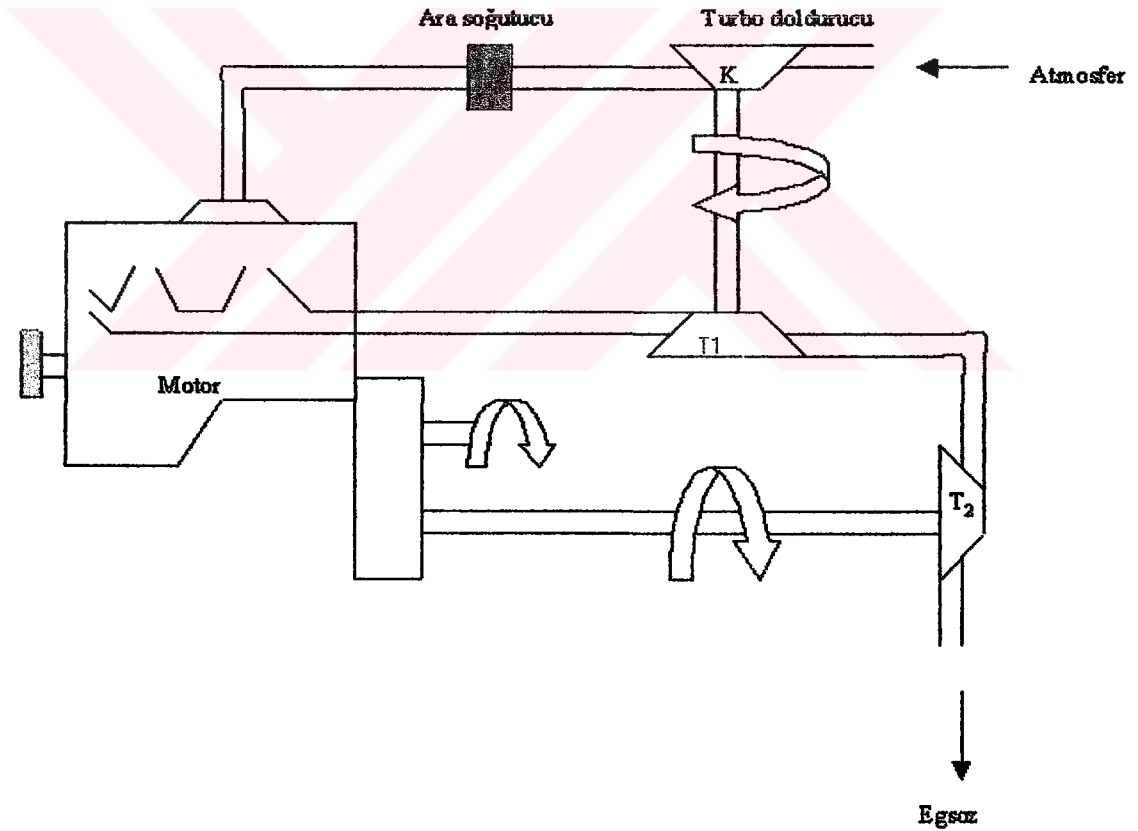
Son yıllarda ileri teknoloji ürünü olan seramik malzeme alanındaki gelişmelere paralel olarak motorlarda seramik malzemenin kullanılması büyük bir hızla artmaktadır. Mevcut içten yanmalı motorlarda, özellikle malzemenin termik stabilitesi yönünden konulan sıcaklık sınırlamaları motor verimini de sınırlamaktadır. Motor parçalarının ve yanma odasının seramik malzemeden yapılması veya seramik malzeme ile kaplanması, sıcaklık etkisiyle malzemede oluşacak kusurları önlemekte, motorun veriminde artışa ve yakıt tüketiminde de azalmaya sebep olmaktadır. Seramikler gerek yüksek sıcaklıklara dayanması, gerekse aşınma ömrü bakımından metal malzemelere göre daha elverişlidir.

Bugün ileri seramikler ve kompozit malzemeler olarak ifade edilen bu malzemelerin kullanılmaya başlanması 40-50 yıl öncesine dayanmaktadır. Ancak tam anlamıyla kullanılmaya başlanması 1965 yıllarında gerçekleşmiştir. Günümüze kadar olan çalışmalarda kullanılan seramik malzemelerin kullanım yerine göre uygunluğu araştırılmış ve halen bu çalışmalar devam etmektedir [2].

Adyabatik motorlar, ya da düşük ısı kayıplı motorlar ifadesiyle bilinen motorlar, genellikle termal bariyer yöntemiyle imal edilirler. Bu sistem genellikle soğutma sistemini

ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Yapılan çeşitli çalışmalara göre soğutma sistemi elamanlarının (pompa, radyatör, su kanalları, vantilatör vb.) ortadan kalkmasıyla, yakıt tasarrufu ve parça maliyetinin azaltılması sağlanmıştır [3,4,5,6,7].

1970'lerden sonra seramik malzemeler, dizel motorlarının yanma odası ve motor parçalarının metal yüzeyi üzerine kaplama yapılarak kullanılmaya başlanmış ve hala bu konu üzerinde çeşitli çalışmalar devam etmektedir. Günümüzde tam adyabatik olmasa bile düşük ısı kayıplı motor dizaynı, (özellikle motor parçalarının normal çalışması için soğutma sistemine giden ısı kayıplarının minimuma indirilmesi) soğutma sisteminin yükünün ve buna harcanan gücün azaltılması sebebiyle faydalı enerjiyi arttırmakta ve motor verimini yükseltmektedir [3]. Bu amaçla dizayn edilen motordan veya taşıttan sağlanan daha fazla güç, takat ağırlığını arttırmıştır.



Şekil 1.1. Turbo kombine bir motorun şematik görünüşü [5].

Seramik kaplı motorların yanma odası sıcaklığının yüksek olması daha geniş damıtma aralığında ve daha az kaliteli yakıt kullanılmasına imkan vermektedir. Ayrıca soğutma sistemine giden ısı kayıplarının azaltılması sebebiyle, dizel motorlarında sıkıştırma sonu gaz sıcaklığı artacağından soğuk havalarda ilk hareket (çalışma) daha kolay olmaktadır. Termal bariyer kaplanmış adyabatik dizel motorlardaki yanma olayında tutuşma gecikmesinin azaltılması, kontrolsüz yanmadan kaynaklanan vuruntu ve gürültülü çalışmayı azaltmaktadır [4].

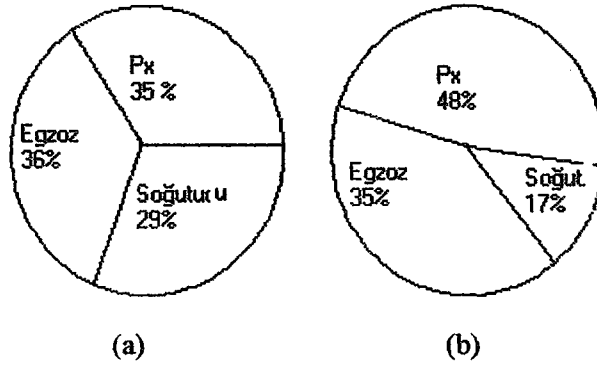
Dizel motorlarında termal bariyer kaplama sonucu egzoz gazlarının enerjisinde meydana gelen artış, şekil 1’de gösterildiği gibi tabii emmeli bir dizel motoruna turbo doldurma veya turbo kombine sistemlerinin ilavesiyle faydalı işe dönüştürülebilmekte ve bu da motorun hem verimini hem de performansını artırmaktadır [5].

Motor verimini etkileyen başka önemli bir faktör de iş zamanı esnasında silindirlerdeki ısı kaybıdır. Eğer bu ısı kaybı genişleme zamanının başında gerçekleşiyorsa, motorun faydalı iş üretme potansiyeli azalacaktır. Diğer taraftan iş zamanı süresince ısı kaybı olmuyorsa, bu daha yüksek iş potansiyelinin mevcut olduğu anlamına gelir. Bu da ortalama indike basınçta artış meydana getirmektedir. Bundan dolayı kaplamalı motorlarda verim daha yüksek olmaktadır [6].

İçten yanmalı motorlarda en çok aşınma silindirlerde meydana gelmektedir. Şayet silindirler seramikten yapılırsa veya seramik malzemeler ile yüzeyi kaplanırsa, hem aşınma azalacak, hem de bazı seramiklerin 870 °C’ ye kadar kendi kendine yağlayıcı özelliğinden dolayı sürtünmeye harcanan enerjiden tasarruf sağlanmış olacaktır [7].

Günümüzdeki motorların çeşitli metallerden yapılması ve yanma odasındaki elamanların yanma esnasında yüksek sıcaklığa maruz kalmasından dolayı özellikle piston, silindir, sekman ve supap yüzeylerinde çeşitli hasarlar meydana gelmektedir. Seramik malzemelerin bu elamanlar üzerinde kullanılmasıyla meydana gelen; termal gerilme, termal şok ve basınç gibi hasarları, yüzeye kaplanmış olan seramik malzeme üzerine alacağı için ana malzemeyi korumuş olacaktır.

Şekil 1.2’de standart ve adyabatik, motor için enerji dengelerinin mukayesesi görülmektedir.



Şekil 1.2. Standart (a) ve adyabatik (b) motorların enerji dağılımı

Yanma odası elemanlarının seramik malzeme ile kaplanması egzoz sıcaklığını da arttırmaktadır. Tabii emmeli bir dizel motorunda egzoz enerjisi toplamı % 30- 40 arasında iken seramik kaplamalı motorda % 60- 65 arasındadır. Diğer taraftan egzoz sıcaklıkları da standart bir dizel motorunda 400-600 °C iken silindirleri seramik kaplanmış bir motorda bu değer 700-900 °C arasındadır. Turbo kombine bir motorda ise bu değer çok daha fazla olabilmektedir [8].

Şekil 1.2’de görüldüğü gibi kaplama yapılmış motorda egzoz ve soğutmaya geçen enerji miktarında azalma görülürken, motor veriminde artış meydana gelmiştir. Motorlarda genellikle soğutma sistemine %25-30, egzoz sistemine % 30-40’lık bir enerji kaybı olmaktadır.

2. SERAMİK KAPLAMA MALZEMELERİ

2. 1. Seramik Malzemeler

Seramik malzemeler, metal ve metal olmayan (ametal) elementlerin birbirlerine birinci derece iyonik bağla bağlandığı inorganik metal dışı malzemelerdir. Seramik malzemelerin özellikleri atomlar arası bağlarına göre değişir. Seramik malzemeler genel olarak, düşük tok ve süneklikte olup sert ve kırılgandır. Seramik malzemelerin bu özelliği kaplama açısından pek istenmeyen bir durumdur. Güçlü atom bağları nedeniyle çok ağır ortamlarda bile kimyasal olarak kararlıdır ve yüksek erime sıcaklığına sahiptirler.

Seramik malzemeler genellikle iki grupta toplanır; geleneksel seramikler ve mühendislik seramikleri. Geleneksel seramikler üç temel bileşende oluşur; kil, silika (çakmak taşı) ve feldispat.

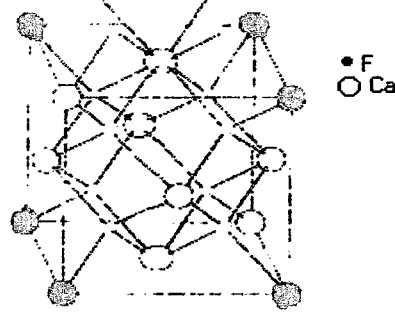
Geleneksel seramiklere örnek olarak, yapı endüstrisinde kullanılan tuğla, fayans ve elektrik endüstrisinde kullanılan elektro porseleni gösterilebilir. Mühendislik seramikleri, saf veya safa çok yakın olan, alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC) ve silisyum nitrür (Si_3N_4) gibi bileşiklerden oluşur. Bazı basit seramik bileşikler ve erime sıcaklıkları tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Seramik bileşikler ve erime sıcaklıkları [9].

Seramik Bileşik	Sıcaklığı (°C)
Hafniyum karbür, HfC	4150
Titanyum karbür, TiC	3120
Tungusten karbür, WC	2850
Magnezyum oksit, MgO	2798
Silisyum karbür, SiC	2500
Bor karbür, B_4C	2450
Alüminyum oksit, Al_2O_3	2050
Silisyum dioksit, SiO_2	1715
Silisyum nitrür, Si_3N_4	1900
Titanyum dioksit, TiO_2	1605

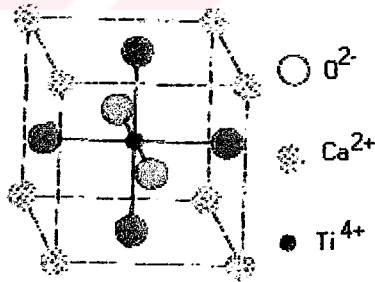
Aşağıda bazı seramik malzemelerin kristal yapıları görülmektedir.

Kalsiyum florürün yapısı, CaF_2 formülüne sahip olup birim hücresi şekil 2.1’de gösterilmiştir. Birim hücrede Ca^{2+} iyonları, F^- iyonları ise dört yüzlü atom yerlerinin sekizini işgal etmektedir. Bu malzeme nükleer biliminde kullanılmaktadır.



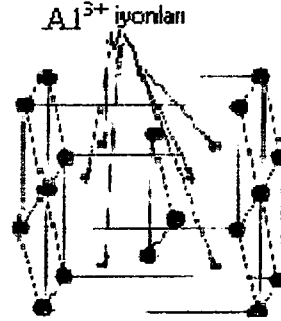
Şekil 2.1. Kalsiyum florür (CaF_2) kristal yapısı [9].

Perovskit (CaTiO_3) kristal yapısı şekil 2.2’de görülmektedir. Bu yapıda kalsiyum iyonları birim hücrenin köşelerinde, oksijen iyonları birim hücrenin yüzey merkezlerinde bulunur. Bu yapıya sahip bileşikler arasında SrTiO_3 , CaZrO_3 , SrZrO_3 gibi bileşikler vardır. Bu yapı piezoelektrik malzemeler için uygundur.



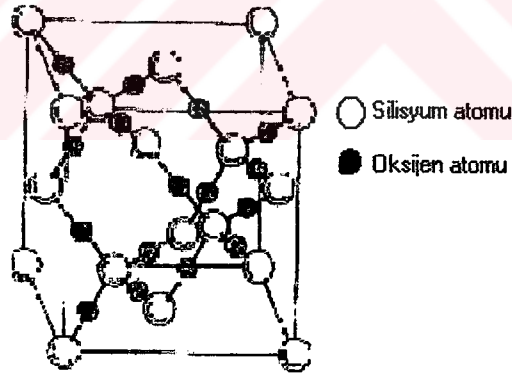
Şekil 2.2. Perovskit’ in (CaTiO_3) kristal yapısı [9].

Korunt' un yapısında şekil 2.3'de görüldüğü gibi oksijen iyonları birim hücre noktalarında bulunur. Alüminyum iyonları sekizyüzlü ara yer yerlerinin üçte ikisini doldurarak elektriksel yansızlığı sağlar.



Şekil 2.3. Korunt'un (Al_2O_3) kristal yapısı [9].

Bir silika olan SiO_2 'nin kristal yapısı şekil 2.4'de verilmiştir. Burada her bir silisyum atomunun dört oksijen atomuyla çevrildiği ve her bir oksijen atomunun iki SiO_4 olduğu görülmektedir. Silikalar, bir çok önemli geleneksel seramiğin ve bir çok farklı tür camın önemli bir bileşenidir.



Şekil 2.4. Bir silika (SiO_2) biçimi olan yüksek kristobalitin yapısı [9].

2. 1. 1. Geleneksel ve Mühendislik Seramikleri

2. 1. 1. 1. Geleneksel seramikler

Geleneksel seramikler, üç temel bileşen olan kil, silika, (flint) ve feldispattan yapılmıştır. Kilin ana maddesi, öz sulu alüminyum silikatlar (Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O) olup, bileşiminde küçük miktarlarda TiO_2 - Fe_2O_3 - MgO - CaO - Na_2O ve K_2O gibi diğer oksitler de bulunur.

Tablo 2.2. Bazı killerin kimyasal bileşimleri [9].

Ana oksitlerin ağırlık yüzdeleri									
Kilin Cinsi	Al_2O_3	SiO_2	FeO_2	TiO_2	CaO	MgO	NaO_2	KO_2	H_2O
Kaolin	37,4	45,5	1,68	1,30	0,004	0,03	0,011	0,005	13,9
Tenn.yumru Kil	30,9	54,0	0,74	1,50	0,14	0,20	0,45	0,72	—
Ky. Yumru Kil	32,0	51,7	0,90	1,52	0,21	0,19	0,38	0,89	—

Geleneksel seramiklerdeki kil, pişirmeyle sertleşmeden önceki işlenebilirliği sağlar ve malzemenin ana bileşenidir. Çakmak taşı ve kuvars diye de adlandırılan silika (SiO_2), yüksek erime sıcaklığına sahiptir ve geleneksel seramiklerin ateşe direncini sağlar. Seramik malzemelerin bu özelliği kaplama teknolojisinde istenen bir husustur. K_2O , Al_2O_3 , 6SiO_2 bileşiminde olan Potas (Potasyum) feldispat, düşük bir erime sıcaklığına sahiptir, dolayısıyla seramik karışım pişirildiğinde camlaşarak bileşenleri birbirine bağlar. İnşaat tuğlası, kiremit, atık su borusu, yer ve duvar karosu termal bileşenlerinin üçünü de içeren doğal kilden yapılmıştır. Beyaz eşya deneni, elektro porselen, sofraya eşyası, sağlık gereçleri gibi ürünler, belirli bileşenlerdeki kil, silika ve feldispattan yapılır.

2. 1. 1. 2. Mühendislik Seramikleri

Başlıca bileşeni kil olan geleneksel seramiklerin aksine mühendislik seramikleri veya teknik seramikler; başlıca saf oksitlerin, karbürlerin ve nitrürlerin saf bileşenidir. Bazı önemli alan ve kaplama teknolojisinde kullanılan mühendislik seramikleri; alümina (Al_2O_3), silisyum nitrür (Si_3N_4), silisyum karbür (SiC), ve zirkonya (ZrO_2)'dir.

Genellikle toz halinde arı malzemeler, yüksek sıcaklıkta preslenerek şekillendirilirler. Presleme sırasında difüzyonla parçacıklar birbirine kaynar ve sürekli boşluksuz bir kristal

yapıya dönüşürler. Çok sert ve gevrek olduklarından içlerinde mevcut boşluk, çatlak ve benzeri kusurlar mukavemeti büyük ölçüde azaltır, bu nedenle büyük bir özenle üretilmeleri gerekir.

İleri teknoloji yada mühendislik seramiklerinin ergime sıcaklıkları çoğunlukla 2000 °C'nin üzerindedir. Özellikle yüksek sıcaklığa ve aşınmaya dayanıklılık istenen yerlerde kullanılırlar. Bunların içinde Al_2O_3 (alümina) en geniş uygulama alanına sahiptir. Kesici takım, yapay kemik, motor parçaları, entegre devre altlığı gibi değişik amaçlarla kullanılır. Aşınmaya dayanıklı, kırılma tokluğu yüksek ve yüksek sıcaklığa dayanıklı kısmen dönüşmüş zirkonya (ZrO_2) ile soğutma ve yağlama gerektirmeyen motor parçaları üretmeye elverişlidir [9].

2. 2. Seramik Malzemelerin Özellikleri

Seramikler genellikle çok sert ve gevrekler. Basınç mukavemetleri çok yüksek olmakla beraber çekme mukavemetleri çok düşüktür. Gevrek olduklarından iç yapı kusurları, çentikler, çizikler ve mikro çatlaklar gerilme yığılmasına neden olur, dolayısıyla çekme etkisinde kolay kırılırlar. Seramiklerde basınç mukavemeti, ortalama olarak çekme mukavemetinin sekiz katıdır. Isıl işlemle yüzeyde artık basınç gerilmeleri oluşturarak çekmeye karşı mukavemetleri artırılabilir.

Seramiklerin kaymaya karşı direnci çok yüksektir. Plastik şekil değiştirmeksizin kırılırlar. Ayrıca bazıları çok sert olduklarından aşındırıcı malzeme (abrasiv) olarak geniş ölçüde kullanılırlar. Ar Al_2O_3 kristali (korandum) doğada elmaştan sonra en sert cisimdir. Zımpara tozu çoğunlukla Al_2O_3 içerir. SiC, TiC ve WC bileşikleri de çok serttir. Bunlar toz halinde elde edilirler ve uygun bir metalle sinterlenerek sert kütle haline getirilirler. Seramik ve metal tozları karışımı metalin ergime sıcaklığına kadar ısıtılır, ergiyen metal katı parçacıkların arasına doldurur, basınç uygulanarak boşluklar azaltılır. % 20 metal ve % 80 seramik içeren bu malzemelere sermetler ve uygulanan yönteme toz metalürjisi yöntemi denir. Sermetler kesici ve aşındırıcı üretiminde kullanılır [10].

Tablo 2. 3. Bazı mühendislik seramik malzemelerinin mekanik özellikleri [9].

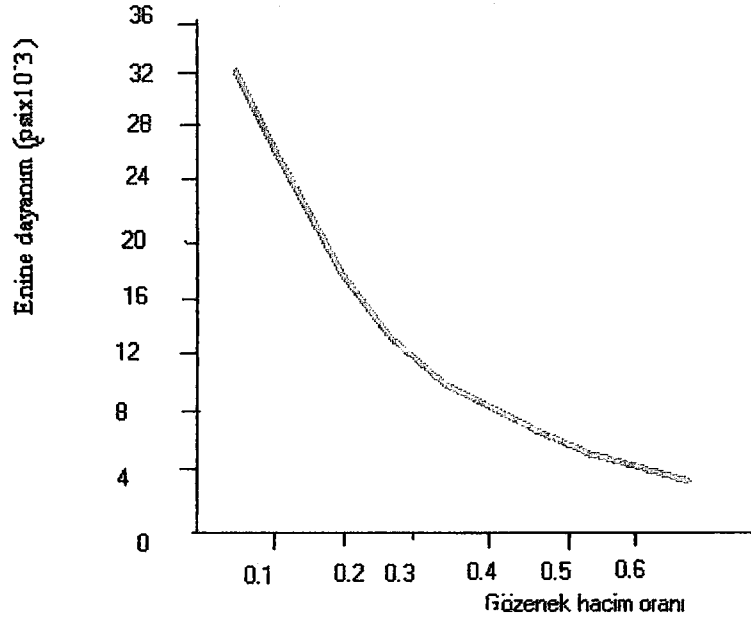
Malzeme	Yoğunluk (gr/cm ³)	Basma dayanımı. (Mpa)	Çekme dayanımı. (Mpa)	Eğilme dayanımı. (Mpa)	Kırılma tokluğu. (Mpa $\sqrt{m}$)
Al ₂ O ₃ (% 99)	3,85	2585	207	345	4
Si ₃ N ₄ (sıcak press)	3,19	3450	-----	690	6,6
Si ₃ N ₄ (tepkime bağlı)	2,8	770	-----	255	3,6
SiC (sinter)	3,1	3860	170	550	4
ZrO ₂ , % 9 MgO (kısmen kararlılaştırılmış)	5,5	1860	-----	690	8

2. 3. Seramik Malzemelerin Dayanımını Etkileyen Faktörler

Seramik malzemelerin mekanik bozulmaları çoğunlukla yapısal kusurlardan dolayı olur. Çok kristalli seramiklerde görülen ana kusur kaynakları arasında, yüzey işlemleri sırasında oluşan yüzey çatlakları, boşluklar (gözenekler), kalıntılar ve üretim sırasında oluşan iri taneler sayılabilir [11].

Gevrek seramik malzemelerdeki gözenekler gerilmenin yoğunlaştığı bölgelerdir ve bir gözenekteki gerilme kritik değere ulaştığında bir çatlak oluşur ve ilerler. Çünkü bu malzemelerde sünek metallerin biçim değiştirmesinde olduğu gibi büyük miktarda enerji soğuran süreçler yoktur. Bu nedenle çatlak ilerlemeye başladığında kırılma oluncaya kadar devam eder. Gözenekler, yük uygulanan kesit alanını azaltarak malzemenin dayanabileceği gerilmeyi düşürdükleri için seramik malzemelerin dayanımında kötü etki yapar. Bundan dolayı, seramik malzemelerde gözeneklerin büyüklüğü ve hacim oranı dayanımlarını etkileyen önemli etkenlerdir. Şekil 2.2 alümina'nın enine çekme dayanımının, gözeneklerin artan hacim oranıyla azalmasını göstermektedir.

Seramik malzemelerin dayanımında kusurlar çok önemli rol oynar. Büyük bir kusur, seramiğin dayanımını etkileyen ana faktör olabilmektedir. Büyük gözenekleri olmayan, tamamen yoğun seramik malzemelerde, kusur büyüklüğü genellikle tane büyüklüğüne bağlıdır. Gözeneksiz seramiklerde, saf bir seramik malzemenin dayanımı tane büyüklüğünün fonksiyonudur. Daha ince taneli seramik tane sınırlarında, daha küçük boyutta kusura sahip olacağından iri taneliye göre dayanımı daha yüksektir. Çok kristalli seramik malzemenin dayanımını; kimyasal bileşim, mikro yapı ve yüzey koşulları gibi çeşitli faktörler belirler.



Şekil 2.5. Saf alüminanın enine dayanımında gözenekliliğin etkisi [9].

2. 4. Seramiklerin Yorulma Kırılması

Metallerde yorulma kırılması, tekrarlanan çevrimli gerilme altındaki sertleşmeli bölgede çatlakların büyümesiyle olur. Bundan dolayı, seramiklerde yorulma kırılması pek görülmez. Örneğin, türbin motorları ve benzeri uygulamalarda, çevrimli gerilmelere karşı koyabilecek daha tok seramik yapmak için araştırmalar sürdürülmektedir [9].

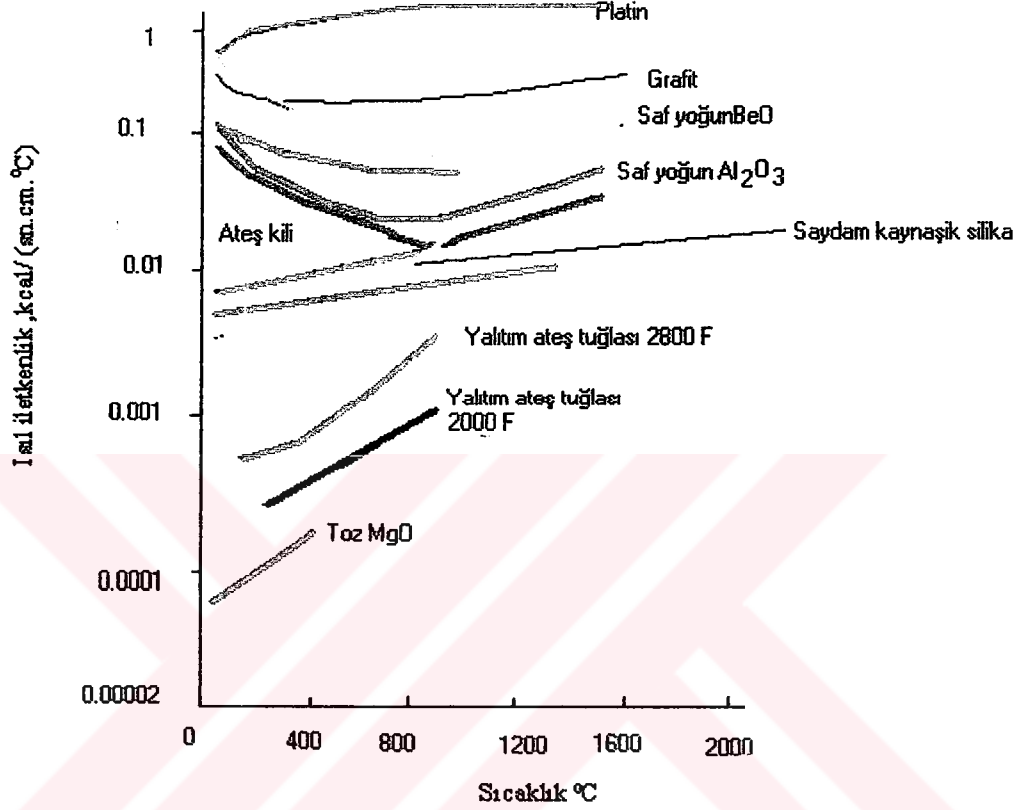
2. 5. Seramik Aşındırıcı Malzemeler

Bazı seramik malzemelerin yüksek sertlikleri, onları daha düşük sertlikteki malzemelerin kesilmesi, taşlanması ve parlatılması için uygun aşındırıcı malzeme yapar. Kaynaşık (fused) alümina (alüminyum oksit) ve silisyum karbür en çok kullanılan seramik aşındırıcılardır. Tabaka ve tekerlek şeklindeki aşındırıcı ürünler, seramik tanelerin bağlanması ile üretilir. Bağlayıcılar; pişmiş seramikler, organik reçineler ve lastiklerdir. Bu amaçla kullanılan seramik taneler keskin ve sert olmalıdır. Ayrıca aşındırıcı ürün, hava veya sıvının akabilmesi için kanallar oluşturacak kadar yeterli gözenekliliğe sahip olmalıdır [9].

2. 6. Seramiklerin Isıl Özellikleri

Çoğu seramik malzemeler, güçlü iyonik-ortaklaşım bağlar nedeniyle genellikle düşük ısıl iletkenliğe sahiptir ve iyi ısıl yalıtıcıdır. Şekil 2.3’de bazı seramik malzemelerin ısıl iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Yüksek ısıl dirençleri nedeniyle seramik

malzemeler “güçerir” (sıvı ve gaz sıcak ortamlardaki etkilere dayanan malzeme) olarak kullanılır. Güçerir metal, kimya, seramik ve cam endüstrilerinde çok miktarlarda kullanılmaktadır [9].



Şekil 2.6. Seramik malzemelerin geniş bir sıcaklık aralığında ısı iletkenlikleri [9].

2. 7. Seramik Güçerir Malzemeler

Alüminyum oksit ve magnezyum oksit gibi yüksek erime sıcaklığına sahip pek çok saf seramik malzeme, endüstriyel güçerir malzeme olarak kullanılabilir, fakat pahalıdır ve şekillendirilmesi zordur. Bunun için endüstriyel güçerirler, seramik bileşiklerin karışımı olarak yapılır. Seramik güçerir malzemelerin önemli özellikleri, kaplama teknolojisinde de önemli olan düşük ve yüksek sıcaklıktaki dayanımı, kitle yoğunluğu ve gözenekliliğidir. Seramik güçerir malzemelerin çoğu 2,1 ile 3,3 gr /cm³ arasında kitle yoğunluğuna sahiptir [9].

3. SERAMİK KAPLAMALAR VE KAPLAMA YÖNTEMLERİ

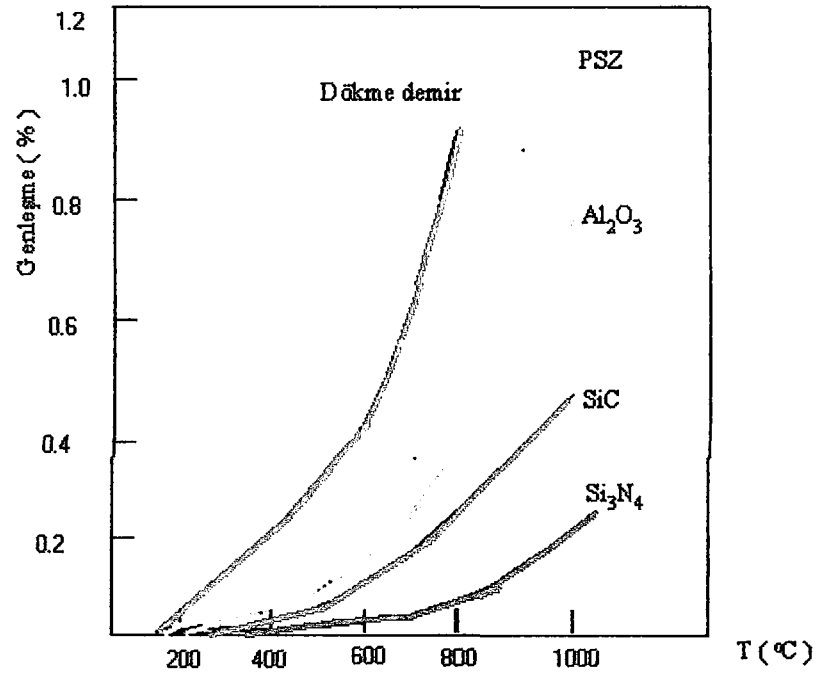
Günümüz endüstrisindeki malzeme dizaynında seramik kaplamalar; erozyon, aşınma, korozyon, ısı, elektrik, optik ve dekorasyon alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Otomotiv endüstrisinde malzemelerin kalitesinin geliştirilmesi ile ilgili bir çok çalışma yapılmaktadır. Bilhassa hareketli parçaların daha yüksek termik, mekanik ve korozyon mukavemetine sahip olması için yapılan araştırmalar büyük bir hızla devam etmektedir. Yukarıda sayılan bu özellikleri geliştirmek için seramik malzemelerden istifade edilmektedir. Ancak bu özellikleri elde etmek için malzemelerin tamamen seramikten üretilmesi bir çok problemler meydana getirmektedir. Seramik malzemelerin bu olumsuzluklarını gidermek için malzemelerin tamamen seramikten yapılması yerine, mevcut metalik malzemenin kaplanması yoluna gidilmekte, böylece dizayn esnekliği olan parçalar daha hafif ve ucuz olarak üretilmektedir.

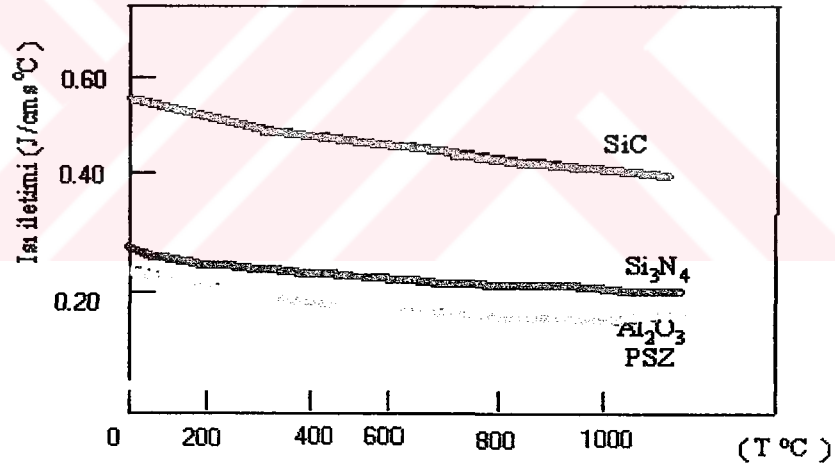
Seramik kaplamalarda kaplama, aşınma direnci sağlarken substrate (ana malzeme) ise şoka karşı direnç sağlamaktadır [12].

Seramiklerin metal olan malzemelerin üzerine kaplanması, her iki malzemenin termal genleşme katsayılarının uygunluğu ile doğru orantılıdır. Bugün mevcut çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre (Partially-Stabilized Zirconia) PSZ cinsi seramikler için en uygun metal malzemenin dökme demir olduğu bildirilmiştir [13].

Şekil 3.1'de tipik seramiklerin ve dökme demirin genleşme katsayıları görülmektedir. Diğer taraftan ısı yalıtım amacıyla kullanılan seramik malzemeler, düşük ısı geçirgenlikleri ve termal gerilmeleri azaltmaları sebebiyle önemli dizayn alternatifleri (değişikliklerini) mümkün yapmaktadırlar.



Şekil 3.1. Tipik seramiklerin ve dökme demirin genleşme katsayıları [13].



Şekil 3.2. Tipik seramiklerin ısı iletimi değerleri [13].

Malzemelerdeki ısı geçişinin önüne geçmek için yapılan kaplamalar kalın ve ince kaplamalar olarak iki gruba ayrılmaktadır. Kalın kaplamalar 6,25 mm, ince kaplamalar ise 0,5 mm'ye kadar olan kaplamalardır. İnce kaplamalar genellikle gaz türbinlerinde, dizel ve benzin motorlarının piston kafaları, supaplar ve silindir gömleklerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [13].

Isı yalıtım amacıyla yapılan kaplamalarda, kaplama tekniği, kaplama kalınlığı ve kaplama malzemesi elde edilen başarıda önemli bir faktör olmaktadır. Adyabatik olarak

tanımladığımız düşük ısı kayıplı seramik motorların dizaynı için; yüksek alaşımlı çeliklerden uzak durma, bağımsız soğutma, güvenilirliğin sağlanması, tasarım karışıklılığının minimuma indirilmesi ve uygun kaplama kalınlığının tespit edilmesi ilkeleri yerine getirildiğinde yapılan kaplama işleminde uzun süre dayanıklılık ve motor performansının artırılması gibi faydalar sağlanabilmektedir.

3. 1. Seramik Kaplamada Kullanılan Malzemeler

Günümüz endüstrisinde kullanılan seramik malzemelerin, fiziksel ve kimyasal yapıları değiştirilerek metallere uygun özellikler göstermesi sağlanmaktadır. Tablo 3.1 ve 3.2’de gösterildiği gibi mühendislik seramikleri olarak adlandırılan bu seramik malzemelerdeki;

- a) Korozyon direnci,
- b) Düşük ısı iletimi,
- c) Düşük sürtünme ve aşınma dirençlerinden dolayı kaplama alanlarında kullanımları artmaktadır.

Statik makine parçalarında, genellikle aşınma direnci gösteren kaplamalar kullanılmasına rağmen hareketli parçalarda da kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Nitrürler, borürler ve karbürler sert kaplamaların yapımında kullanılan bileşikler olup, özellikle piston veya supaplar üzerinde uygulanmaktadır. Seramiklerin başlıca özellikleri şunlardır;

- 1) İyi ısı yalıtımına sahiptirler,
- 2) Termal şok dirençleri iyidir,
- 3) Düşük sürtünme özelliğine sahiptirler,
- 4) Hammaddeleri tabiatta çok ve ucuzdur,
- 5) Yoğunlukları düşüktür,
- 6) Mekanik aşınmaya karşı dayanıklıdırlar,
- 7) Kimyasal aşınmaya karşı dayanıklıdırlar,
- 8) Yüksek sıcaklıklara dayanıklıdırlar,
- 9) Isı iletkenlikleri ve özgül ısıları düşüktür [9].

Tablo 3.1. Seramik kaplamalar ve uygulama alanları.

Uygulama	Kaplama
Aşınma direnci	TiN, TiC, Ti (CN), ZrN, TaN, Si ₃ N ₄ , WC- TiC- TaC, TaC, BC, ZrB ₂ , HfB ₂ , TiZrB, ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ , NiO+ CaF ₂ / SrF ₂ , Cr ₃ C ₂ , Cr ₇ C ₃
Erozyon direnci	Ta ₂ O ₅ , TaN, NiOCaF ₂ , NiCaF ₂ , Cr ₃ C ₂ , WTiC ₂
Karbürizasyon direnci	NbB ₂ , TaB ₂ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, BeO ₂ , HfO ₂ , T ₂ O ₅ , CeO ₂ , Ru, Ir oksitleri
Oksidasyon direnci	NiOCaF ₂ , NiCaF ₂ , WSi ₂ / RO ₂ , ZrSi ₂ / ZrSi, MOSi ₂ / ZrO ₂ , MOSi ₂ , NbSi ₂ , VSi ₂ , ZrSi ₂ , CrSi ₂ , TiSi ₂ , TiB ₂ , HfB ₂ , ZrB ₂ , HfC
Difüzyon direnci	TiC, TiN

Tablo 3.2. Seramik kaplama teknikleri ve kaplama malzemeleri [14].

Kaplama Tekniği	Kaplanan Seramik Tozlar
CVD	SiO ₂ , TiSi, SiB, Si ₃ N ₄ ,
PVD	TiN, TaN, VC, TiC, In ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃
Plazma Spreyleme	Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , ZrN, MoS ₂ , CaF ₂ , ZrO ₂ , TiO ₂
Alev Spreyleme	ZrO ₂ , AlO ₃ , Cr ₃ C ₂
Detonasyon Tekniği	WC, Cr ₃ C ₂ , WTiC, Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , Cr ₂ O ₃
Sol-Jel	CeO ₂ , SiO ₂
Sıçratma	TiN, Ta ₂ O ₅ , TiO ₂ , Fe-Cr- P- C, Cr ₃ B, Ti ₃ B
Sıcak İzostatik Presleme	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , MgO, SiO ₂ , BeO

3. 2. Seramik Kaplama Yöntemleri

3. 2. 1. Termal Sprey Kaplamalar

Günümüz endüstrisinde substrate (ana malzeme) malzemesinin, püskürtülecek malzemenin, kaplanacak parçanın çalışma ortamının özellikleri dikkate alınarak kaplama yöntemi belirlenir ve kaplama işlemi yapılır. Metalik veya metalik olmayan malzemelerin kaplanmasında çok çeşitli yöntemler vardır. Bunların başında da termal spreycaplama yöntemleri gelmektedir.

Bu yöntemle ilgili ilk çalışmalar 1920’li yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemin kullanıldığı ilk yıllarda önceleri bir eriyik metal sıvısının püskürtülmesini kapsayan yöntem, daha sonraları çok hızlı bir gelişme göstermiştir. Bu yöntemde, kaplama yapılacak

malzeme partikülleri (eriyik halde) yüksek bir hızla malzeme yüzeyine püskürtülerek malzeme yüzeyinde tabakalı bir yapı meydana getirilir.

Termal sprey proseslerinde kaplanacak yüzey, boyanın püskürtülmesindeki mantığa benzer şekilde ergimiş damlacıklar ile bombardıman edilmektedir. Bu yöntemden farklı olarak kaplama malzemesi oda sıcaklığında sıvı değildir. Bu sistemde kaplama malzemesi, yüksek enerjili bir ısı kaynağı tarafından eritilmek üzere ısıtılmakta ve kaplanacak malzemenin yüzeyine spreylenecektir [15].

3. 2. 2. Yüzey Kaplama Yöntemleri

Malzemeler üzerine seramik kaplamak için birçok yöntem mevcuttur.

Bunlar;

1. CVD: Kimyasal buhar çökertme
2. PVD: Fiziksel buhar çökertme
3. Sıçrama ile kaplama
4. İyon kaplama
5. EBE: Elektron hüzmeye buharlaştırmasıyla kaplama
6. FS: Alevle püskürtme
7. PS: Plazma püskürtme
8. DG: Detonasyon tabancası
9. IP: Reaktif iyon kaplama
10. HİP: Sıcak izostatik presleme ile kaplama [15].

3. 2. 2. 1. Termal Sprey Kaplama Malzemeleri

Termal sprey yönteminde düşük ergime noktalı metaller, seramikler, refrakter karakterli metaller, camlı metaller, polimerler ve bu malzemelerin kombinasyonları gibi geniş bir aralıktaki sıvı hallerinde kararlı olan tüm malzemeler termal sprey yöntemlerinden en az biri kullanılarak altlık malzemeleri kaplamada kullanabilmektedirler [15].

3. 2. 2. 2. Termal Sprey Yöntemi

Termal sprey yöntemleri iki grup altında incelenmektedir. Birinci grup yanma işlemi olarak adlandırılır. Burada hidrokarbon olan yakıtın (asetilen, propan, hidrojen, vb.) oksijen (veya hava) ile kaplama malzemesinin ergitilip altlık (kaplanacak) malzeme üzerine spreyleneceği için gerekli entalpi ve kinetik enerji sağlanması esasına dayanmaktadır. İkinci grupta ise elektrik gücü, toz partiküllerini spreylemek için kullanılan enerjinin kaynağı olmaktadır.

Tablo 3.3. Ticari termal sprey tekniklerine ait bazı önemli özellikler [16].

Kaplama tekniği	Isı kaynağı	Sevk edici	Beslenen malzeme	Sprey tabancası sıcaklığı (°C)	Partikül hızı (msn ⁻¹)	Kaplama malzemesi türü	Kaplama porozitesi (%)	Nisbi bağ Muk.
Alevle spreyleme	Oksiasetilen/ oksihidrojen	Hava	Tel Toz	3300	240 30-120	Metalik Metalik/ Seramik	8-15 10-20	İyi
Plazma spreyleme	Plazma arkı	İnert gaz	Toz	16000	120-450	Metalik/ Seramik/ Plastik ve karışımları	2-5	İyi
Detonasyon tekniği	Oksijen/Asetilen /Gaz patlaması	Plastik şok dalgaları	Toz	4500	800	Metalik/ Seramik ve karışımları	0,1-1	Çok iyi
Elektrik ark spreyleme	Elektrotlar arasındaki ark	Hava	Tel	6000	240	Nispeten malz.	8-15	Çok iyi

Bunlara alev spreyleme, elektrik ark spreyleme, çeşitli yüksek hızlı oksit yakıt teknikleri ve detonasyon tekniği gibi çeşitli yöntemler örnek olarak verilebilir. Tablo 3.3 yukarıda belirtilen gruplara örnek olarak verilebilir.

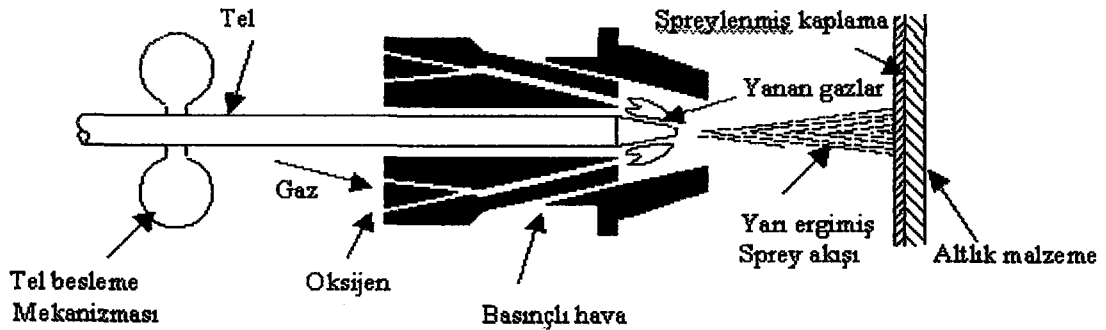
Alev, elektrik ark, detonasyon ve plazma spreyl yöntemleri ticari olarak kullanılan en önemli termal spreyl yöntemleridir.

Bu yöntemlerde ince toz veya tel (çoğunlukla metal) malzeme bir gaz akışı içerisinde taşınmakta ve ergitilmek üzere yoğun bir yanma alevi içerisinde geçirilmektedir. Malzemenin ısıtılması ve hızla genişleyen gaz akışı ile substrate (kaplanacak malzeme) üzerine ergimiş halde bulunan tozlar spreylenmektedir. Bu yöntemle yalnız yanma alevi içerisinde ergiyebilen malzemeler (çoğunlukla metaller) spreylenebilmektedir.

Bu yöntemle kaplama kalınlıkları, 50 μm 'den birkaç mm'ye kadar değişen aralıkta uygulanabilmektedir. Alev spreylemeden önce iş parçasının üzerinde nemin atılması için parça ön ısıtılamaya tabi tutulmaktadır. Bu işlem alev spreyl tabancasının substrate malzeme üzerinde dolaştırılmasıyla gerçekleştirilmektedir [15].

3. 2. 2. 3. Tel Alev Spreyl Yöntemi

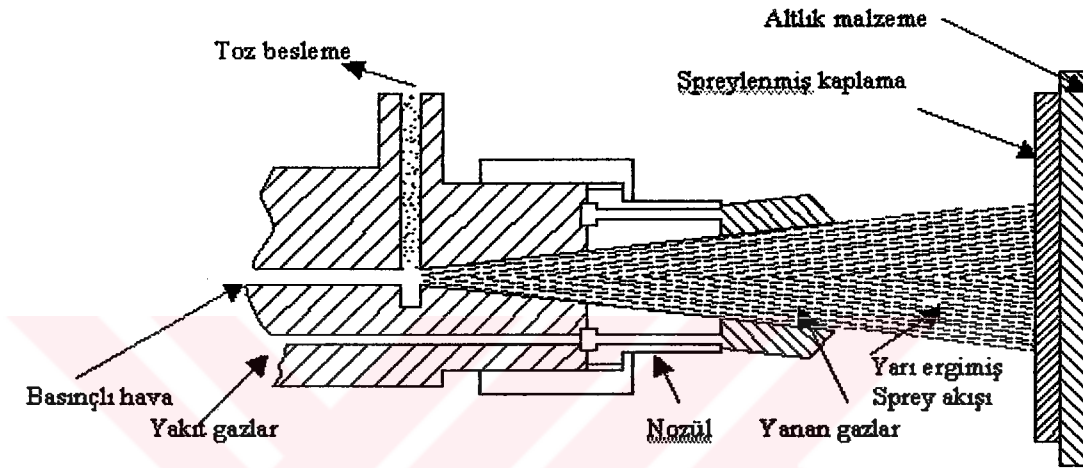
Bu metod ile tel halinde çekilebilir ve yanma alevi içerisinde ergiyebilen bütün metaller kapolanacak malzeme üzerine spreylenebilmektedir. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi metal, tel kontrollü bir şekilde tel uçlarının ergitildiği bir nozul içerisinde beslenmektedir. Diğer taraftan nozulün dış kısmından da sürekli olarak basınçlı hava beslenmektedir. Bu yöntemde, tel ucu sürekli olarak ergime noktasına kadar ısıtmakta ve sonra basınçlı hava yardımıyla partiküller halinde ayrıştırılıp iş parçası üzerine spreylenmektedir.



Şekil 3.3. Tel alev spreyleme yönteminin şematik gösterilişi [16].

3. 2. 2. 4. Toz Alev Sprey Yöntemi

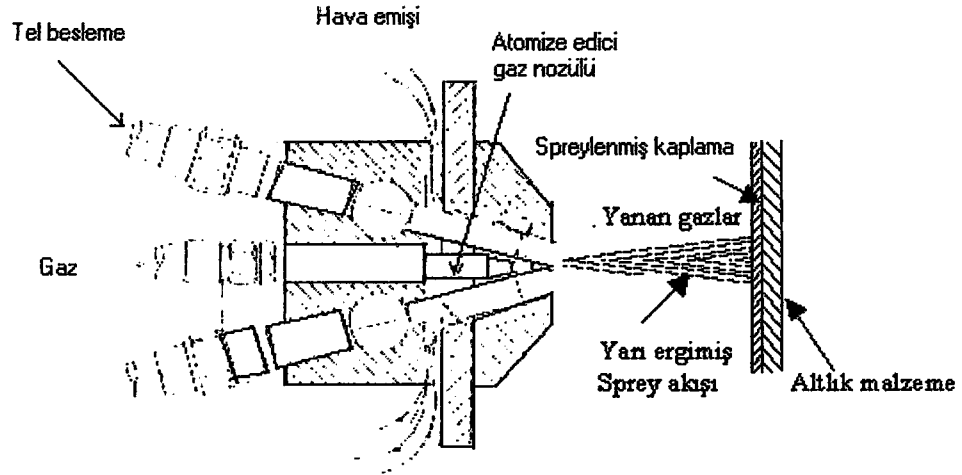
Bu yöntemde toz, şekil 3.4’de görüldüğü gibi malzeme alev sprej tabancasının üzerindeki bir besleyiciden yer çekiminin etkisiyle beslenmekte ve bir taşıyıcı gazın yardımı ile toplanıp ergitilmek üzere tabancanın nozulüne taşınmaktadır. Bu kısımda ergitilen tozlar kaplama işlemini meydana getirmek üzere substrate (kaplanacak malzeme) üzerine püskürtülmektedir [16].



Şekil 3.4. Toz alev sprej yönteminin şematik gösterilişi [17].

3. 2. 2. 5. Elektrik Ark Spreyleme

Bu yöntemde, sistem içerisinde iki tel arasında sürekli bir ark meydana getirilmektedir. Bu telleri ergitmek için gerekli ısı, bu elektrik arkı tarafından sağlanmaktadır. Meydana getirilen ark, tel uçlarını ergitmektedir. Ergitilen tel uçları, şekil 3.5’de görüldüğü gibi hızlı ama soğuk hava jeti tarafından atomize edilmekte ve daha sonra kaplamayı meydana getirmek üzere substrate (kaplanacak malzeme) üzerine püskürtülmektedir [16].



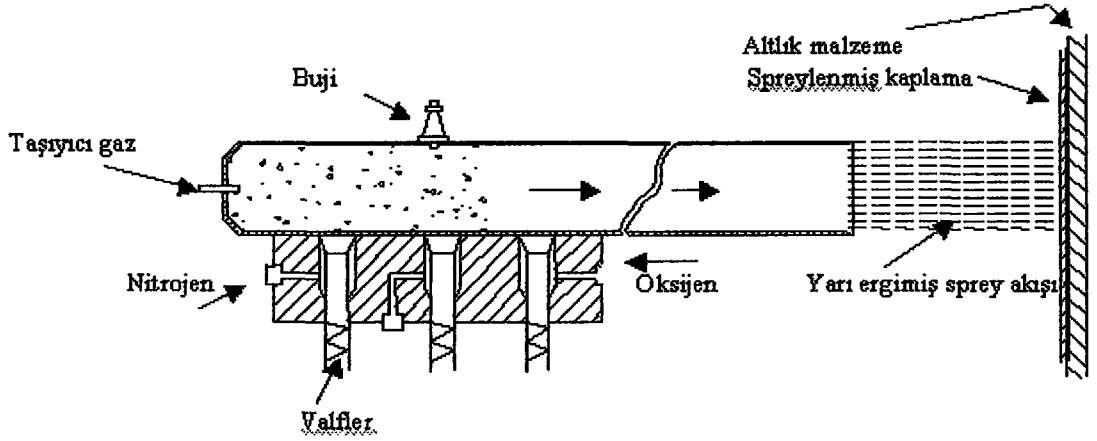
Şekil 3.5. Elektrik ark spreyleme yönteminin şematik gösterişi [17].

Bu işlemde kullanılan teller, alev spreyleme işleminde kullanılanlar ile benzerdir. Elektrik ark spreylenmiş kaplamalar alev spreylenmiş kaplamalar ile mukayese edildiklerinde çeşitli üstün özelliklere sahiptir:

- 1) Çökelme hızı daha yüksektir,
- 2) Yüksek bağ mukavemetine sahiptir,
- 3) Kaplamanın maliyeti daha düşüktür,
- 4) Kaplamadaki oksit miktarı azaltılabilmektedir.

3. 2. 2. 6. Detonasyon Yöntemi

Bu yöntemde belirli miktarlarda oksijen ve asetilen, şekil 3.6'da gösterildiği gibi valfler yardımıyla yanma odası içerisine gönderilmektedir. Taşıyıcı azot gazı içerisindeki toz malzeme hassas bir şekilde yanma odasına püskürtülmektedir. Bütün valfler kapandığı zaman gaz karışımı bir ateşleme bujisi ile ateşlenerek tutuşturulmaktadır. Ateşlemeden hemen sonra birkaç salise içerisinde oluşan patlama ve şok dalgaları toz partiküllerini ergime noktasına yakın sıcaklıklara ısıtmakta ve yaklaşık olarak 800 ms^{-1} 'lık bir hızda substrate (kaplanacak malzeme) üzerine püskürtülmektedir. Bu işlem saniyede birkaç kez tekrarlanmaktadır [17].



Sekil 3. 6. Detonasyon yönteminin şematik olarak gösterilişi [17].

3. 2. 2. 7. Plazma Püskürtme Yöntemi

Plazma püskürtme sistemi, bir çok endüstri alanında kullanılan ve modern endüstrinin ihtiyaç duyduğu yüksek performanslı yüzeylerin üretimi için faydalanılan en önemli teknolojilerden biridir.

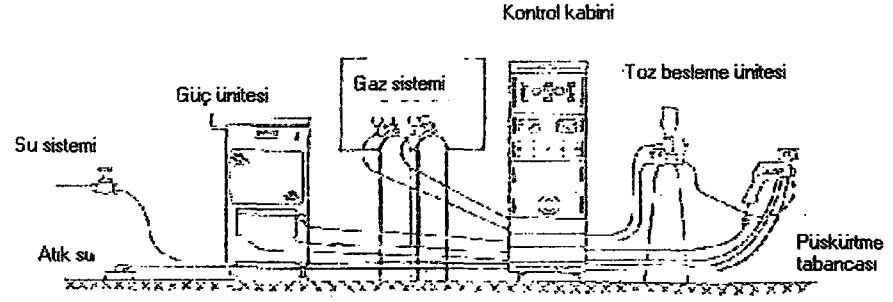
Bu yöntemde meydana getirilen plazmanın sahip olduğu yüksek sıcaklık, aşırı derecede buharlaşmayan ve ayrışmayan tüm malzemelerin (seramikler, metaller, plastikler ve bu malzemelerin kombinasyonları) çok kısa bir süre içerisinde ergimesine ve spreyleneğine imkan vermektedir [15].

Bu yöntemde toz partiküllerinin ertitilmesi, soğuması ve kaplamayı meydana getirmesi tek bir proseste bir araya getirilmektedir.

Bu yöntemdeki asıl amaç, pahalı olmayan bir ana malzeme üzerine ince koruyucu değeri yüksek bir tabaka meydana getirmektir. İşlem, iyonize olmuş bir gaz içinde erimiş olan toz formundaki malzemenin, kaplanacak yüzeye çok hızlı bir şekilde püskürtülmesi şeklinde olmaktadır.

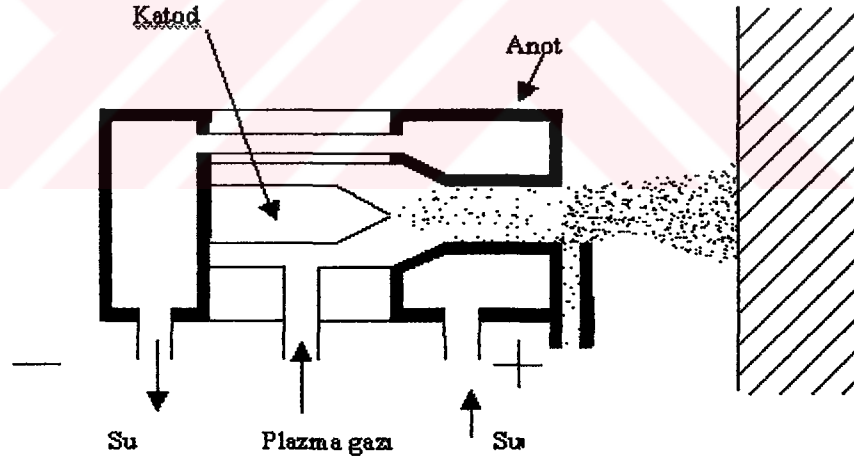
Plazma püskürtme sisteminde;

- 1) Güç ünitesi,
- 2) Gaz besleme ünitesi,
- 3) Sprey tabancası,
- 4) Toz besleme ünitesi,
- 5) Soğutma ünitesi,
- 6) Kontrol ünitesinden meydana gelmektedir [18].



Şekil 3.7. Plazma sprej kaplama sisteminin şematik gösterilişi [18].

Bu yöntemde, şekil 3.7’de gösterildiği gibi elektriksel olarak meydana getirilen bir ark sayesinde gaza enerji depolanır. Bu durumda gazın entalpisi yanma olayından tamamen bağımsız olup, 10^9 KJ / kg mertebesine ulaşır. Oysaki bir alev için bu entalpi değeri 10^7 KJ / kg değerinde olmaktadır. Püskürtülecek seramik tozu plazmaya karıştırılır, böylece püskürtülecek toz erir ve yüksek bir hızla kaplanacak malzeme yüzeyine püskürtülür. Bu yöntemde kullanılan bir plazma tabancası şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3. 8. Plazma tabancasının şematik görünüşü [19].

Plazma tabancasının verimli bir şekilde çalışabilmesi için çok yüksek güçte bir doğru akım kaynağına gereksinim vardır. Çoğunlukla 1000 amperlik bir güç kaynağı kullanılır ve sistem su ile soğutulmaktadır. Sistemde kullanılan gaz Ar-H₂ veya N₂-H₂’dir. Çalışma esnasında meydana gelen sıcaklık yaklaşık olarak 15000 °K’dir. Bu yöntemle yapılacak kaplamalarda başarılı bir kaplama, mevcut teknoloji ile 0,25 - 0,5 mm aralığındadır. Bu aralığın

haricinde yapılan kaplamalarda termal gerilme sebebi ile plazmada kabuklanmalar meydana gelebilmektedir [19].

Tablo 3. 4. Plazma gazlarının temel fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellik	Plazma gazları			
	Ar	He	N ₂	H ₂
Relatif molar ağırlık	39,944	4,0002	28,016	2,0156
Özgül ağırlık (Kg m ⁻³)	1,783	0,1785	1,2505	0,0898
Isıl iletkenlik katsayısı (W/m.K)	0,01633	0,14363	0,0238	0,1754
Özgül ısı kapasitesi (Kj/kg.K)	0,511	5,233	1,046	14,268
İyonize potansiyeli (V)				
İlk kademe	15,7	24,05	14,5	13,5
Son kademe	27,5	54,1	29,4	-
Sıcaklık (K)	14 000	20 000	7300	5400
Ark voltajı (V)	40	47	60	62
Ark girişi (KW)	-	50	65	120

Tablo 3. 5. Çeşitli endüstrilerde aşınmaya karşı dayanım amacıyla kaplama işleminin uygulandığı parçalar ve kullanılan kaplama malzemeleri.

Uygulama alanları	Kaplanan parçalar	Kullanılan seramik malzemeleri
Otomotiv	Sekmanlar, supaplar, yanma odası	ZrO ₂ -MgO, Al ₂ O ₃ -ZrO ₂ -Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -Y ₂ O ₃
Makinacılık	Şaftlar, yatak yüzeyleri, borular, brülörler	Al ₂ O ₃ -TiO ₂ , ZrSiO ₄ , Cr ₂ O ₃
Tekstil	İplik yönlendirme elementleri, yönlendirme, sarma ve dağıtma silindirleri, germe kasnakları, iplik durdurucuları, iplik klavuzları	WC-Co Cr ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ -TiO ₂
Kağıt ve madencilik	Kağıt kurutma silindirleri, elekler, filtreler	Cr ₂ O ₃ , MnO ₂ Al ₂ O ₃ -TiO ₂
Hidrolik makineler	Türbin nozülleri, santrifüj pompa gövdeleri, pompa ağızları, piston çubukları	Al ₂ O ₃ Cr ₂ O ₃
Uçak jet motorları	Klavuz yataklar, yakıt nozülleri, kompresör bıçakları, yanma odaları	WC-Co Al ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ -TiO ₂
Metallurji	Pistonlar, kalıplar, elektrotlar, merdaneler	Al ₂ O ₃ , MgO, ZrO ₂ ZrSiO ₄ Al ₂ O ₃ -TiO ₂

Tablo 3.4'de plazma gazlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri, tablo 3.5'de ise çeşitli alanlarda kullanılan seramik malzemeler ve özellikleri verilmektedir. Alternatif kaplama teknikleri ile V, Ti, Zr, Hf, Nb ve Ta'nın nitrür ve karbon nitrürlerini ihtiva eden sert kaplamalar ile feldispat, boraks, kuvars ihtiva eden kaplamalar çeşitli metaller üzerine uygulanabilmektedir.

Karbürler, nitrürler veya borürler sert kaplamaların yapımında kullanılan bileşikler olup, bilhassa piston veya supaplar üzerine TiN, TiC, ve Ti (CN); demir alaşımları için ise TiB₂ seramik kaplamaları başarılı bir şekilde uygulanmaktadır.

3. 2. 2. 8. CVD (Kimyasal buhar birtirme) Yöntemi

Kimyasal buhar çökertme (CVD) yönteminde, çökertme 850–1050 °C gibi yüksek sıcaklıklarda yapılır. Gaz olarak H₂, N₂, CH₄ ve CO kullanılır. Bu işlem vakum ortamında yapılır. Bu yöntemde yapılan kaplamalarda korozyon ve aşınma direnci iyidir Kimyasal buhar çökertme yöntemi (CVD) kullanılarak roket lülelerindeki erozyonun (Re, W ve BC malzemelerinin kullanılmasıyla) azaldığı bildirilmiştir [13].

3. 2. 2. 9. PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) Yöntemi

Fiziksel buhar çökertme yöntemi, vakum altında bulundurulmuş malzemelerin buharlaştırılarak ve sıçratılarak atomların yüzeyden kopartılması ile kaplanacak olan ana malzeme (substrate) yüzeyine (atomsal veya iyonik olarak) biriktirilmesi esasına dayanır.

Günümüzde PVD kaplama yöntemleri ile, farklı tiplerdeki kaplama alt yapı malzeme bağları gibi çok değişik tiplerdeki yüzey kaplama yapıları elde edilmektedir. Bu yöntem, metal ve plastik endüstrisi gibi birçok alanda kullanım imkanı sunmaktadır. PVD sisteminin oluşum sırası şöyledir:

- 1) Kaplama malzemesinin buharlaştırılması,
- 2) Buharın kaplanacak yüzeye taşınması,
- 3) Kaplanacak yüzeyde ince film tabakası oluşturacak şekilde buharın çökertilmesi.

Tüm bu işlemler sadece bir vakum odası içinde yapılabilmektedir.

PVD tekniği ile yapılan kaplamaların özellikleri:

- 1) Isıl işlem görmüş takım çeliklerinin 180-1600 °C arasında kaplanabilmesi ve parçalarda sertlik kaybı olmaması,
- 2) Kaplanan tabakalarda çok yüksek tutunma kuvvetlerinin oluşması ve yüzeyden pul pul dökülmemesi,
- 3) Sık dokulu kristal tabaka yapısının olması,
- 4) Çok ince (1-5 µm) kaplama yapılabilmesi ve parça toleransının muhafaza edilmesi,
- 5) Kompleks geometrik parçaların döner mekanizmalarla homojen özelliklerde kaplanabilmesi,
- 6) Köşelerin ve keskin uçların keskinliğinin bozulmadan kaplanabilmesi,
- 7) Takımların ve kalıpların bilindikten sonra tekrar kaplanabilmesi,
- 8) Kaplamaların sökülerek tekrar kaplama yapılabilmesi.

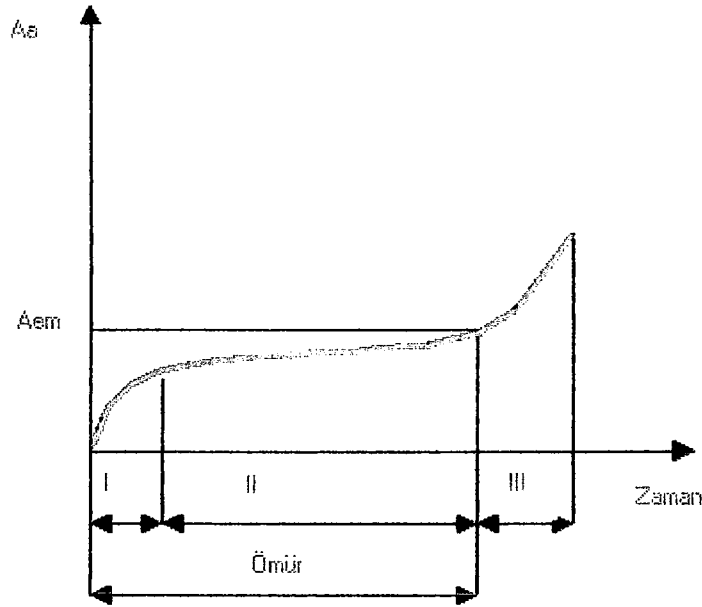
4. AŞINMA

Aşınma, çeşitli mekanik etkilerle cisimlerin yüzeylerinden mikro taneciklerin kopması neticesinde meydana gelen malzeme kaybıdır. Aşınmanın başka bir tanımı de, sürtünme halinde bulunan yüzeylerde malzemenin, mekanik etkenler etkisiyle ve istenilmediği halde kopup ayrılmasıdır. Bu şekilde, yüzeyler ilk şekillerini kaybeder; parçalar arasındaki boşluklar büyür ve amaçlanan fonksiyon normal şekilde yerine getirilemez.

Dünya çapında yapılmış olan istatistiklere göre, makine elemanlarının yaklaşık olarak % 70'nin işe yaramaz hale gelmesinin nedeni aşınmadır. Ayrıca sürtünme sonucunda meydana gelen enerji kayıpları, ekonomik olarak büyük harcamalara yol açmaktadır. Bundan dolayı uygun bir yağlama ile sistemin verimi az bir oranda arttırılsa bile sistemden istenilen verim elde edilememektedir. Bunların yanı sıra, aşınmadan dolayı meydana gelen malzeme kayıpları ve makine onarımı için harcanan zaman göz önüne alınırsa, tribolojinin makine konstrüksiyonundaki önemi daha iyi anlaşılacaktır [20].

Aşınma miktarı; malzemenin türüne, sürtünen yüzeylerin biçimine , sürtünme koşullarına ve çevrenin kimyasal etkilerine bağlıdır. Büyük ekonomik kayıplara neden olduğundan üzerinde yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Ancak çok çeşitli etkenlerin rol aldığı bir olay olduğundan laboratuvar koşullarından elde edilen sonuçlara dayanarak uygulamadaki aşınma miktarını tahmin edecek bir bağıntı henüz geliştirilmemiştir. Aşınmayı tamamen önlemek olanaksızdır. Ancak bu olayı yakından tanımanın, etkiyen etkenleri iyi bir şekilde saptamanın aşınmayı en düşük düzeyde tutma yönünden çok yararlı olacağı açık bir gerçektir [10].

Pratik bakımdan aşınma olayları, zamanla gelişen ve aniden meydana gelen aşınma olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Zamanla meydana gelen aşınma olayında, aşınma-zaman bağıntısı şekil 4.1'de verilmiştir. Görüldüğü gibi olay üç safhadan ibarettir.



Şekil 4.1. Malzemelerdeki aşınma-zaman bağıntısı [20].

Birinci safhada (I), yani parçaların ilk çalışması sırasında şiddetli bir aşınma meydana gelir. Rodaj denilen bu safha, parçaların birbirine alıştırılma safhasıdır. Bazen imalatın devamı olarak sayılan bu safha, parçanın daha sonraki aşınmasını büyük ölçüde etkiler. Bu nedenle parçaların rodajlarının iyi yapılması ve kısa sürede gerçekleşmesi, bu safhaya ait önemli şartlardır. Genellikle rodaj, yüksüz ve normal hızdan daha küçük hızlarda yapılır. Rodajın iyi ve kısa süre içinde tamamlanması için bu safhaya ait olan özel yağlar kullanılır. Silindirlerde ise bu bölgeye kuru çalışma sınırı denmektedir. Bu sınıra kadar silindirler yağsız çalıştıklarından aşınmada bu bölgede daha fazladır. İkinci safhada (II), temas bölgelerinde esas çalışma sırasındaki aşınma kendini gösterir. Aşınma hızı oldukça artan üçüncü safhaya “şiddetli aşınma bölgesi” denir. Aniden meydana gelen aşınmada, parçaların yüzeyleri birden bire bozulur veya bazı hallerde birbirine kilitlenir ve çalışamaz duruma gelir. Genellikle eş çalışan malzemelerin seçiminde yapılan hatalardan veya yağlamanın yetersiz olmasından meydana gelen bu aşınma şekli, mukavemet alanında statik zorlamanın etkisi altındaki kopmanın benzeridir [20].

4. 1. Motorlarda Aşınma Mekanizması

Günümüz otomotiv endüstrisinde yaygın olarak lamel grafitli dökme demir (örneğin GG 25) veya alüminyum silisyum alaşımı (örneğin 6 k Al S : 6CU₄) kullanılmaktadır [21].

Yaprak grafitli dökme demir, diğer ismiyle gri döküm % 2.5,3.5 karbon ihtiva eden bir demir karbon alaşımıdır. Yüksek karbon miktarı, yavaş soğuma esnasında temel dokunun içinde grafit yaprakçıkları şeklinde ayrışır. Bu malzeme; iyi dökülebilir, ince formları tamamen

doldurur, grafit yaprakçıkları yağlama görevi yapar ve aşınmaya dayanıklıdırlar. Aşınma dayanımını arttırmak için az miktarda nikel veya krom ilave edilir. Silindir gömleklerinde bulunan Si korozyona dayanıklılığı ve yüksek katılığı (sertliği), C içeriği ise uzama formunu muhafaza eder.

Dökme demir silindirde bulunan sert karbür parçaları, aşınma dayanımını arttırmakta ve grafit parçalar da katı yağlayıcı görevi yapmaktadır. Motorlardaki silindirlerden genellikle şu özellikler beklenmektedir:

- a) Yeterli derecede mukavim olmalı,
- b) Aşınmaya karşı dayanıklı olmalı,
- c) İşlenmesi kolay olmalı,
- d) Yağ tabakasını üst yüzeyde ve dağınık olarak tutabilmeli,
- f) Korozyona karşı dayanıklı olmalıdır.

Alüminyum motor blokları, standart dökme demir bloklara göre; motor ağırlığının ve hacminin düşürülmesi, silindir aralıklarının azaltılması ve ısı transferi özelliklerinin geliştirilmesi gibi bir çok üstünlüğe sahiptir. Fakat alüminyum silindir yüzeyleri soğuk çalışma yada ısınma gibi fakir yağlama şartlarında yapışma ve dolayısıyla daha fazla aşınmaya sebep olmaktadır [22].

Motorlarda kullanılan yağlama yağları silindir-piston ve sekman arasında bir yağ filmi meydana getirerek, metal-metale teması önler. Bu durum aşınmayı ve sürtünmeden dolayı güç kaybını azaltır. Ancak aşınmayı istenen düzeyde azaltamaz.

Silindirlerin üst kısmında yağlama, diğer bölgelere göre daha kötüdür, çünkü bu bölgeye daha az yağ ulaşır ve bir kısmı burada yanar. Soğuk motorun çalıştırılması sırasında özellikle düşük sıcaklıklarda yağ filmi aşağıya doğru biriken yakıt ilavesiyle yıkanmaktadır. Ayrıca yanma sonunda oluşan termal gerilmeler ve termal şoklar, silindirlerin üst kısmında daha fazla meydana geldiğinden bu bölgede aşınma artmaktadır. Yapılan yüzey kaplama işlemi sayesinde, silindirin yağlama işleminin az olduğu bölgelerde meydana gelen aşınma azaltılabilmektedir.

Motorlarda meydana gelen aşınmanın % 75'inin ilk çalışma sırasında (motor soğukken) meydana geldiği bilinmektedir. Bunun başlıca sebebi, ilk çalışma esnasında yağın silindir yüzeyine geç ulaşmasıdır. Burada meydana gelen anormal aşınma, motor çalışmaya başladığında bir süre yağlamanın yetersizliğindendir. Ancak seramik kaplanmış silindirin yüzey sertliğinin normal motora oranla daha yüksek, yüzey pürüzlülüğünün ise daha düşük olması bu olumsuz etkiyi azaltacağı düşünülmektedir.

Silindir yüzeyinin çeşitli seramik malzemelerle kaplanması, bu malzemenin özelliklerini geliştirmekte, böylelikle daha hafif ve daha az hacimli parçalar üretilebilmektedir.

Motorlarda silindir ve yanma odası elemanlarında kaplama malzemesi olarak genellikle seramik malzemeler ve alaşımları kullanıldığı için seramik malzemelerin niteliklerine bağlı olarak seramik kaplı motorlarda;

1. Silindirde aşınmanın en aza indirilmesi,
2. Kaplama, motorlarda yalıtımı sağladığı için yanma odasındaki sıcaklığın artması ve böylece yanma veriminde bir artış olması,
3. Motorlarda özgül yakıt tüketiminin azalması,
4. Soğutma sistemine giden % 25-30'luk enerjinin bir kısmının motor çıkış gücüne eklenmesi,
5. Egzoz gazları yardımıyla dışarı atılan % 30-40'luk enerjinin bir kısmının motor çıkış gücüne eklenmesi,
6. Yanma odası parçalarının termal gerilmelerinin azaltılması,
7. Dizel araçlarındaki vuruntunun tamamen ortadan kaldırılması veya minimuma indirilmesi,
8. Motorların daha sessiz çalışması,
9. Parçaların ömrünün artmasından dolayı ekonomiye katkı sağlanması,
10. Motorun kısa sürede rektifiyeye gelmemesi,
11. Parçaların daha yüksek sıcaklıklarda çalıştırılması, böylece daha yüksek motor veriminin elde edilmesi,
12. Daha az zehirli egzoz emisyonları ile normal motora göre çevreye daha az zarar vermesi,
13. Motor parçalarının daha hafif yapılması, böylece diğer motor performans karakteristiklerinin iyileşmesi,

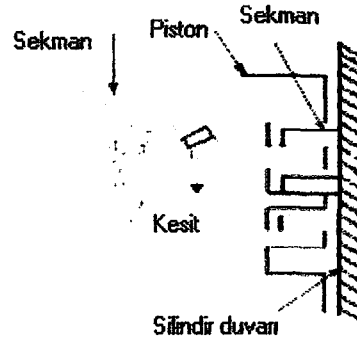
Kullanılan yakıt bileşenlerinin, çalışma esnasındaki yüksek sıcaklıklardan dolayı, tamamına yakınının yanması gibi özellikler beklenmektedir

Motor parçalarının çoğu sıcaklığa duyarlı sertleştirilmiş parçalardır. Bu parçalardaki tribolojik sistemler; temas basıncı, temas sıcaklığı, yağlama ve yağsızlık, aşınma oranı ve sürtünme kaybı gibi faktörler altında çalışır [23].

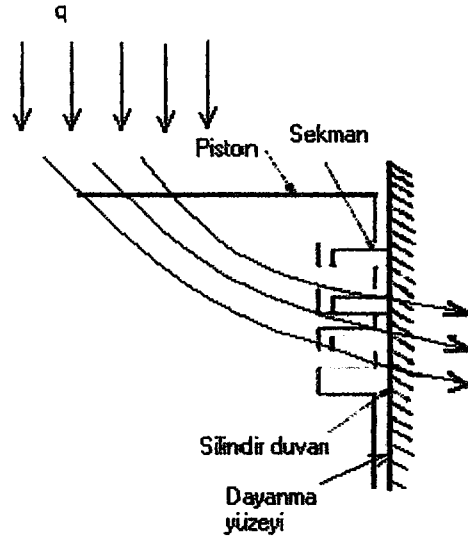
Motorlarda kullanılan dökme demir silindirlerin gerek yapısal özellikleri (içerdiği elementer yapı), gerekse yüzey pürüzlülüğü ve sertliğinin yetersiz olması, silindir yüzeylerinde istenmeyen ölçüde aşınmanın meydana gelmesine neden olmaktadır. Silindir içerisinde yanma sonucu oluşan kuvvetler piston, silindir yüzeyine doğru iter. Silindir yüzeyine gelen bu

dayanma kuvvetinin değeri, biyel ekseni ile piston düşey ekseni arasındaki açıya bağlı olarak değişir. Açı, piston, silindir içinde aşağıya doğru indikçe büyür ve kurs boyunun yarısında maksimum değere ulaşır. Açı büyüdükçe, yanmanın oluşturduğu kuvvetin büyük bir kısmı dayanma kuvveti haline dönüşür. Ayrıca, yanma basıncı, hacim genişlemesi sebebiyle bu açının artış hızından daha büyük bir hızla azalır. Bunun için, dayanma kuvveti, açının en büyük değere ulaştığı yerde değil, Ü.Ö.N.'dan itibaren kursun $\frac{1}{4}$ kadar aşağıda, pistonun dayanma yüzeyleri yönünde oluşur. Ancak, dayanma kuvvetinin silindir aşıntısı üzerindeki etkisi sekmanlar kadar değildir. Aşınmanın en büyük nedeni, silindir ile sekman yüzeyleri arasındaki sürtünmedir.

Motor silindirleri dinamik ve termik zorlamalara karşı çalıştıklarından bunlara karşı dayanımlarının yeterince sağlanması gerekmektedir. Bu da silindirlerin yapısal özelliklerinin iyileştirilmesi ile ilgilidir. Silindirlerin sürekli yağlanması, bu oluşan aşınmayı tamamen ortadan kaldıramamaktadır. Normal olarak yağlı sürtünmelerde bütün malzemeler aşınmaya karşı iyi özellik gösterir. Ancak silindirlerde her zaman aynı oranda yağlama gerçekleşmeyebilir. Bu bağlamda, yağlamanın yetersiz olması durumunda silindir malzeme yapısının ince heterojen olması gerekir. Silindir malzemesi içindeki Al-Si alaşımı bu özelliği taşımaktadır. Ancak sert kristalleri aşınma sırasında çabuk çizilmekte ve aşınmayı başlatmaktadır. Şekil 4.2'da piston-sekman-silindir ilişkisi görülmektedir. Motorlarda piston, silindir hacminin hareketli kısmını teşkil eder. Motorlarda kullanılan pistonlar genellikle alüminyum alaşımıdır. Pistonlar, basınç, ısıl zorlamalar, dinamik yükleme, değişken olan gaz, atalet ve yan kuvvetlerin etkisi altında bulunur. Ayrıca piston, çeşitli noktalarında termik zorlamalara karşı çalışır.



Şekil 4.2. Silindir- sekman- pistonun kesit görüntüsü.



Şekil 4.3. Yanma odasında meydana gelen ısıнын silindir gömleğine geçişi.

Bu da, pistonun özellikle etek kısmının şekil 4.3’de görüldüğü gibi (piston dayanma yüzeyinin), genişmeden dolayı silindir yüzeyine temasını sağlayarak aşınmasına neden olur. Ayrıca silindir yüzeyine piston eteği tarafından ısı transferi gerçekleştirilir. Bu da silindir üzerinde termal gerilmelerin oluşmasına neden olur.

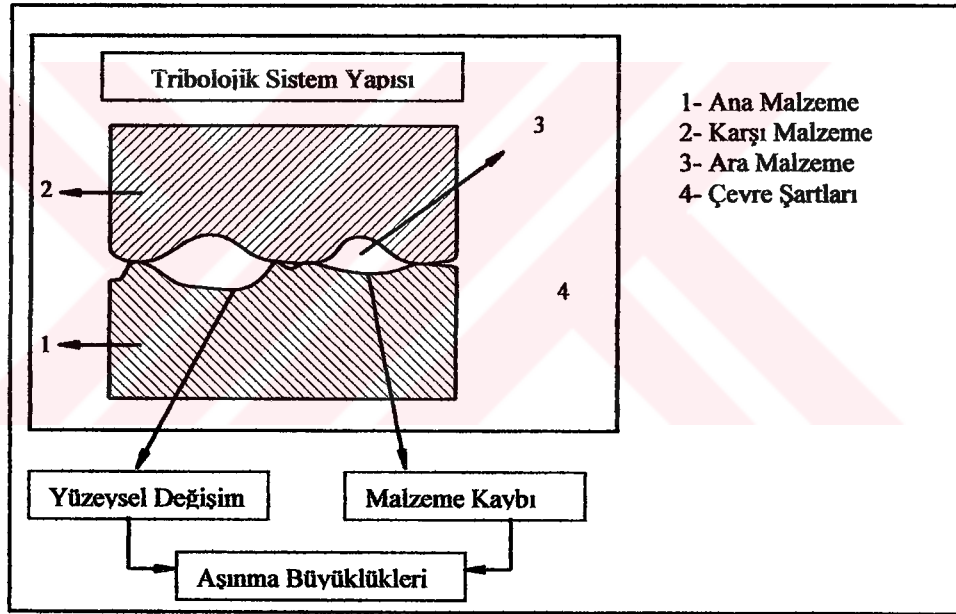
Motorlarda kullanılan sekmanlar, teker teker veya merkezkaç dökümle elde edilen silindirlerden kesilmek suretiyle imal edilirler. Malzeme olarak perlit veya sorbit yapılı grafitli üniform dağılmış gri alaşımlı dökme demirden yapılır. İşleme yüzeyleri gözenekli kromla kaplanarak ömür ve aşınma dirençleri artırılır. Sekmanlar, şekil 4.2’de görüldüğü gibi pistonun üstündeki hacmin sızdırmazlığını, ısıнын pistondan silindire geçirilmesini ve silindir yüzeyindeki yağın kazınılmasını sağlar. Sekman sızdırmazlığının sağlanması, silindir cidarına radyal temas ve sekmanın alt yüzeyinin yuvasına dayanması şeklinde olur. Sekman yuvalarındaki basınç, sekmanı radyal yönde silindire bastırır ve sürtünme işini artırır. Yanma odasında oluşan toplam ısıнын % 50’si sekmanlar tarafından silindire taşınmaktadır. Yanma odasında meydana gelen ısı, sekmanlar ve piston üzerinden silindire, oradan da soğutmaya suyuna geçmektedir. Silindirin bu yol üzerinde olması, aşınmasını hızlandırıcı bir etken olarak düşünülebilir. Silindirlerde aşınma silindirik bir şekilde olmaz. Normal olarak büyük ve küçük dayanma yüzeylerine doğru aşınmaların dışında silindirdeki gerilme düzensizliklerinden dolayı sekmanlar bu bozuk silindirikliğe ayak uyduramaz ve silindiri daha fazla aşındırırlar. Silindirde aşınmanın en fazla olduğu zaman ise soğuk motorun çalıştırılmasıdır. Oluşan aşınmanın % 75’ i bu zaman zarfında gerçekleşmektedir. Çünkü özellikle düşük sıcaklıklarda motor silindirlerinden süzülen yağ kartere ulaşmış ve yağ filmi aşağıya doğru biriken yakıt ilavesiyle yikanmıştır. Motor ilk çalıştırılmaya başlandığı zaman yağ pompasının yağı karterden çekip, kanallar vasıtasıyla

silindire ulaştırması belirli bir zaman alacaktır. Buna yağlama gecikmesi denmektedir. Bu süreye kadar motor çalıştığı için silindir yüzeyi az da olsa yağ ile yağlanmaktadır.

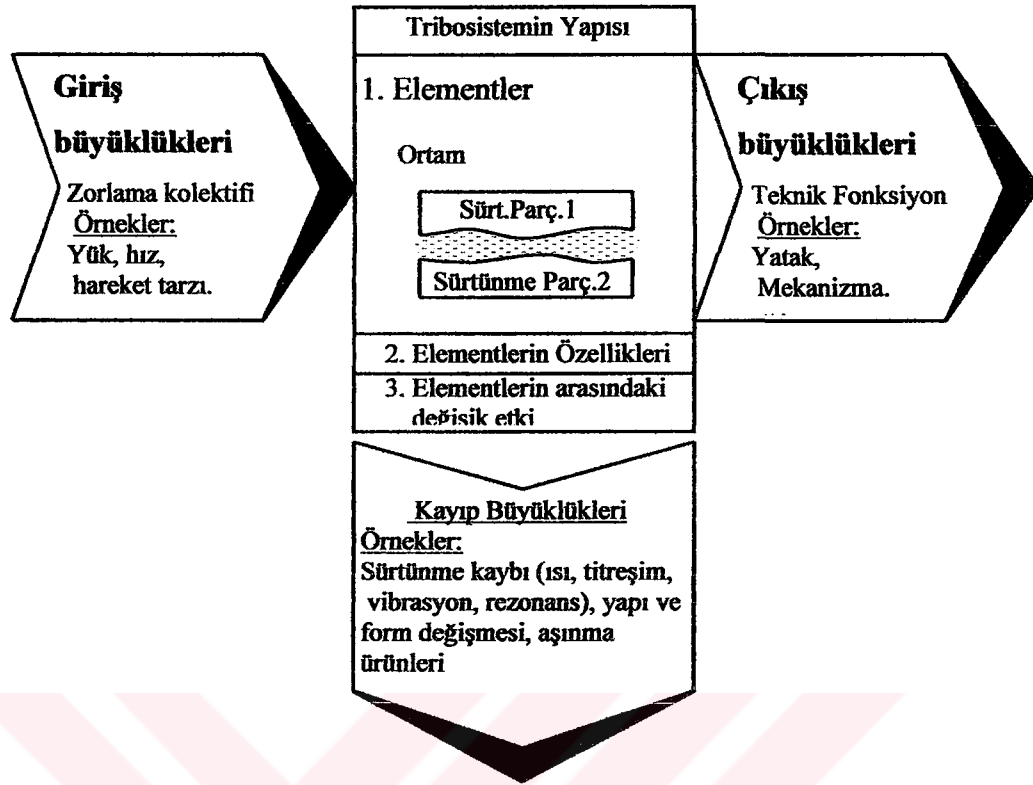
Aşınma açısından hidrodinamik yağlama motorlar için çok önemlidir. Hidrodinamik yağlama, sıvı yağlayıcının dönen yada kayan yüzeyler arasında bulunup kalın sıkıştırılmış bir film oluşturmasıdır [24].

Sürtünme kuvveti yağ film özelliğinin bir fonksiyonudur [25].

Yağ filminin bazı nedenlerden dolayı yırtılması metal-metal temasını sağlamakta, bu da malzemelerin hızla aşınmasına ve aşınma partikülleri oluşturmaya sebep olmaktadır. Hidrodinamik yağlamada kalın sıkıştırılmış yağ filminin oluşması, yağ filminin uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır. Silindir-sekman-piston çalışma mekanizması düşünüldüğünde zamanla aşınma, korozyon, çizilme ve silindir yüzeyinde meydana gelen bu olumsuz etkiler, yağ filminin kısmi veya genel olarak yırtılmasına neden olmaktadır.

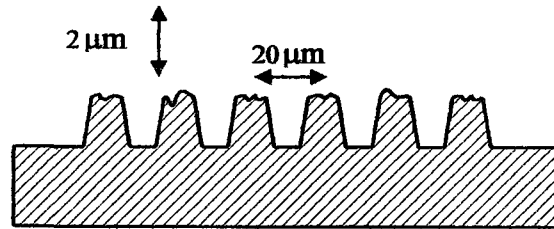


Şekil 4. 4. Tribolojik sistemin şematik gösterimi [26].



Şekil 4.5. Tribolojik sistemde giren enerjilerin dağılımı [26].

Aşınma olayının başlayabilmesi ve devamı için bir sürtünmenin olması gerekmektedir. Sürtünen iki cismin temas alanının büyüklüğünün aşınmaya büyük etkisi vardır. Malzeme yüzeyleri her ne kadar iyi işlenmiş olursa olsun, şekil 4.6’da görüldüğü gibi mutlaka yüzeyde çok sayıda girinti ve çıkıntı, yani pürüzlülük vardır [26].

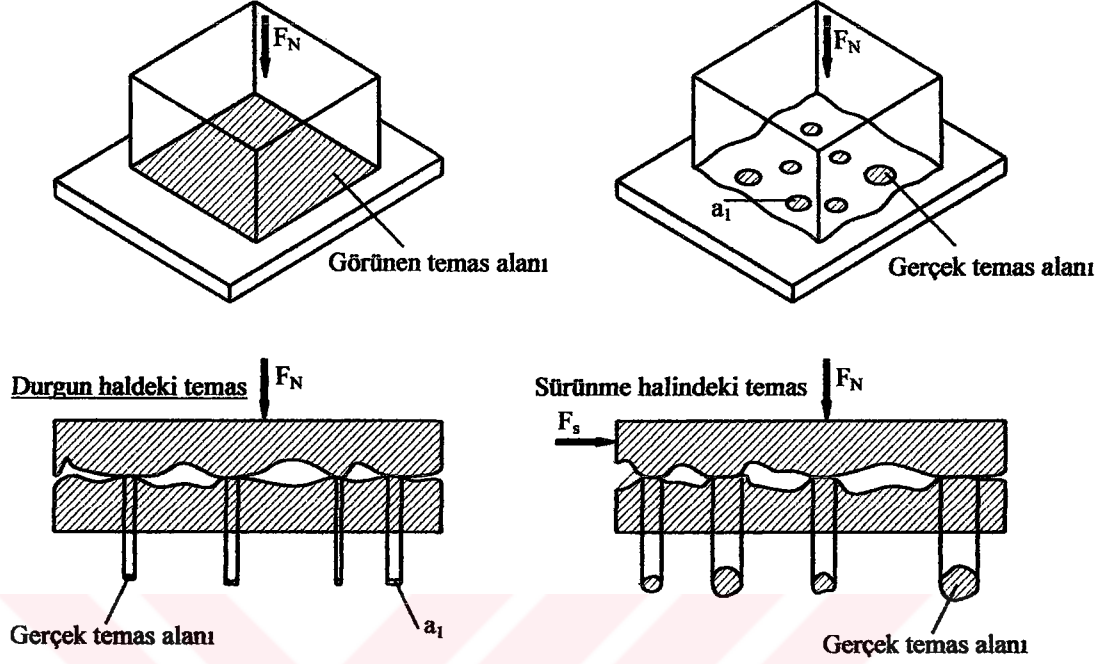


Şekil 4. 6. Çok iyi torna edilmiş bir metal yüzeyinin mikroskop altındaki şematik görünüşü [27].

İki yüzey birbiriyle temas ettiğinde gerçek temas, birtakım pürüzlülüklerin birbirine temas ettiği noktalarda olur. Pürüzlerin arasındaki girintiler ise temas alanı dışında kalır. Şekil 4.6’de görüldüğü gibi görünen temas alanı, $S = e \times b$ (birim kare) iken, gerçek temas alanı;

$$S_g = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + \dots + a_n = \sum_{i=1}^n a_i \text{ şeklindedir.}$$

Buradan da anlaşılacağı gibi görünen temas alanı (S), gerçek temas alanından (S_g) daima büyüktür $S > S_g$.



Şekil 4. 7. Sürtünen iki cismin temas alanları [27].

4. 2. Aşınma Türleri

Malzeme kaybına neden olan dört tür aşınma vardır:

- 1) Adhezif aşınma,
- 2) Abrasiv aşınma,
 - a) Öğütmeli sürtünme aşınması,
 - b) Oymalı sürtünme aşınması,
 - c) Erozyon aşınması,
- 3) Yorulma aşınması,
- 4) Korozyon aşınması,
- 5) Kazımalı aşınma.

4. 2. 1. Adhezif (Adhezyon) Aşınma

Bu tür aşınmaya yapışma aşınması da denir. Temas halindeki yüzeyler arasında gerçek temas alanı çok küçük olduğundan temas noktaları büyük bir basınç altında bulunmaktadır. Normal olarak yüzeylerde adsorbe edilmiş olan gaz veya sıvı molekülleri ile oksit tabakaları bu basınç altında parçalanır; malzemelerin molekülleri doğrudan doğruya temasa gelir ve bölgesel

kaynak bağları oluşur. Bu kaynak bağlarının meydana getirdiği malzeme kaybı adhezif aşınmayı oluşturur.

Adhezif aşınma ile ilgili deneylerde elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- a) Adhezif aşınma, benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmektedir.
- b) Adhezif aşınma, yüzeylerin izafi hızına ve normal kuvvete bağlıdır. Pratik bakımdan nispeten yüksek hızlarda ve yüklerde görülen bir aşınma şeklidir.

Adhezif aşınma, sürtünmeyi tayin eden bütün kaynak noktalarında meydana gelmemektedir. Bowden ve Tabor'a göre temas yüzeylerini oluşturan pürüzlerin plastik deformasyon yaptıkları kabul edilirse, gerçek yüzey;

$$A_h = \frac{F_n}{H_b}$$

Burada H_b , temasta olan en yumuşak malzemenin yüzey sertliğidir.

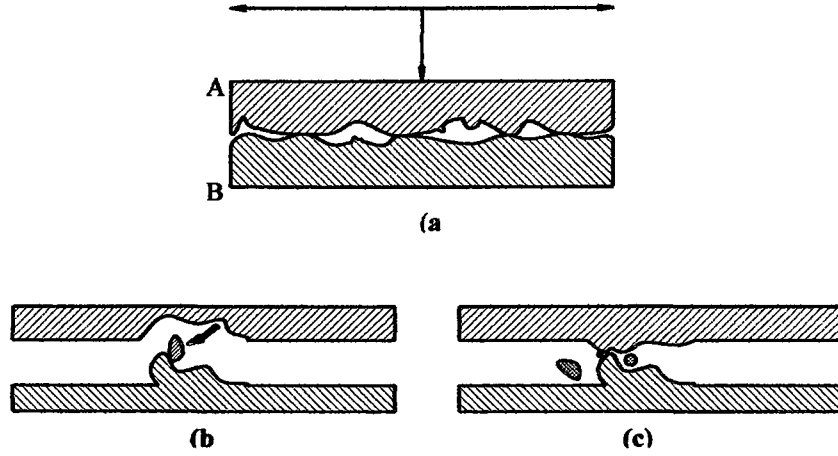
Kaynak noktalarının aşınmaya katılan kısmı k_a ile gösterilirse, aşınan malzeme hacmi;

$V_a = k_a \cdot A_h \cdot L$ olarak ifade edilir [28].

- c) Oksit veya nemden oluşan doğal tabakanın olay üzerinde etkisi büyüktür. Temiz yüzeylerde olay daha küçük hızlarda ve yüklemelerde cereyan eder. Çalışma ortamında bulunan gazların etkisi de önemlidir. Örneğin, azot atmosferinde aşınmanın hava içinekinden daha az olduğu, karbondioksit atmosferinde ise çok daha az olduğu deneylerle gösterilmiştir.
- d) Yağlamanın etkisi çok büyüktür. Sınır sürtünmesi bölgesinde dahil, yüzeylere yapışmış yağ tabakası büyük ölçüde adhezif aşınmayı önlemektedir. Yüksek hız ve basınç altındaki yüzeyler arasına katı bir yağ konulursa aşınma önenebilir.
- e) Yüzeylerden birinin sertliği diğerine göre nispeten büyük kaynak bağlarının kopması, yumuşak malzemede olur ve yumuşak malzeme, sert malzemenin yüzeyine transfer edilir.
- f) Kalay (Sn), selenyum (Se), arsenik (As) ve tellür (Te) gibi metallerde adhezif aşınması görülmemiştir.
- g) Yüzeyler arasında sert malzeme parçacıkları, yani abrasiv aşınmayı meydana getirecek koşullar bulunduğu takdirde adhezif aşınması oluşmaz [20].

Malzemedeki parçalanmalar neticesinde, malzeme molekülleri direkt temasa geçerek bölgesel kaynak bağlarının oluşmasına neden olur. İzafi hareketin de yardımıyla

yüzeydeki sıcaklık yükselip ergime noktasına kadar ulaşması, oluşan kaynak bağlarından veya malzeme yüzeyinden parça kopmasına neden olur. Bu metalik parçacıklar, iki yüzey arasında serbest halde kalabilecekleri gibi metallere birine bağlı halde de bulunabilirler. Bunlar neticesinde malzemede aşınma meydana gelir.



Şekil 4. 8 Kaynak bağları ve kopma şekilleri; a) yüzeyde kaynak bağları b) A' dan B' ye malzeme transferi, c) Kopan parçaların serbest hali .

Tablo 4. 1. Metallerin yapışmasını (adhezyonunu) etkileyen faktörleri.

Özellik	Tür veya Büyüklük	Adhezyon Katsayısı
1- Yüzeye yardımcı bir madde sürme	Yüksek	Düşük
2-Kristal sistemi	Kübik	Yüksek
	Hegzagonal	Düşük
3- Deformasyon sertleşmesi katsayısı	Yüksek	Yüksek
4- Saflık	Yüksek	a
5- Sertlik	Yüksek	Düşük
6- Elastik modül	Yüksek	Düşük
7- Ergime sıcaklığı	Yüksek	Düşük
8- yeniden kristalleşme sıcaklığı	Yüksek	Düşük
9- Atomik yarıçap	Düşük	Düşük
10- Yüzey enerjisi	Yüksek	b

4. 2. 2. Abrasiv (Abrazyon)Aşınma

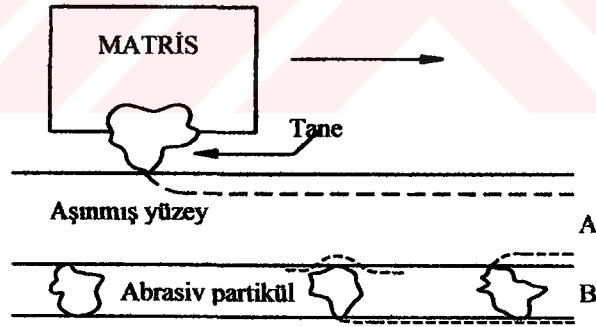
Abrasiv aşınma, uygulanan yük ve hareketin etkisiyle sürtünen iki cisimden daha sert olan cismin, pürüzleri veya taneleri vasıtasıyla diğer cismin yüzeyini çizerek malzeme üzerinde mikro talaş kaldırma olayıdır [28].

Motorlarda meydana gelen aşınmanın önemli bir kısmını bu aşınma türü kapsar. Aşınma sırasında yüzeylerin bozulması, dışarıdan yüzeyler arasına giren toz, talaş veya doğrudan eş çalışan malzemelerin yüzeylerinde oksidasyon sonucu oluşan sert parçacıkların etkisi altında meydana gelir. Bu sert parçacıklar bir zımpara tozu gibi yüzeyler arasında eğeleme ve taşlamaya benzeyen kazıyıcı bir etki yaparak malzeme kaybının meydana gelmesine neden olur. Bu tür aşınmada, önemli olan yüzeylerin sertliğidir. Burada dikkat edilecek husus, ısıtılmış yüzeylerin maksimum sertliğidir.

Abrasiv aşınmayı önlemek için alınacak önlemler şu şekilde özetlenebilir:

- 1) Malzeme yüzeyleri sertleştirilmelidir,
- 2) Dışarıdan sert maddelerin yüzeyler arasına girmesi, iyi bir sızdırmazlık tertibatıyla önlenmelidir,
- 3) Sistem, talaştan ve diğer pisliklerden sık sık temizlenmelidir [20].

Bir malzemenin diğer bir malzeme tarafından abrasiv aşınmaya tabi tutulabilmesi için en önemli şart, sürtünme sırasında aşındırıcı malzemenin sertliğinin aşınma malzemesi sertliğinden daha fazla olmasıdır. Şekil 4.9'de abrasiv aşınma mekanizması şematik olarak görülmektedir.



Şekil 4.9. Abrasiv aşınma mekanizması [28].

Abrasiv aşınma türü kendi içinde üç gruba ayrılır:

- a) Öğütmeli sürtünme aşınması,
- b) Oymalı sürtünme aşınması,
- c) Erozyon aşınması.

a) Ögütmeli Sürtünme Aşınması

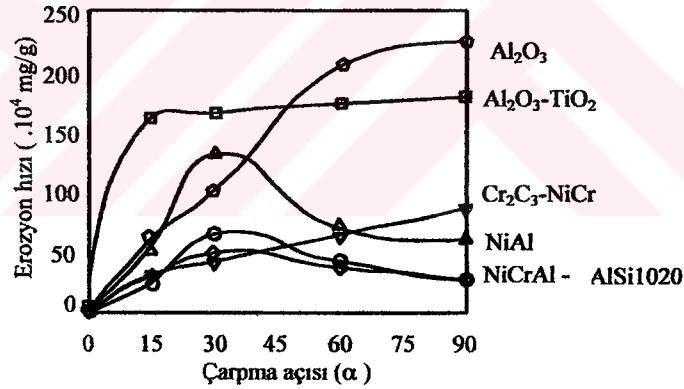
Bu aşınma türü, iki yüzeyin birbiri üzerinde hareket etmesi sonucunda ortaya çıkar ve ara yüzeyde parçacıklar bulunur. Bu ara yüzeyde bulunan parçacıklar, ya bir yüzeyden aşınarak gelir ya da her iki yüzeyin birlikte aşınması sonucu meydana gelir.

b) Oymalı Sürtünme Aşınması

Bu aşınma türü, kütleli bir şekilde yüzeyin deformasyonu sonucunda oluşan aşınmadır.

c) Erozyon Aşınması

Bu aşınma türünde ise aşındırıcı tozların askıda durduğu sıvı veya hava gibi akışkan bir çevre vasıtasıyla malzeme yüzeyine çarpma etkisiyle meydana gelmektedir. Meydana gelen her temas malzeme yüzeyinden küçük bir partikülün kopmasına sebep olmaktadır. Normal şartlarda aşınma hızı düşüktür, ancak yüksek sıcaklıklarda malzemenin akma dayanımı düşmekte ve yüksek akış hızlarında erozyon aşınma hızı artmaktadır. Şekil 4.10'da kaplamaların erozyon hızları üzerine aşındırıcı çarpma açısının etkisi verilmektedir.



Şekil 4.10. Kaplamaların erozyon hızları üzerine aşındırıcı çarpma açısının etkisi (SiO₂ : 100gr, 300µm, α=30°).

4. 2. 3. Yorulma Aşınması (Pitting)

Yorulma aşınması birbiri üzerinde yuvarlanan parçalarda görülür. Birbirine temas eden yüzeylerde plastik şekil değiştirme, dolayısıyla pekleşme oluşur ve malzeme gevrekleşir. Gevrekleşen malzeme üzerinden geçen tekrarlı kuvvet etkisi ile çatlaklar. Metallerde bu çatlama yüzeyden 0,2 – 0,3 mm derinlikte başlar. Bu çatlaklar zamanla yayılır ve yüzeyden pul şeklinde malzeme kopar. Bu tür yüzey yorulmasını önlemek için yüzeylerin sertleşmesi ve iyi parlatılması gerekir [10].

4. 2. 4. Korozi Aşınma

Korozi aşınmada mekanik etkenlerin yanında çevrenin kimyasal etkisi de olaya karışır [10].

Sürtünen yüzeylerde oluşan korozyon ürünü, sert parçacıklar halinde koparsa şiddetli aşınma görülür. Birbirine temas eden yüzeyler hava ile reaksiyona girerek aşınmanın şiddetli olmasını önleyen oksit ve diğer tabakaları meydana getirirler. Bununla beraber, özellikle kimyasal maddeler bulunan ortamda çalışan makine elemanlarının yüzeyleri bu maddelerle reaksiyona girerek ince fakat sert tabakalar oluştururlar. Aynı sonuç yağlarda bulunan maddelerden dolayı da elde edilir. Değişken yük altında bu sert tabaka kırılır ve sert parçacıklar düşerek aşınma parçacıklarını meydana getirirler. Temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon sonucu olarak tekrar bir sert tabaka oluşur, yük altında tekrar kırılır ve olay bu şekilde devam eder [10].

4. 2. 5. Kazımalı Aşınma

Bu tür aşınma, korozyonla desteklenen aşınma türleri arasında en çok rastlanan aşınma türüdür. Temas eden yüzeyler arasında hafif titreşimli hareket sebebiyle meydana gelir ve oksit kalıntıları tarafından çevrelenen yüzeyde oyuklanma şeklinde kendini geliştirir. İki metal birbirine temas ettiği zaman, yük altında yüzeyde bulunan düzensizliklerden dolayı yapışma olur. Yüzeyde bu yapışma noktalarından koparak kaynaklanmış alanlarda aşınma ürünü kırıntıları yer alır.

4. 3. Seramiklerin Sürtünmesi

Günümüz teknolojisinde seramiklerin sürtünme davranışı henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Genelde bu malzemelerden oldukça düşük sürtünme beklenilmektedir. Çünkü bu malzemelerden hem adhezyon hem de deformasyon katkılarının oldukça düşük olması beklenilmektedir.

4. 3. 1. Seramiklerde Sürtünme

Sürtünme katsayısı (μ), birbirleriyle ilişkili iki yüzeyi hareket ettirmek için gerekli olan teğetsel kuvvetlerin oranı olarak tanımlanır. Bu olay çeşitli faktörlere bağlıdır;

- 1) Malzemenin bileşimine,
- 2) Yüzey cilasına,

- 3) Nem oranına,
- 4) Filmlerin oksitlenmesine,
- 5) Kayma hızına,
- 6) Kirliliğe,
- 7) Sıcaklığa,
- 8) Yağlamaya bağlıdır [29].

4. 3. 2. Seramiklerin Erozyonu

Hassas kolay kırılır malzemelerin erozyonu, genleşen (elastik) malzemelerden oldukça farklıdır. Erozyon üzerine aşındırıcı partiküllerin hacminin etkisi, kırılğan (hassas) malzemelerden farklıdır. Seramiklerdeki erozyon, malzemede çentiklerin oluşmasına neden olan çatlakların genişlemesi (yayılması) ve oluşumunu kapsar. Birçok çalışmada, yük altında statik çentikler boyunca radyal (penny) veya koniksel (hertzian) çatlak oluştuğu belirtilmiştir. Seramik malzemede sarp (keskin) ve açılı partiküller genellikle radyal çatlaklar üretir. Yüksüz durumda, plastik olarak sıkıştırılmış bölge tarafından meydana gelen gerilme hemen hemen yüzeye paralel delik (vent) çatlakların oluşmasına sebep olur. Geleneksel seramiklerin erozyonu (Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4) çoğu durumda uyuşma içindedirler. Seramik kaplamalar, kaplama içindeki çarpışma (impact) hasarını sınırlamak ve bileşenin hizmet ömrünü arttırmak için yeteri kadar kalın olma şartıyla önemli avantajlar sunar [29].

4. 4. Seramik Kaplamalardaki Aşınma İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Gerek motorların gerekse diğer makine parçalarının tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesi ile ilgili bir çok çalışma yapılmaktadır. Literatürler tarandığında yapılan çalışmaların umut verici olduğu ve bu alanda daha ileriye gidilebileceği görülmektedir.

Friedrich ve diğ. [30], PVD yöntemi ile bir motorun sekmanlarını Cr_N seramik malzeme ile kaplamış ve bu malzemenin adhezyon, artık gerilme, sertlik gibi temel özelliklerini ele almışlardır. Bu çalışmada, piston-sekman-silindir tribolojik sisteminin, temas mekanikleri ve kayma kinematiklerinin sebep olduğu geometri ve yüksek mekaniksel yükler ile belirlendiği, sekmanların aşınma davranışının geliştiği sonucuna varmışlardır.

Juanshang ve diğ. [31], içten yanmalı motorlardaki silindir-piston ikilisinin aşınma davranışını iyileştirmek için yaptıkları bir çalışmada, plazma sprej yöntemi ile bu parçaları kaplamış ve gri döküm-demir malzemeye karşı farklı şartlar altında test etmişlerdir. Deneyler sonucunda, bu parçalarda aşınmanın önemli ölçüde azaldığını bildirmişlerdir.

Kvernes ve diğ. [32], dizel motorlarındaki ısı yüklemelerinde oluşan termal şok ve korozyonu azaltmak için, plazma sprej yöntemi ile nikel-krom-alüminyum-yttrium

kaplamaları bir dizel motorunda kullanmış ve deneyler sonucunda, herhangi bir korozyon ya da çatlamaya rastlanmadığını bildirilmişlerdir.

Godfrey ve diğ. [33], bazı motor parçaları (sekman ve silindir) üzerinde seramik kaplama işlemi yapmış ve bu parçaların tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. Deneyler sonucunda kaplanmamış motor parçalarına göre kaplanmış parçaların tribolojik özelliklerinin iyileştiğini tespit etmişlerdir.

Tovell ve diğ. [34], motorlardaki imalat fiyatlarının azaltılması, motor parçalarının dayanımını ile aşınma davranışlarının arttırılmasına yönelik yaptıkları bir çalışmada, test sonuçlarından elde edilen bilgilere göre seramik kaplanmış motor parçalarının daha az aşınma davranışı gösterdiği, motor parçalarının dayanımının artmasından dolayı daha hafif parçaların imal edilebileceği ve hacimsel olarak daha az yer kapladığı sonucuna varmışlardır.

Motor parçalarının dayanıklılığının arttırılmasına yönelik çalışmalar büyük bir hızla devam etmektedir.

Levy ve diğ. [35], bu amaçla yaptıkları bir çalışmada, kısmen stabilize edilmiş zirkonya seramik malzemesini, silindir kafası, piston ve supap yüzeylerine termal bariyer-plazma sprej yöntemi ile kaplamış, belirli bir çalışma sonunda kaplamanın yüzey analizlerini incelemiş ve kaplama işleminin bu parçaların dayanıklılığını arttırdığı sonucuna varmışlardır.

Miyairi ve diğ. [13], plazma sprej yöntemini kullanarak piston, silindir gömleği ve sekmanları seramik malzeme ile kaplamış ve bu malzemelerin tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda, bu parçalarda, düşük sürtünme katsayısı olduğunu ve bu parçaların normal kaplanmamış parçalara göre daha iyi tribolojik özellikler gösterdiğini bildirmişlerdir.

Birçok endüstri uygulamalarında, hafif malzemelere talep gittikçe artmaktadır. Özellikle otomotiv endüstrisinde çeliğin yerine alternatif hafif malzemelerin kullanılması ile ilgili araştırmalar büyük bir hızla devam etmektedir. Mühendislik endüstrisinde, değişik kompozit malzemeler, plastikler ve hafif metalleri kapsayan alternatifler aranmaktadır. Ancak bu malzemelerin hepsi, fiyat ve imal edilebilirliğini kapsayan değişik problemlere sahiptir. Bundan dolayı mevcut malzemelerin yüzeyleri ince tabaka ile kaplanarak çalışma özelliklerinin arttırılması yoluna gidilmektedir.

Yapılan bir çalışmada, kuru yağlama özelliği gösteren bir kaplama kullanılmış ve çalışma performansı incelenmiştir. Deneyler sonucunda zayıf metal tabakaların daha az tribolojik davranış gösterdiği tespit edilmiştir [36].

Jehn [37], alt tabaka malzemenin değişimi üzerine film çökertmesi yapmış ve aşınma davranışının iyi olduğu sonucuna varmıştır. Yine bu çalışmada, motor silindirine Ni/P/SiC, dişli

çarkların bilenmesi için Ni/CBN yada Ni /elmas uygulamış bunların aşınma dirençlerinin geliştiği sonucuna varmıştır.

Wang ve diğ. [38], polymer ve nikel/seramik bileşiklerle kaplanmış piston eteklerinin döküm ve alüminyum silindirlere karşı aşınma davranışını inceledikleri bir çalışmada, test parametreleri olarak yük, zaman ve yağlama yağını ele almış, deney sonucunda; silindir gömleklerinde düşük aşınma derinliği, TiN kaplanmış pistonun alüminyum gömlekler üzerinde çok düşük bir aşınma meydana geldiğini, Ni-P-Si₃N₄ etek kaplamaları ve Ni-P-SiC ile karşılaştırdıklarında, döküm yada alüminyum silindir gömlekleri üzerinde çok az aşınma oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Hwang ve diğ. [39], atmosferik plazma spreyi ile imal edilmiş demir kaplı tabakaların aşınma direnci ve yüzey sertliği üzerine oksitlerin etkisini inceledikleri bir çalışmada; silindir gömleklerine uygulanabilir demir kaplama tabakalarındaki yüzey sertliği, aşınma direnci ve mikroskobik yapı arasındaki ilişkiyi ele almış, atmosferik plazma ile imal edilmiş silindirlerde iyi bir aşınma direnci, substrate malzemeye göre daha yüksek yüzey sertliği, oksitlenmede ve toplam aşınmada bir azalma olduğu sonucuna varmışlardır.

Jehn [40], PVD sert kaplama yöntemiyle yaptığı bir çalışmada, kaplamanın korozyon direncinin geliştirilmesini incelemiş, bir malzemenin ya da bir bileşiğin korozyon davranışının genellikle onun yüzeyi ile etkileşim içinde bulunan çevre ve parçanın özelliklerine bağlı bir sistemin etkisi olduğunu tespit etmiştir. Yine bu çalışmada, sert kaplanmış parçaların korozyon direncinin geliştirilmesi için bazı önlemleri belirtilmiştir. Bunlar;

- a) Uygun işlem yada işlemlerle daha yoğun morfoloji,
- b) Sert kaplamaların “alaşım” uygunluğu,
- c) Daha düşük substrate pürüzlülüğü,
- d) Sert kaplama kalınlığının artırılması,
- e) Çift (dublex) kaplamadır.

Yapılan bu çalışmada mevcut (son zamanlardaki) araştırmaların özellikle yapı modifikasyon etkileri ve çok tabaka üzerine odaklandığı belirtilmiştir.

Liu ve diğ. [41], korozyon direnci ile ilgili yaptıkları bir çalışmada, çok tabakalı plazma-destekli fiziksel buhar çökertme yöntemiyle yapılan bazı kaplamaların, ince çeliklerin korozyon performansını arttırdığını tespit etmişlerdir. Burada dört tabakalı kaplamaların, tek tabakalı kaplamalarla karşılaştırıldığında korozyon oranının az olduğu, oksijen difüzyon oranının önemli şekilde azaldığı, termal yalıtım esaslı MgOZrO₂ kullanılan bir sistemde seramik kaplamalardaki gerilme oranlarında % 90 civarında azalma olduğu ve küçük pinhole'deki akım toplanmasının azaltılarak kaplama içindeki iç fazdan dolayı akım akışının yeniden dağıtıldığı sonucuna varmışlardır.

Yalçın ve diğ. [42], yaptıkları bir çalışmada torna kesici takımlarını, PVD yöntemiyle titanyum nitrid kaplayarak aşınma testine tabi tutmuş, deney sonucunda; TiN kaplamalı torna kesici takımların, kaplamasız torna kesici takımlarına göre yedi kat daha fazla performans gösterdiğini bildirmişlerdir.

Nordin ve diğ. [43], çok tabakalı PVD TiN'ün mekaniksel ve tribolojik özelliklerini araştırmak için yaptıkları bir çalışmada; bu yöntemle yapılan seramik kaplamaların kohezyon/adhezyon ve abrasiv aşınma direnci, artık (residual) gerilme, sertlik gibi bazı temel özelliklerini dikkate alarak hesaplama yapmış, deneyler sonucunda iyi bir yapışmaya (çökertme işlemi) sahip oldukları, kırılma kusurlarının azaldığı ve aşınma dirençlerinin arttığı sonucuna varmışlardır.

Son on yılda mekaniksel parçalar, kesme ve kırma parçalarının (aletlerin) çalışma ömrünün uzaması, bunların aşınma ve korozyona karşı mücadelesi için parçaların yüzeyleri üzerine TiC (titanium carbide) ve TiN (titanium nitride) gibi ince sert film uygulanması başarılı bir şekilde yapılmaktadır. Bir çok kaplama (TiN), PVD ya da CVD yöntemi ile makine parçalarından süsleme parçalarına kadar geniş bir aralıkta endüstriyel uygulamalarda halen yaygın olarak kullanılmaktadır.

Su ve diğ. [44], yaptıkları bir deneysel araştırmada, TiCN kaplamanın TiN kaplamadan daha düşük bir sürtünme katsayısına ve daha fazla aşınma direncine sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Yine bu çalışmadaki deneylerden elde edilen sonuçlara göre;

- Film kalınlığının artmasıyla yüzey mikro sertliğinin arttığı, bundan dolayı daha az kaplama kalınlığı ve daha yüksek bir yüzey mikro sertliğe sahip olması gerektiği,
- Film kalınlığının seramik kaplanmış bir sistemin aşınma performansı üzerine etkisinin belirli bir dereceye kadar olduğu tespit edilmiştir.

Benea ve diğ. [45], seramik bir kaplama malzemesi olan saf nikel ve nano yapılı SiC-nikel kompozit kaplamaların kaymalı aşınma korozyon davranışını ele almış, hem aşınma korozyonu hem de elektrokimyasal korozyon ölçümleri sonucunda, saf nikel kaplamayla karşılaştırılan nano kaplamaların daha iyi bir dirence sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Saf nikel kaplama ile karşılaştırıldığında nano-kompozit kaplamanın daha yüksek polarizasyon direncine sahip olduğu, azalan korozyon akım yoğunluğu gösterdiği, meydana gelen ince nano yapılı kaplama ve görülen nano parçacıklarının sonucuna göre nano-kompozit kaplamanın sürtünme katsayısının daha düşük olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca yüzeyin pürüzlülük parametrelerinin ortalama değerinin saf nikel kaplamadan üç kat daha yüksek, nano yapılı

kompozit kaplamanın aşınma korozyon oranının nikel koruyucu tabakalarındakinden daha düşük olduğunu bildirmişlerdir.

Han ve diğ. [46], elektroliz ile kaplanmış bir seramik malzemenin korozyon ve tribolojik özelliklerinin araştırılması üzerine yaptıkları bir çalışmada, kaplanmamış aynı özellikteki malzemeye göre oldukça iyi bir aşınma direnci elde ettiklerini bildirmişlerdir.

Liu ve diğ. [47], termal bariyer metodu ile ince bir çelik üzerine yaptıkları kaplamada, çeliğin korozyon direncini incelemişlerdir. Bu çalışmada aggressive çalışma şartlarındaki malzemelerin tribolojik ömürlerinin artırılması amaçlanmış, yapılan deneyler sonucunda malzemelerdeki korozyon performansının arttığı görülmüştür.

Pamuk ve diğ. [48], plazma spreyleneş $Al_2O_3-TiO_2$ ve Cr_3C_2-NiCr seramik kaplamalarla yaptıkları deneyler sonucunda, bu yöntemle metal ve alaşımları, seramikler, sermetler ve bazı plastikler gibi geniş aralıktaki 300'den fazla malzemenin spreyleneşbildiğini ve bu kaplamaların yaklaşık % 90'ının önemli ölçüde aşınma direnci sağladığını tespit etmişlerdir. Krom-karbür-nikel krom kaplamalar, başta nükleer reaktörler ve uçak sanayi olmak üzere abrasiv ve fretting aşınma, maksimum 580 °C'ye kadar partikül erozyonuna ve 1000 °C 'nin üzerindeki sıcaklıklara kadar oksidasyon ve kimyasal etkilere karşı dirence sahiptir. Alümina- titanya kaplamalar ise abrasiv, korosiv, oksidasyon ve erozif etkilere karşı direncin istendiğı uygulamalarda rahatça kullanılabilir.

Sasaki ve diğ. [49], WC/C karbon kaplama ile ilgili yaptıkları bir çalışmada, bu malzemenin substrate malzemeye göre iç yüzey sertliğinin arttığını, bunun da malzemenin çalışma performansını yükselttiğini tespit etmişlerdir.

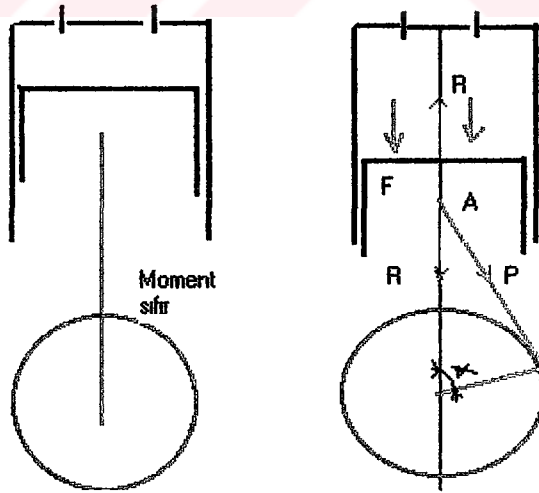
5. MOTOR PERFORMANSI

Motor performansı; motor karakteristiği olarak ta bilinir. Bunlar, motor seçiminde önemli kriterlerdir. Motor performansı, özgül yakıt tüketimi, ortalama efektif basınç ve motor momentini oluşturur. Motorun tanıtımında bu performans değerleri üretici firma tarafından tek bir ideal değer olarak verilir. Motor performansının değerlendirilmesinde bu tek rakam olarak belirtilen büyüklüklerin değeri ile birlikte bu değerlerin motorun çalışma koşulları ve işletme şartları ile nasıl değiştiği incelenir. Birçok motorun güç, moment ve özgül yakıt tüketimleri aynı olduğu halde, bunların örneğin devir sayısı ile değişimi farklıdır. Performans değerlerinin devir ile ilişkisi grafik olarak verilir. Aynı maksimum momente sahip bir dizel ve benzinli motor karşılaştırıldığında dizel motorunun devir sayısı ile moment değişimi benzinli motora göre daha azdır.

5. 1. Karakteristik Motor Değerleri

5. 1. 1. Motor Momenti

Moment, burma veya döndürme çabasıdır. İçten yanmalı motorlarda, yanma başlangıcında, piston Ü.Ö.N.'da iken yanan karışımın basıncı ile krank kolu ve biyel ekseni, aynı doğrultuda bulunduğu anda moment sıfır olur.



Şekil 5.1. Yanma başlangıcı ve basınç esnasındaki krank kolu- biyel ekseni. [50].

Moment olabilmesi için, kuvvet doğrultusu ile bu kuvvetin uygulandığı piston kolu eksenindeki açı, doğru açıdan (180°) küçük olması gerekir. Yanma sonunda, piston

Ü.Ö.N.'dan 20°–25° uzaklaşınca, karışımın tamamen yandığı kabul edilebilir ve oluşan en fazla basınç ile pistonun A.Ö.N.'ya doğru itildiğini biliyoruz. Şekil 5.1'de A noktasında, piston pimi vasıtasıyla piston koluna bağlı olan piston, üzerindeki basıncı piston koluna iletir. Piston kolu ise, krank mili muylusuna bağlı olduğundan ve krank mili de ana yatak muyluları ile yataklandırılmış olduğu için, piston koluna uygulanan kuvvetle dönmeye başlar. Krank mili dirseğine etki eden kuvvet, kursun her noktasında aynı değildir. Yanma sonucu elde edilen basınç, pistonu A.Ö.N.'ya doğru hareket ettirirken, bu basıncın tümü krank mili dirseğine etki etmez. Şekil 5.1'de görüldüğü gibi toplam kuvvet, (A) noktasında bileşenlere ayrılır. Bileşenlere ayrılan (R) bileşkesi, pistonu hareket yönünün aksine gitmeye zorlayan atalet kuvvetinin karşılanmasında, (F) kuvveti ise piston–sekman ve silindir cidarları arasındaki sürtünme kuvvetini oluşturur. Görüldüğü gibi, yanma sonucu oluşan toplam kuvvetten, bu kuvvetler çıkarıldıktan sonra, geriye kalan (P) kuvveti doğrultusunda, krank mili dirseğine etki eder.

Bu kuvvet, α açısı ve R kuvvetine bağlı olarak değişir. En büyük değere, piston kolu eksenine ile krank mili dirseği ekseninin arasındaki açı 90° olduğu zaman ulaşır. Aradaki açı değiştikçe momenti meydana getiren (P) kuvveti değişir. Motor momenti, ana yatak muylusu eksenine ile piston kolu muylusu eksenine arasındaki uzaklık (R) ile (P) kuvvetine bağlıdır.

Motor gücü ile moment arasındaki bağıntı;

$$Md = 9550 \cdot \frac{Pe}{n}$$

5. 1. 2. İndike Güç (İç Güç)

Silindirlere alınan karışımın yanmasıyla meydana gelen ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüşmesi, motorun silindirleri içinde meydana gelmektedir. Bu nedenle, motorun silindirleri içinde veya piston üzerinden alınan güce indike güç (iç güç) denir.

$$Ni = \frac{n.VH.na.Pmi}{450}$$

5. 1. 3. Efektif Güç (Faydalı Güç)

Efektif güç, motorun krank milinden alınan güçtür. Motoru, bir proni freni veya krank milinin dönme hareketine karşı koyabilen diğer eş değer bir frenle yüklenerek bulunur. Krank milinden çekilen güç, bir fren aracılığıyla ölçüldüğünden fren beygir gücü adını alır.

Efektif güç, aşağıdaki formül ile bulunur.

$$Pe = \frac{Md.n}{9550}$$

5. 1. 4. Özgöl Yakıt Sarfıyatı

Özgöl yakıt tüketimi, motorun beygir saat başına harcadığı yakıt miktarına denir.

Özgöl yakıt tüketimi;

$$be = \frac{my}{Pe} \text{ formülü ile bulunur.}$$

Motorun yük durumuna göre değişen özgöl yakıt tüketimi, gaz keleşbeğinin açıklık durumuna göre de değişir [50].

Özgöl yakıt tüketimi (be), yapılan deney süresince ölçülen bazı veriler esas alınarak hesaplanır. Yakıtın özellikleri ve deney hassasiyeti bu değeri etkiler. Motor hakkında daha detaylı bilgi elde etmek açısından be değeri çok önemlidir [51].

6. UYGULAMANIN TARİHÇESİ VE MOTORLARDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

İçten yanmalı motorlarda kısmen yada tamamen seramik malzeme kullanımı son yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmaların amacı genellikle motor performansını arttırmak, parçaların aşınmaya karşı direncini arttırmak ve malzemelerin hacimsel iyileşmesini sağlamaktır. Aşağıda bu alanda yapılmış çalışmalar ve sonuçları verilmiştir.

Motorlarda soğutma sistemine giden enerji motor için kayıp enerji olarak değerlendirilmektedir. Bu enerjinin bir kısmının azaltılarak kazanılması, motor verimi açısından çok önemlidir.

Sudhakar [52], seramik kaplama neticesinde motor silindirlerinden soğutma sistemine geçen enerji miktarında %20- 25, özgül yakıt tüketiminde % 1.7'lik bir azalma olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca motordaki HC (hidrokarbon) emisyonlarının azaldığını, NO_x emisyonlarının ise önemli ölçüde arttığını belirtmiştir.

İçten yanmalı motorlarda motor ağırlığının ve hacminin azaltılması oldukça önemli bir konudur. Çünkü araçlarda motor veya diğer parçaların hacminin azaltılması, araçtan daha fazla yer kullanma olanağı sağlayacaktır. Motorlarda seramik malzemenin kullanılmasıyla ağırlık yönünden oldukça önemli sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Hareket eden parçalarda seramik malzeme kullanılmasıyla sağlanan hafiflik, dairesel hareket eden parçalar için çok önemlidir.

Leising ve diğ. [8], tam adyabatik bir motorun taşıt dizaynından sonra bir araçta (tankta) büyük oranda hacim azalması meydana geldiğini, bu hacim azalmasının; motorda % 35, soğutma sisteminde % 22, transmisyonda % 20, yakıtta % 17, aksesuarlarında ve diğer parçalarda % 5 civarında olduğunu bildirmişlerdir.

Motorlardaki yanma odasının seramik bir malzeme ile yalıtılması, yanma odası sıcaklığını artırarak yanma reaksiyonuna daha fazla hidrokarbonların girmesini sağlamakta, böylece yanma verimi de artmaktadır.

Miyairi ve diğ. [53], tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorunun yanma odası parçalarının seramik malzeme ile kaplanmasıyla aynı özellikteki motora göre; motorun özgül yakıt tüketiminde % 7'lik bir azalma ve aşınmada azalma olduğunu tespit etmişlerdir.

Havstad ve diğ. [54], seramik kaplı tek silindirli bir motorda, sabit hava/yakıt oranında yapılan deneyler sonucunda, ısı kaybında % 55, özgül yakıt tüketiminde % 12'lik bir azalma olduğu sonucuna varmışlardır.

Motorlarda yanma odalarının seramik bir malzeme ile kaplanması yanma sıcaklığını arttırdığı bilinmektedir. Bu sıcaklığın artması motorda meydana gelen termik verimi de etkilemektedir.

Siegla ve diğ. [55], bu amaçla yaptıkları bir deneysel çalışmada, seramik kaplı bir motor ile kaplanmamış bir motoru kıyaslamışlar, deneyler neticesinde seramik kaplanmış motorun termik veriminde artış olduğunu bildirmişlerdir.

Stone [56], seramik kaplanmış bir motorda çeşitli yük ve parametrelerde yapılan testler sonucunda, % 30'luk ısı geçişi azalması ile % 3,4'lük volümetrik verim kaybının olduğunu, yine bu çalışmada egzoz gazı sıcaklığında 70 °K'lık bir artış ile, turboşarj sistemde yakıt tüketimi % 0,8, turbokombine sistemde ise % 2' lik bir gelişme sağlandığını bildirmiştir.

Bryzik ve diğ. [57], motorlarda seramik malzemelerin kullanma alanlarından biri de, özellikle silindirlere ve sekmanlarda meydana gelen aşınmayı azaltmaktır. Yapılan bu çalışmada, zirkonya esaslı seramik toz plazma sprey ile kaplanmış bir motorda, 250 saatlik çeşitli yük ve parametrelerde yapılan test sonucunda, kaplanmış motorun kaplanmamış motora göre daha az aşındığını bildirmişlerdir.

Voevodin ve diğ. [58], içten yanmalı bir motorun piston sekmanlarının yüzeyini çok tabakalı fiziksel buhar çökertme yöntemini (PVD) kullanarak krom-elektroplated kaplama ile titanyum ve TiN tabaka içeren seramik kaplama yapmış ve bu sekmanların normal sekmanlara göre aşınma özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan testler sonucunda gelişmiş fiziksel buhar çökertme yöntemi (PVD) ile kaplama yapılan sekmanlarda % 60 daha az aşınma olduğu sonucuna varmışlardır.

Motorlarda meydana gelen ısı transferinin bir kısmı yanma odası elemanları üzerinden gerçekleşmektedir. Bunlardan bir tanesi de supaplardır. Özellikle egzoz supabı en çok sıcaklığa maruz kalan motor elemanlarından birisidir. Egzoz supabının ısı iletkenliği düşük bir seramik malzeme ile kaplanması, supap üzerinden meydana gelecek ısı transferini azaltarak bu ısının yanma odasında kalmasını sağlayacaktır. Sonuçta yanma odasının sıcaklığı yükselecektir.

Prasad ve diğ. [59], yaptıkları bir çalışmada, yarı adyabatik motorlardaki emme ve egzoz supaplarının yüzeylerini oksit esaslı seramik izolasyon malzeme ile kaplamış, ısı akış oranları ve izotermik dağılımını, kaplamalı ve kaplamasız supaplar için göstermişlerdir. Deneyler sonucunda, supaplar üzerinde izolasyon kaplamanın kullanılmasıyla supaplardan %16' lık bir ısı kaybı azalması olduğunu, bunun da motor performansını iyileştirdiğini bildirmişlerdir.

Rastegar ve diğ. [60], yüksek beygir gücüne sahip (horsepower) bir dizel motorunun yüksek sıcaklık ve basınç altındaki üst kompresyon sekmanının yüzeyini plazma sprey ve yüksek hızlı oksijen yakıt (HVOP) yöntemi ile krom-oksit-nikel krom malzemesi ile kaplamış ve test etmişlerdir. Deneyler sonucunda, kaplanmış sekmanın aşınma davranışının geliştiğini tespit etmişlerdir.

Motorlarda, yanma odasında, yanma zamanında meydana gelen sıcaklığa direkt maruz kalan parçalardan biri de pistondur. Piston üzerinde özellikle termal gerilme, basınç ve termal şoklar zamanla piston üzerinde hasarlara sebep olarak pistonun ömrünü kısaltmaktadır. Ancak piston yüzeyi seramik bir malzeme kaplanırsa, olumsuz etkileri kaplama karşılayacağı için piston korunmuş olacaktır.

Venkatesh ve diğ. [61], yaptıkları bir çalışmada, bir dizel motorunun alüminyum alaşım pistonlarına seramik kaplama uygulamış ve yapılan testler sonucunda pistonun aynı tip normal pistonla göre yüzey davranışının iyileştiği sonucuna varmışlardır.

Parlak ve diğ. [62], içten yanmalı motorlardaki ısı genleşme uyumsuzluğunun önüne geçmek ve meydana gelen oksidasyonun azaltılmasına yönelik yaptıkları bir çalışmada, çok tabakalı kaplamanın, normal kaplanmamış motorun parçalarına göre olumlu sonuç verdiğini, difüzyon bariyer oluşturma oksidasyon oluşumunu önemli ölçüde azalttığını ve böylece yapılan kaplamanın daha verimli olduğunu tespit etmişlerdir.

Yaşar ve diğ. [63], yaptıkları bir çalışmada, dört zamanlı turbo aşırı doldurmalı, direkt püskürtmeli bir dizel motorunun egzoz gazlarının kullanılabilirliğini modellemiş, seramik kaplı bir motor ile kaplanmamış motorun (aynı tip ve modelde) egzoz gazlarının kullanılabilir enerjilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada, normal motorda 3,2- 40 kw, termal bariyer kaplı motorda ise 3,3- 45 kw arasında değişim tespit etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre ; termal bariyer kaplama ile artan egzoz gaz enerjisinin sonucu olarak, doldurucu veriminin arttığı, özellikle turbodoldurmalı motorlarda daha iyi sonuçlar verdiğini ve kaplama sonucu egzoz gazlarının kullanılabilir enerjisinin önemli bir artış gösterdiğini (%3-27) sonucuna varmışlardır.

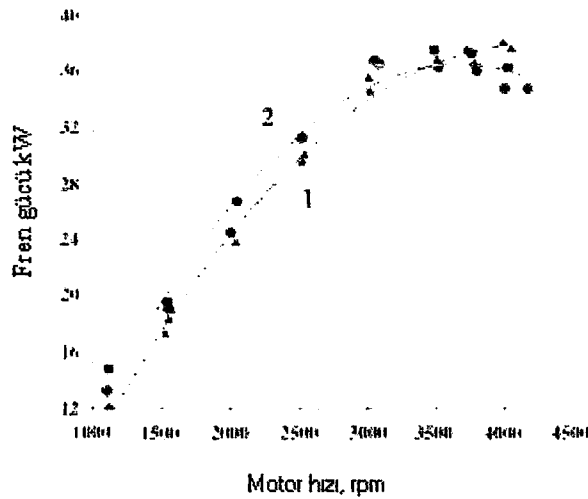
Akalin [22], seramik kaplanmış ve kaplanmamış motor silindirlerini aynı yük ve parametrelerde test etmiş, deneyler neticesinde, kaplanmış silindirlerin normal silindirlere göre daha düşük yüzey pürüzlülüğü, hidrodinamik yağlamaya önemli ölçüde eğilim, daha düşük sürtünme katsayısı ve kaplanmış silindirlerin kaba yağ tutucu, honlanmış yüzeye gereksinim göstermediği için yine hidrodinamik yağlama rejiminde çalışmayı kolaylaştırdığını tespit etmiştir.

Büyükkaya ve diğ. [64], seramik kaplamanın 6 silindirli direkt püskürtmeli turbodoldurmalı ve ara soğutuculu bir dizel motorunun egzoz emisyonlarına etkisini inceledikleri bir çalışmada, motorun silindir kapağı, supapları ve pistonları termal bariyer amaçlı olarak zirkonya ile 0,5 mm kalınlığında kaplamış, deney sonucunda, seramik kaplı motorun özellikle yüksek devir ve yük şartlarında normal motora göre (daha yüksek gaz sıcaklıklarında ve hava-yakıt oranlarında çalıştığından) partikül emisyonlarında ortalama % 65'lik bir azalma tespit etmişlerdir. Düşük devir ve yüklerde ise egzoz gaz sıcaklıklarındaki

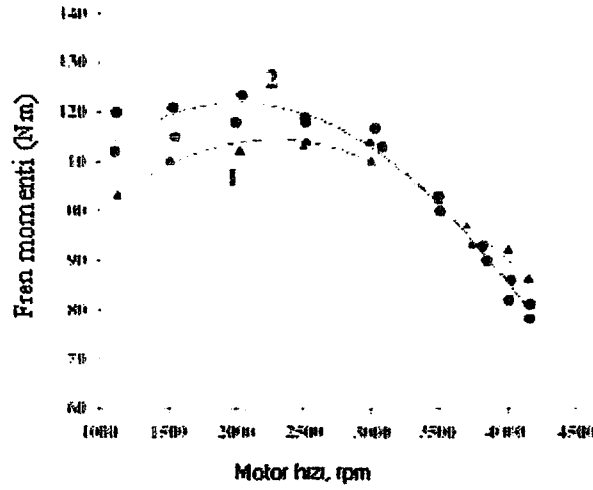
artışın az olmasından dolayı turbodoldurucuya yeterli aşırı doldurmayı yapabilecek derecede enerji verememesi, kaplamalı motorun volümetrik verimdeki artışını sınırlı tuttuğunu gözlemlemiş, bu şartlarda seramik kaplamalı motorun partikül emisyonlarında ortalama % 25'lik bir azalma olduğu sonucuna varmışlardır.

Hejwowski ve diğ. [4], termal bariyer kaplamaların bir dizel motoru performansı üzerine etkisini inceledikleri bir çalışmada, termal olarak yalıtılmış motor ile kaplanmamış motordan elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Değiştirilen araç motorunun performansını memnuniyet verici bulmuşlardır. Seramik kaplamalı motorda fark edilebilir bir vuruntu olmadığı piston etekleri ve silindir gömleklerinde önemli bir aşınmanın meydana gelmediği tespit edilmiştir. Yine bu çalışmada;

1. Metal pistonda türbülanslı yanma odasının çıkışına yakın noktada yüksek gerilme görüldüğü, ancak termal olarak yalıtılmış pistonlarda bu etkiye rastlanmadığı,
2. Değiştirilmiş motor için yakıt tüketimi yaklaşık 1100 d/dk.'da % 4,2'ye kadar düştüğü,
3. Özgül yakıt tüketimi değiştirilmiş motor için % 15-20 oranında azaldığı,
4. Değiştirilmiş motor için fren momenti en yüksek hızlarda kaplanmamış motordan % 6 kadar daha yüksek olduğu, ancak daha düşük hızlarda % 4'e kadar azaldığı,
5. En yüksek hız aralığında (3500 d/dk' dan sonra) değiştirilmiş motor gücünün yaklaşık olarak % 8 kadar arttığı,
6. Egzoz gaz sıcaklığı, değiştirilmiş motorda 200 °K daha yüksek olduğu,
7. Soğutma suyu ve yağın sıcaklığı değiştirilmiş motorda birkaç °K daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır.



Şekil 6.1. Seramik kaplanmış (1) ve kaplanmamış (2) pistonlu motorun çeşitli motor hızlarındaki fren gücü [4].



Şekil 6.2. Seramik kaplanmış (1) ve kaplanmamış (2) pistonlu motorun, çeşitli motor hızlarındaki fren momentini [4].

Gahlin ve diğ. [23], yaptıkları bir çalışmada, PVD yöntemiyle, piston ve silindir yüzeyine Me-C:H seramik kaplama malzemesi kullanmış ve deney sonucunda sürtünmede belirgin bir azalma, aşınma direncinde ise önemli bir artış olduğunu tespit etmişlerdir. Yine bu çalışmada, belirlenen bir motordaki performans değerlerinde olumlu artışların olduğu sonucuna varmışlardır.

Parlak ve diğ. [65], tek silindirli aşırı doldurmalı bir motorda yaptıkları bir kaplama çalışması sonucunda, aynı tip ve modeldeki başka bir motora göre özgül yakıt tüketiminde % 12'lik bir iyileşme, transfer edilen ısıda % 55' lik bir azalma olduğunu bildirmişlerdir.

Kamu ve diğ. [66], çalışmalarında, turbo-kombine bir motorda, değişik yalıtım kalınlığında özgül yakıt tüketiminde % 10' luk iyileşme, ısı transferinde %70' lik bir azalma olduğunu tespit etmişlerdir.

Tablo 6.1. Düşük ısı kayıplı (DIK) ve standart soğutmalı motorda yapılan deneysel çalışmaların karşılaştırılması [65].

Araştırmacılar	Yalıtım durumu	Çalışma esnasında yapılan sınırlamalar	Performans sonucu
Cheng ve Wong	Piston ve silindir başlığının % 85'i, 1,52 mm Plazma sprej (PSZ) ile kaplı, silindir başlığı soğutulurken, silindir gömleği soğutulmamış, ısı yalıtımı motor için dökme demir piston standart motor için Al piston kullanılmış.	Pme ve hava debisi sabit fakat H/Y oranı sabit değil, devir ve giriş hava basıncı sabit. Pme yakıt ayarı ile sabitlenmiş. Hava debisi egzoz gazı ile ayarlanmış.	Tüm test yüklerinde % 17'ye varan kötü performans, egzoz ve yüzey sıcaklığın da artma, yanma prosesinde kötüleşme.
Woshni ve ark.	Sadece piston tepesi kısmen kaplanmış (Nimonic 80A) ve hava boşluğu kullanılmış.	Yok	Pmi'nin 3,75 bar değerine kadar özgül yakıt sarfiyatında iyileşme, bu noktadan sonra kötüleşme, Pmi=8 bar'da % 9 kötüleşme.
Havstad ve ark.	Silindir başlığı için PSZ'den imal edilmiş piston, supaplar PSZ ile kaplanmış, silindir başlığı ve silindir soğutulmamış.	Aynı hava debisi, harici bir hava kaynağı vasıtasıyla sağlanmış, aynı H/Y oranı, aynı devir ve Pmi sağlanmış.	Daha iyi performans; % 5-9 indike özgül sarfiyatında iyileşme, soğutmaya ısı transferinde % 30 azalma.
Morel ve ark.	Piston ve silindir başlığı 1,27 mm, supaplar 0,76 mm PSZ ile kaplanmıştır.	Yok	Soğutmaya ısı transferinde azalma, yanmada kötüleşme yok.

Tablo 6.1'de DIK (düşük ısı kayıplı) motorlarla yapılan bazı deneysel çalışmalarda dikkate alınan kriterler ve sonuçları görülmektedir. Tablodan da görüleceği gibi, yakıt sarfiyatında iyileşme elde edilen çalışmalarda, seramik kaplanmış ve kaplanmamış normal motorun her ikisinde de H/Y oranı sabit olmasına rağmen, yakıt sarfiyatında kötüleşme meydana geldiğini ileri süren çalışmalarda H/Y oranının sabit tutulmadığı görülmektedir. Yapılan bu çalışmaların ışığında kaplama yapılmış motorlarda soğutmaya giden ısının

azaltılması sonucu yanma odası sıcaklığının arttığı, böylece motor performansının iyileştiği söylenebilir.

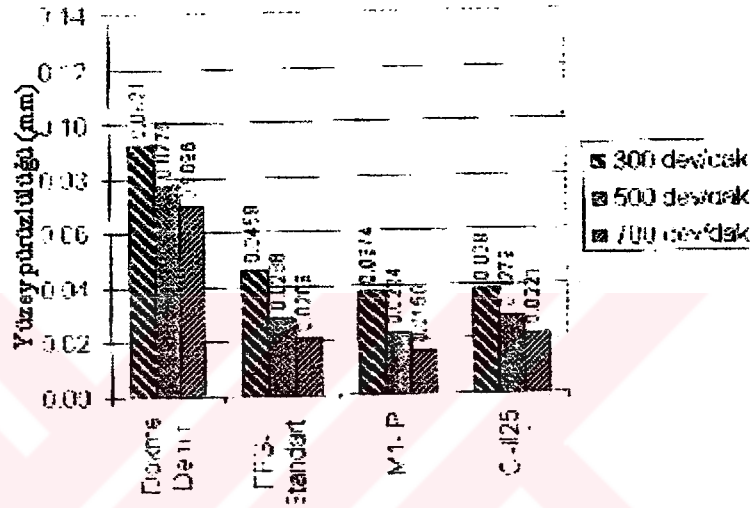
Tablo 6.2. DIK ve standart soğutmalı motorda yapılan simülasyon çalışmaların karşılaştırılması [65].

Araştırmacılar	Yalıtım miktarı	Çalışma koşulları	Std. soğutmalı motora göre performans
Havstad ve ark.	Soğutmasız; kalınlığı değişken seramik içlik.	Her iki durum için sabit H/Y oranı.	Soğutmaya ısı transferinde %55 azalma, özgül yakıt sarfiyatında %12 iyileşme.
Kamo ve ark.	Değişik derecede yalıtım.	Sabit H/Y oranı	Yakıt sarfiyatında % 10 iyileşme, ısı transferinde %70 azalma.
Morel ve ark.	Değişik derecede yalıtım.	Sabit pik basıncı ve H/Y oranı.	Tüm yüklerde yalıtım seviyesine bağlı olarak termik verimde artma meydana gelmiş; termik verimdeki iyileşme rankin alt çevriminin ilavesiyle % 8'den % 13'e çıkmıştır. Soğutmaya transfer edilen ısı azalmış, yüzey sıcaklığı artmıştır.
Hoag ve ark.	Değişik derecede yalıtım.	Sabit pik basıncı ve H/Y oranı.	Termik verimde % 6 iyileşme, ısı transferinde % 60 azalma.
Hoag ve ark.	Değişik derecede yalıtım.	Sabit H/Y oranı.	Türbo-kombine motor için özgül yakıt sarfiyatındaki düşme % 4, aşırı doldurma durumu için %2, ısı transferinde %55 azalma.
Tovel	Değişik derecede yalıtım.	Sabit H/Y oranı	İndike özgül yakıt sarfiyatında % 7,5 iyileşme.
French	Değişik derecede yalıtım.	—————	Özgül yakıt sarfiyatındaki düşme aşırı doldurmalı durumda %9, türbo kombine sistemde %17 iyileşme. Sürtünme düşürüldüğünde ilave % 2-4 arasında bir iyileşme.

İçten yanmalı motorlarda performans, sadece açığa çıkan ısı miktarına bağlı olmayıp aynı zamanda açığa çıkma hızına ve zamanına da bağlıdır. Motorlarda bütün ısı, iş strokunun başlangıcında açığa çıkacak olursa, ısının tamamı en yüksek verimde iş üretme potansiyeline sahip olur. Aynı zamanda ısı, genişleme strokunun sonunda açığa çıkacak olursa açığa çıkan

ısının hiçbir kısmı iş üretme potansiyeline sahip olmayacaktır ve en düşük verim elde edilecektir. Ancak seramik kaplı motorlarda yanma reaksiyon sıcaklığının normal motora göre yüksek olması birim yakıttan daha fazla verim sağlayacağı için yanmanın bu olumsuz etkileri azalacaktır.

Plazma sprej tekniği ile üretilmiş bir silindir yüzeyinin, 500, 700 d/dk çalışma hızlarında, düşük yüzey pürüzlülüğü ve dökme demir silindire göre (kaplanmamış silindir) önemli ölçüde düşük sürtünme katsayısı tespit edilmiştir. Bu çalışmanın grafiksel değerleri şekil 6.3'de verilmiştir.



Şekil 6.3.. Ortalama sürtünme katsayıları [22].

Nilsson ve diğ. [67], plazma yöntemi ile kaplanan bir motorun silindir yüzeyinde meydana gelen aşınmayı inceledikleri bir çalışmada, aşınma parametrelerinin (döküm silindire göre sert olan seramik malzemeden dolayı) kaplanmamış silindire göre oldukça düşük olduğunu, krank milinin topografyasında düşük sürtünme ve yüksek aşınma direnci meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, seramik kaplanmış bir dizel motorunun silindir yüzeyinin aşınma davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma için seçilen tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorun silindir yüzeyi, katodik ark PVD yöntemi kullanılarak yaklaşık olarak $1,8 \pm 0,2 \mu\text{m}$ kalınlığında CrN seramik malzeme ile kaplanmıştır. Kaplama işlemi İ.TÜ. laboratuvarlarında yapılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan motor, kaplanmış olarak 200 saat belirli yük ve devir sayılarında çalıştırılarak performans değerleri alınmıştır. Daha sonra aynı modeldeki kaplanmamış motor, 200 saat aynı yük ve devir sayılarında çalıştırılmış ve performans değerleri karşılaştırılmıştır.

Silindirdeki aşınma gibi etkileri incelemek için kaplanmış ve kaplanmamış parçaların karşılıklı aynı bölgelerinden numuneler alınarak SEM, EDS, X-RAY ve yüzey pürüzlülük analizleri yapılarak, özellikle silindirdeki aşınma miktarları karşılaştırılmıştır. Böylece, modifikasyon yapılmış ve yapılmamış silindirin çalışma sonrasında yapısal ve yüzeyel değişiklikler karşılıklı olarak incelenerek değerlendirilmiştir. Modifikasyon yapılmış parçaların motor performansı, motor çalışma parametreleri ve egzoz emisyonu üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

7. 1. Deney Motoru ve Teknik Özellikleri

Deneysel çalışmadan önce yapılan literatür araştırmasında, fiziksel buhar biriktirme (PVD) yönteminin motorlarda yanma odası parçaları üzerinde iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu yöntemde,

- kaplama işlemi düşük sıcaklıklarda gerçekleştiğinden silindir üzerinde ısınma sebebiyle meydana gelebilecek ölçü değişiklikleri ile çarpılmaların olmaması,
- ilave işlem gerektirmemesi,
- yüksek sertlik gerektiren kaplamalarda katodik Ark PVD (fiziksel buhar biriktirme) sisteminin daha iyi sonuç vermesi,
- kaplama malzemesinin yüzeye bu yöntemle daha homojen ve aynı kalınlıkta birikmesi,
- kaplama esnasında ana malzemenin (substrate) mikro yapısının etkilenmemesi,
- kaplama özelliklerinde ayarlama olanağı vermesi,
- tribolojik uygulamalar için uygun olması katodik Ark PVD yönteminin seçiminde etkili olmuştur.

Literatür araştırmalarına uygun olarak motor tipi, kaplama malzemesi, deney seti ve cihazları tespit edilerek deneysel çalışma ortamı hazırlanmıştır.

Deneysel çalışmada, hava soğutmalı 6LD 400 Lombardini motoru kullanılmıştır. Yapılan çeşitli çalışmalarda [5,62,63] bu tip tek silindirli motorların kullanılması motor seçiminde referans olarak alınmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan motorun silindir gömleği yüzeyi, seramik bir malzeme olan CrN ile kaplanmıştır.

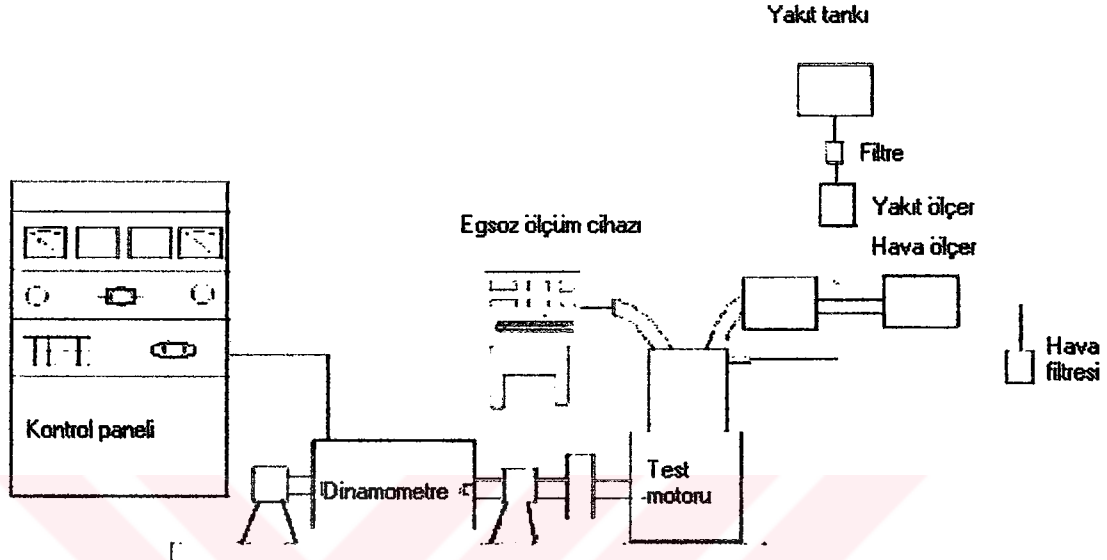
Tablo 7.1. Deney motoruna ait teknik özellikler.

Motorun markası ve tipi	6LD 400 Lombardini
Strok sayısı	4
Silindir sayısı	1
Silindir çapı	86 mm
Strok	68 mm
Motor gücü	6.25 / 8.5 (KW / HP)
Maksimum tork	19.6 - 2000
Ağırlık	45 Kg
Yakıtı	Dizel motorini
Yağlama	Tam basınçlı
Püskürtme şekli	Direkt enjeksiyonlu tam dizel
Püskürtme basıncı	200 Kg /cm ²
Soğutma şekli	Hava soğutmalı
Devir	3600 d /dk
Boyutları	382 x 427 x 491 mm

7. 2. Deney Donanımı ve Deneyin Yapılışı

Deney motorunun silindirinin dökme demir olması, test sonuçları açısından oldukça önemlidir. Çünkü daha önceki bölümlerde, seramik kaplamaların, malzemelerin genleşme katsayısı ile ilişkisinin önemi belirtilmişti. Burada kaplanan seramik malzeme ile kaplanacak olan (substrate) malzemenin yüzeyi arasındaki genleşme katsayılarının uyumlu olması, yapılan kaplama işleminin ömrü açısından çok önemlidir. Bundan dolayı silindir malzemesinin dökme demirden yapılması, hem yapılan kaplama işleminin daha iyi olmasını, hem de kaplama malzemesinin yüzeye daha iyi yapışarak genleşme farklılıklarını azaltmasını sağlar. Deney motorlarını yüklemek ve motor performansını araştırmak için; kurulan deney seti ve kullanılan ölçüm cihazları şekil 7.1’de verilmiştir. Deneyler kaplamalı ve kaplamasız motor olmak üzere olarak iki aşamada yapılmıştır. Deneyler esnasında motorların aşırı ısınması ve diğer faktörler dikkate alınarak motorlar maksimum yükte çalıştırılmamıştır. Motor performansı açısından

yapılan ölçümlerde deniz yüksekliğinden kaynaklanan barometrik basınç, hava nem oranı gibi çok küçük farklılıklar performans ve diğer ölçümlerde ciddi bir değer farklılığı yapmadığı için ihmal edilmiştir.



Şekil 7.1. Motor test ünitesi kontrol paneli.

7. 2. 1. Ölçüm Teknikleri

Test ünitesi; fren dinamometresi, yakıt tüketim ölçüm düzeneği, sıcaklık ve basınç ölçüm düzenekleri, kumanda paneli gibi ana düzenekleri kapsamaktadır. Şekil 7.1’de motor test ünitesi kontrol paneli görülmektedir.

1. Elektrikli fren dinamometresi: Elektrikli fren dinamometresi, motorun çeşitli yük kademelerinde yüklenmesini sağlayarak devir ve yük parametrelerine bağlı olarak performans özelliklerini tespit etmekte kullanılır. Elektrikli fren dinamometresinde, motor miline bağlı olan bir dinamometre ile karşı yönde hareket vererek motora yük verilmektedir. Kontrol paneli üzerindeki bir düğme ile motora belirli yükler verilebilmektedir.

2. Yakıt miktarının ölçülmesi: Elektrikli fren dinamometresinde kullanılan yakıt ölçeği; hacimsel tipte, mekanik kontrollü, 10 ml ve 20 ml’lik iki boğumlu camdan yapılmış silindirik bir parçadır. Yakıt ölçeğinin başlangıç ve bitiş noktalarının tespiti için piyasada mevcut olan zaman kronometresi kullanılmıştır.

3. Isıl çift: Deneysel çalışmada, motor test ünitesi kontrol paneli üzerinde kontrol edilebilen ve motor üzerinde egzoz gaz sıcaklığı, motor yağ sıcaklığı, yakıt sıcaklığı, hava giriş sıcaklığı alınabilecek noktalara bağlanmış K tipi (+CrNi ve -CrA) ısıl çift kullanılmıştır. Kaplanmış ve

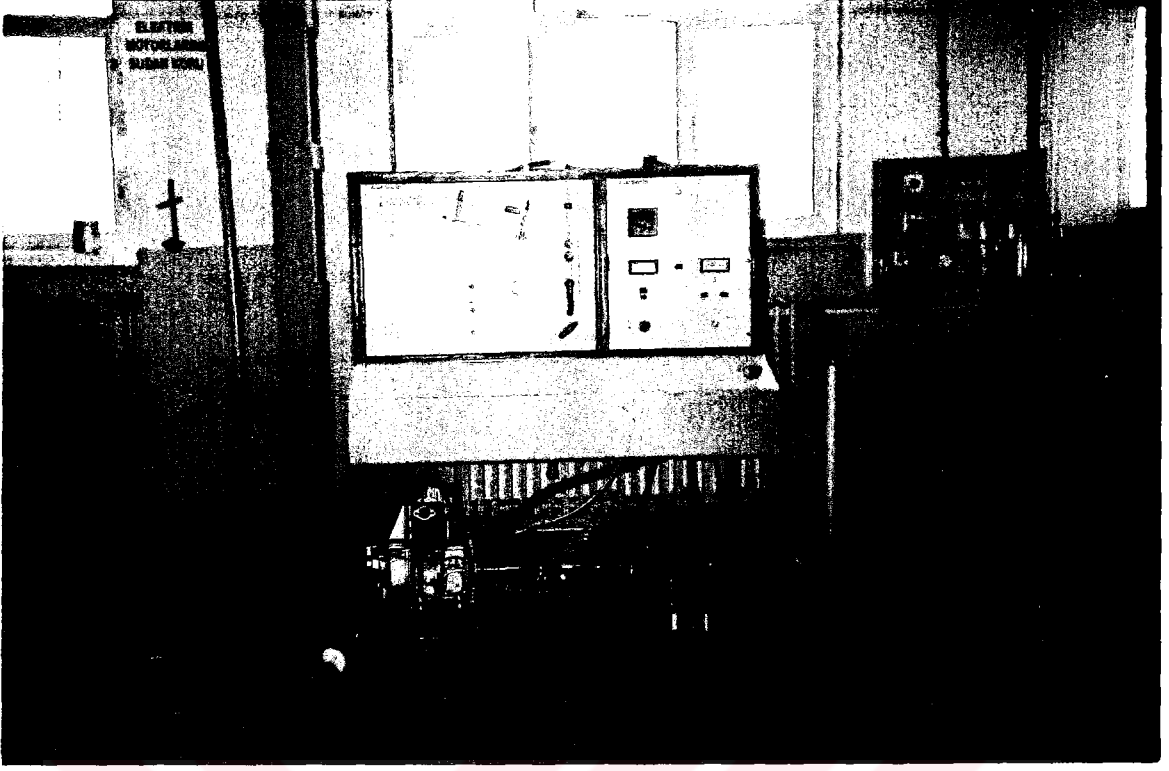
normal motorda çalışma esnasında; 1800, 2100, 2400, 2700 ve 3000 d/dk.'da her kademe için sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Bu değerler, kontrol paneli üzerinde bulunan bir dijital ekrandan okunmak suretiyle elde edilmiştir.

4. Egzoz emisyon cihazı: Her iki motordaki egzoz emisyonlarının ölçümü için MRU marka 95/ 3 CD ve 95/2D gaz analiz cihazı kullanılmıştır. Her iki motorun egzoz emisyon ölçümleri, belirlenen deney devirlerinde her devir için motorların 1/2 yüklenmesiyle yapılmıştır. Cihaz üzerinde bulunan bir yazıcı yardımıyla her devir için çıktı alınmak suretiyle emisyon değerleri tespit edilmiştir.

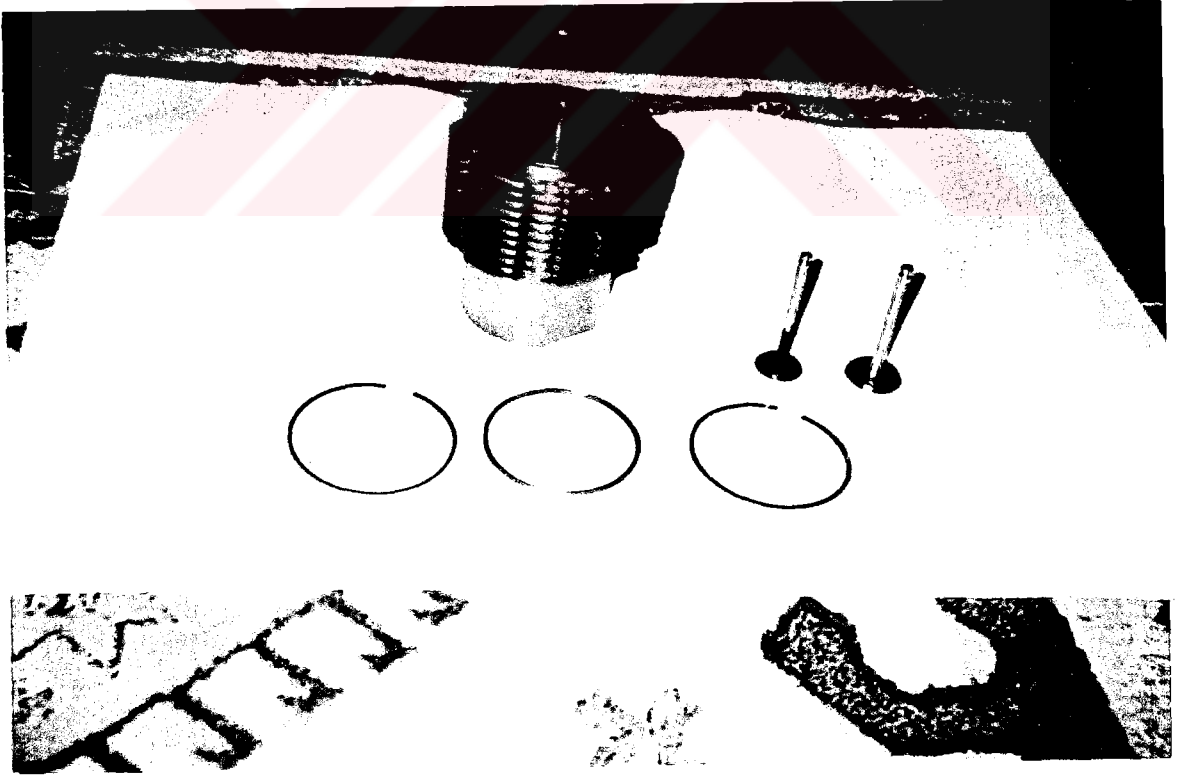
Yapılan deneylerde, motorun sürekli rejim sıcaklığına ulaşması için 15 dk. rölantide çalıştırılmıştır. Motorun çalışması esnasında; egzoz gazı çıkış sıcaklığı, motor yağ sıcaklığı, yakıt tüketimi, motor devri, motor yükü ve egzoz emisyon değerleri alınmıştır. 200 saat çalışma süresi sonunda motor sökülerek kaplanmış olan silindir gömleği alınmış, yerine kaplanmamış silindir gömleği takılarak 200 saat de bu motor aynı yük ve parametrelerde çalıştırılmıştır. Diğer motorda olduğu gibi bu motorunda sürekli rejim sıcaklığına ulaşması için 15 dk. rölantide çalıştırılmış, daha sonra bu motorda da; ölçümler tekrarlanmıştır. Deneyler sırasında motorun aynı şartlarda enjektör püskürtme basıncı, pompa ayarı ve supap boşlukları gibi ayarlamalar üretici firmanın tavsiye ettiği değerler alınarak ayarlanmıştır. Motordaki yağ sıcaklığını sağlıklı bir şekilde alabilmek için motorun kartere en yakın kısmından bir delik ile kartere ulaşılmış ve burada bir ısıl çift yardımıyla sıcaklık değeri kontrol paneli üzerinden alınmıştır.

7. 3. Kaplama Tekniği ve Kullanılan Seramik Malzemenin Özellikleri

Kaplama malzemesi olarak CrN kullanılmıştır. Genellikle CrN, kimyasal kararlılık ve aşınmaya direnç gerektiren ortamlarda kullanılır. Yüzeye mükemmel yapışması ve tokluğu ile darbelere karşı yüzeyi korumaktadır. Kaplama işlemi düşük sıcaklıklarda yapıldığından, parçalarda ısı nedeniyle oluşabilecek ölçü değişiklikleri ile çarpılmalar olmaz ve sonradan ilave işlem gerektirmez. Kaplamanın yüksek sertliği ve düşük yüzey pürüzlülüğünden dolayı sarma dediğimiz olay meydana gelmemektedir. Son yıllarda seramik kaplamalar içerisinde krom-nitrür kaplamalar üzerinde yapılan çalışmalar artmıştır. CrN kaplamaların temel fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki bu araştırmalar; oksidasyon, korozyona ve aşınmaya karşı direnci, düşük sürtünme katsayısı, yüksek tokluğu, termal kararlılığı, sertliği ile her zaman ilgi çekici olmuştur. Geleneksel sert krom ile karşılaştırıldığında CrN kaplama; en az iki kat daha fazla sertlik, oldukça düşük porozite, taban malzemeye (substrate) daha iyi yapışma, ek işlem gerektirmemesi ve düşük kaplama kalınlığı gibi özellikleri ile daha avantajlıdır. CrN'e ait teknik özellikler tablo 7.2'de verilmektedir. Şekil 7.2'de deney düzeneği, şekil 7.3'de deneyde kullanılan kaplanmış silindir gömleği görülmektedir.



Şekil 7. 2 Deney düzeneginin fotoğrafı



Şekil 7. 3 Kaplanmış motor parçasının fotoğrafı

Tablo 7. 2. Kullanılan seramik malzemenin (CrN) teknik özellikleri.

CrN	
Kaplama kalınlık aralığı (μm)	1,0 – 10
Sertlik HV (kg/mm^2)	2200 $\pm$ 400
Oksidasyon sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	700
Sürtünme katsayısı (μm)	0.50
Yüzey pürüzlülüğü (Ra)	0.20
Renk	Gümüş grisi
Kalınlık (μm)	1,8 $\pm$ 0,2

Tablo 7.3. Ark PVD CrN kaplamaların üretim parametreleri.

Kaplama süresi (dk.)	80
Katod akımı (A)	90
Bias voltajı (V)	150
Kaplama sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	250-300
Kaplama basıncı (Torr)	7,5 $\times 10^{-3}$

Tablo 7.4. Motorda kullanılan silindir malzemenin teknik özellikleri.

GG 25 Lamel grafitli dökme demir	
Sertlik HB	180-250
Mikro yapı perlitik	%90 min %10 ferrit
Kimyasal bileşimi (%)	C: 3,00-3,25 Si: 1,85-2,10 Mn: 0,40-0,70 S: 0,12 mak P: 0,25 mak.
Geriye kalan (%)	Fe

7. 4. Katodik Ark Fiziksel Buhar Biriktirme (Ark PVD) Yöntemi

Deneyisel çalışmada silindir gömleği, katodik Ark PVD (fiziksel buhar biriktirme) yöntemi ile yaklaşık 1,8 $\pm$ 0,2 μm kalınlığında kaplanmıştır.

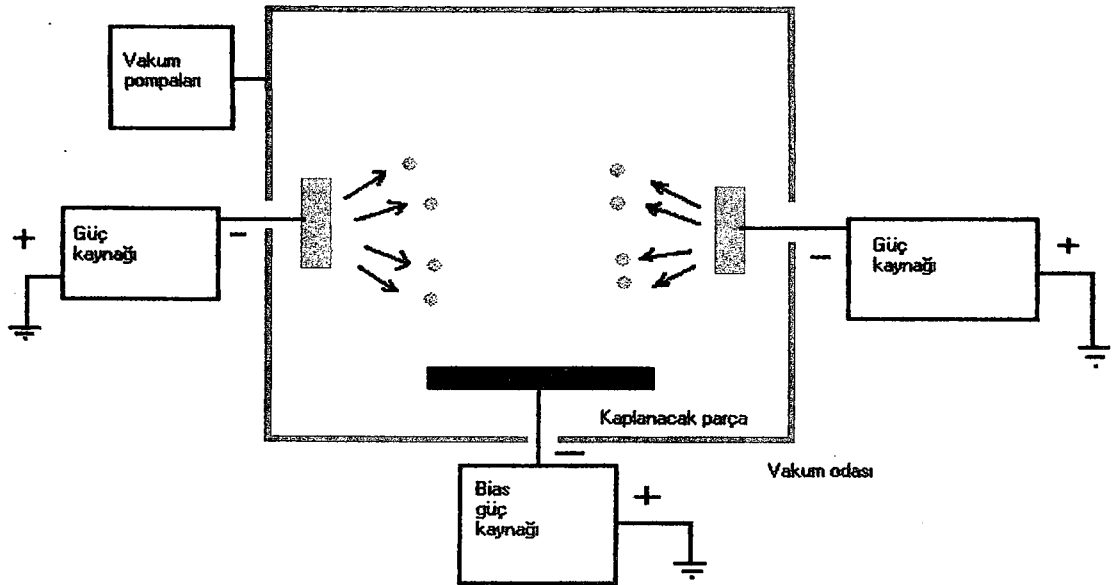
Prensip olarak ark fiziksel buhar biriktirme metodu, mikro yapıyı etkilemeyerek çok katlı kaplamaların oluşturulmasına ve bileşimin değiştirilerek kaplama özelliklerinde ayarlama

yapabilme imkanı vermektedir. Bundan dolayı kaplama yöntemi olarak Katodik Ark PVD yöntemi seçilmiştir. Katodik Ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi, yüksek verim ve yüksek iyon-akım yoğunluğundan dolayı tribolojik uygulamalar için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem; malzemelerin tribolojik özelliklerini iyileştirmek için CrN ile kaplanmasında oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Birçok çalışmada CrN kaplamaların biriktirme işleminde iyi bir yapışma (adhering) özelliği gösterdiği [38], ayrıca FBB yöntemiyle yapılan kaplama işleminde yüksek adhezyon özellikli kaplamalar elde edildiği bildirilmiştir [36].

Bu yöntem ile; buhar fazının elde edildiği FBB sistemlerinin düşük alt malzeme sıcaklıkları, düşük katot tüketimi, yüksek biriktirme ve iyonizasyon hızlarında uygulanabilmesi bu sistemin kullanım alanlarını genişletmektedir. Bu yöntemin en büyük dezavantajı, katot yüzeyinde oluşan arkın etkisi ile makro partiküllerin kütsel olarak kopması sonucunda, kaplama yüzeylerinde droplet olarak tanımlanan kaplama hatalarının meydana gelmesidir.

Bu yöntemde, şekil 7.4’de gösterildiği gibi buhar fazının elde edileceği malzeme vakum odasına katot olarak, kaplanacak malzeme de anot olarak bağlanır. Yüksek akım ve düşük voltaj etkisiyle katot yüzeyinde bir ark meydana gelir. Katot yüzeyinde arkın meydana geldiği noktalarda sıcaklığın çok yüksek değerlere ulaşması, bu noktalarda ergime ve buharlaşmalara sebep olur. Bu noktada meydana gelen buhar fazı, katot önündeki yüksek elektron yoğunluklu bölgede çarpışmalara maruz kalarak hızla iyonize olur.

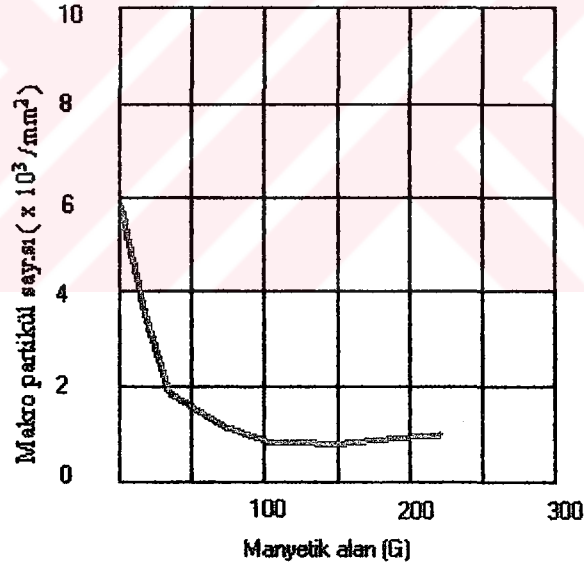
Homojen olmayan potansiyel dağılımı sebebiyle iyonlar bu bölgeden hızla uzaklaştırılır. Bias voltajı uygulanmış taban malzemeye doğru yönlendirilen iyonlar reaktif gazla reaksiyona girerek taban malzeme üzerine biriktirilirler [68].



Şekil 7. 4. Katodik Ark PVD sisteminin şematik gösterimi.

Bu yöntemde, kaplamaların yüzeylerinde dropletlerin oluşmasını azaltmak için katotların arka tarafına kuvvetli mıknatıslar yerleştirilmektedir. Böylece;

- 1) Katotların arkasına yerleştirilen mıknatısların oluşturduğu manyetik alan, iyon gibi yüklü partiküllerin üzerinde etkili olurken, yüksüz makro partiküller üzerinde etkisini kaybeder. Bundan dolayı oluşan bu farklılık ile manyetik alan, sistemde iyonlar ve makro partiküller arasında filtre görevi görmektedir. Oluşan manyetik alanın iyonlar üzerindeki etkisi, iyonların hızlarını artırır ve bununla orantılı olarak film biriktirme hızları da artarak kaplama azalır. Böylece kaplama süresinin kısılmasından dolayı film yüzeyine düşen makro partikül sayısında azalma olacaktır.
- 2) Plazma içerisinde bulunan makro partiküllerden bu partiküllere çarpan elektronlar sebebiyle de buharlaşma meydana gelmektedir. Meydana gelen manyetik alan, oluşturulan plazma içerisindeki elektron yoğunluğunu artırarak makro partiküllerin buharlaşmasını artırmaktadır.



Şekil 7. 5. Katodik Ark PVD yönteminde katotların arkasına yerleştirilen mıknatısların etkisiyle droplet sayısındaki değişim.

Katodik Ark PVD sistemine yerleştirilen mıknatısların meydana getirdiği farklı şiddetlerdeki manyetik alanlar sonucunda kaplama yüzeyindeki dropletlerin sayısındaki değişim şekil 7.5’de verilmiştir.

7. 5. Deney Sonuçları ve Tartışma

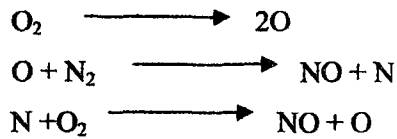
Bölüm 7.2’de kullanılan ölçüm yöntemleri ve cihazları ile egzoz emisyon ve motor performans değerlerinin ölçümü için bir takım deneyler yapılmıştır. Yapılan kaplama işleminin egzoz emisyonlarına etkisini incelemek için; NO_x, CO, egzoz ve yağ sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Motor performansı açısından CrN kaplanmış ve normal motoru karşılaştırmak için; belirlenen yakıt tüketimi, motor momentleri ve efektif güç sonuçları değerlendirilmiştir. CrN kaplanmış ve kaplanmamış motor parçalarının aşınma davranışlarını incelemek için 200 saatlik çalışma sonucu motor sökülerek söz konusu parçalardan numuneler kesilmiştir. Bu numuneler üzerinde yapılan metalografik çalışmalar değerlendirilip sonuçlar karşılaştırılmıştır.

7. 5. 1. Egzoz Gazı Emisyon Sonuçları

Günümüz otomotiv endüstrisinde malzeme biliminin gelişmesiyle motor parçalarında daha dayanıklı parçalar kullanılabilmektedir. Bu da, motorlardaki sıkıştırma oranının artmasına, dolayısıyla da yanma sıcaklığının yüksek olmasına neden olmaktadır. Yanma sonu sıcaklığının artması, özgül yakıt tüketimi ile HC ve CO gibi emisyonların azalmasını sağlarken NO_x emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. İçten yanmalı motorlarda NO_x emisyonlarının meydana gelmesi yanma odasındaki yanma sonunda oluşan sıcaklığa bağlıdır [69].

Yanma odasında yanma başladığı zaman meydana gelen basınç ve yüksek sıcaklıktan dolayı bazı kimyasal reaksiyonlar oluşur. Bu reaksiyonlar çevreye zararlı olan NO_x (azot oksit) meydana getirmektedir. Egzoz emisyonlarında normalin üzerinde olan NO_x’in solunmasının, kimyasal özelliğinden dolayı, nefes alma yollarında kalıcı hasarlara sebep olduğu bilinmektedir.

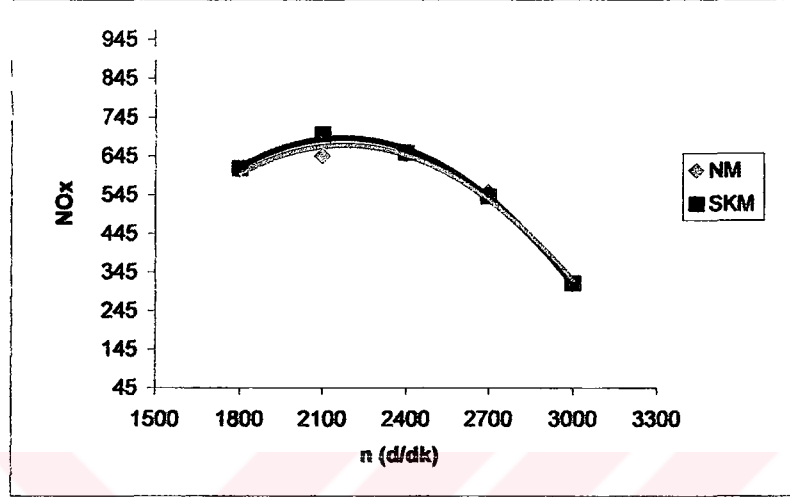
NO_x oluşum mekanizması “Zeldovich mekanizması” olarak bilinen bir zincir reaksiyonu ile açıklanmaktadır [70].



NO_x genellikle 1400 °C’nin üzerindeki sıcaklıklarda oluşur. Özellikle O₂’in bulunduğu bölgelerdeki sıcaklığın yüksekliği ve bu sıcaklıkta kalma süresi oldukça etkilidir. NO_x oluşumu üzerinde; ortamda bulunan N₂ ve O₂ miktarları da etkili bir faktördür [71].

Yanma sonu sıcaklığının artması, NO_x konsantrasyonun da artmasına neden olmaktadır. Oksijenin azotla reaksiyona girmesini kolaylaştıran ve reaksiyon hızını artıran bütün faktörler

NO_x oluşumunu yükseltir. Bu açıdan bakıldığında, NO_x oluşumunda başlıca etken sıcaklıktır. Ancak motor devir sayısı, yanma odası içeriği, yanma odası homojenliği ve yanma odasındaki karışım yoğunluğu da etkilidir. Nitekim şekil 7.6'da görüldüğü gibi her iki motor için düşük devirden orta devire kadar NO_x oluşumunun arttığı, orta ve yüksek devirlerde azaldığı görülmektedir.



Şekil 7.6. NO_x emisyonlarının devir sayısı ile değişimi.

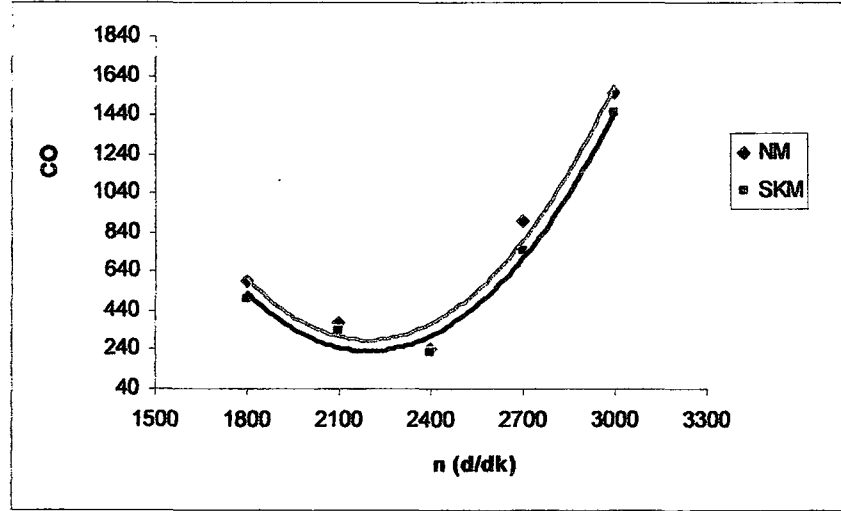
NO_x oluşumunun temel elemanları azot ve oksijen, temin edilen hava ve yakıttan kaynaklanır. Dizel motorlarında piston Ü.Ö.N.'ya varmadan püskürtülen yakıtın yanması ile hızlı yanma periyodunda ani bir sıcaklık ve basınç artışı olur. 1800 °C'ye kadar yükselen ani sıcaklık etkisi ile yakıt ve hava molekülleri parçalanır. Bu periyotta NO_x oluşumu için yeterli sıcaklık bulunmaktadır. Eğer reaksiyon hızı yüksek ve yeterli zaman varsa NO_x miktarı artar. Şekil 7.6'da, belirli bir motor hızından sonra, devir arttıkça NO_x 'in düştüğü görülmektedir. Bu; yükselen sıcaklığa rağmen; NO_x oluşumu için yeterli zamanın olmamasının bir sonucu olarak açıklanabilir. NO_x oluşumunun endotermik bir reaksiyon olduğu düşünülürse, düşük sıcaklıklarda değerinin azalması beklenen bir sonuçtur. NO_x oluşumunda azot ve oksijen atomlarının çarpışma sıklığı, temel parametre olarak yanma odası içeriği yoğunluğunun bir fonksiyonudur. Yaklaşık 2100 d/dk. motor hızından sonra NO_x emisyonunun düşmesi, NO_x oluşumunun sadece sıcaklık ve yoğunluğa bağlı olmadığını açık bir delildir [69].

Motorlarda dolgu basıncının yükselmesi hava akış oranını arttırmaktadır. Bunun sonucu olarak azot oksitlerin oluşumu, NO emisyonunun azaltılması nedeniyle azalırken, O_2 konsantrasyonunu da arttırmaktadır. Hava dolgu basıncı artarken NO emisyonu çok az azalmaktadır. Sonuç olarak dolgu basıncının artması, NO ve özgül yakıt tüketimi üzerinde olumlu etki yapmaktadır [70].

Yük altında motor devri düştükçe yanma için yeterli zaman bulunmaktadır. Yük artışına bağlı olarak bir çevrimde silindire gönderilen yakıtta artmaktadır. Böylece yanma sonu gaz sıcaklığı yükselmeye başlar ve ortamda bulunan gazların yüksek sıcaklıkta kalma süreleri ve buna bağlı olarak NO_x oluşumu artmaktadır. Bir taraftan motor yükü, diğer taraftan motor devri arttırıldığında, yanma odası içeriği sıcaklığının arttığı bilinmektedir. Sonuçta egzoz gazı sıcaklığı da artmaktadır (şekil 7.9). Sadece sıcaklık artışı dikkate alındığında artan motor devri ile NO_x konsantrasyonun artması beklenir. Şekil 7.6'ya bakıldığında belirli bir motor devrinden sonra sıcaklık artışına rağmen NO_x değerindeki azalma, NO_x oluşumunda yüksek sıcaklık yanında başka faktörlerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır. Yüksek devirlerde NO_x 'in düşmesi, ortamda bulunan gazların yüksek sıcaklıkta kalma sürelerinin azalması, böylece NO_x oluşumu için yeterli zaman kalmadığı şeklinde açıklanabilir. Her iki motorda NO_x konsantrasyon değerleri birbirine çok yakın olup benzer eğilim göstermektedir. Yapılan çok ince bir silindir kaplaması ile, NO_x oluşumunda etkili olan faktörlerde kayda değer bir değişim olmadığı yapılan ölçümlerde açıkça görülmüştür. Bunun sonucu olarak her iki motorda da NO_x oluşumunun benzer özellik göstermesi beklenen bir sonuçtur. Seramik kaplanmış motorda yanma sıcaklığının artmasının bir sonucu olarak NO_x oluşumu bir miktar artmıştır.

Yanma esnasında CO (karbon monoksit) oluşumunun sebebi, yakıt içerisindeki karbon atomlarının eksik oksitlenmesidir [72].

Motor devrinin artmasıyla yanma odası sıcaklığı ve buna bağlı olarak yanma reaksiyon sıcaklığı yükselmektedir. Şekil 7.7'de görüldüğü gibi 2400 d/dk. civarlarında CO konsantrasyonunun minimum olduğu görülmektedir. Yanma reaksiyon sıcaklığının orta devirlerde yüksek olması, yanma verimini de iyileştirmektedir. Yanmanın iyileşmesiyle reaksiyona girmeyen hidrokarbon miktarı yükselmekte, dolayısıyla CO konsantrasyonu düşmektedir. Orta devirlerden sonra CO konsantrasyonun arttığı şekil 7.7'de görülmektedir. Motor devrinin artması, yanma odası ortamının sıcaklığını arttıracaktır. Ancak hidrokarbonların oksijenle reaksiyona girme zamanını ise azaltacaktır. Bu da reaksiyona girmeyen hidrokarbonların dışarı atılmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla orta devirlerden sonra CO konsantrasyonu şekil 7.7'de görüldüğü gibi her iki motor içinde yükselme eğilimi göstermektedir.



Şekil 7.7. CO emisyonlarının devir sayısı ile değişimi.

Motorlarda önceki çevrimlerden kalan egzoz gazlarının bir kısmının emme havasına katılarak taze havadaki O_2 (oksijen) miktarını azaltması sonucu yanma sıcaklığı düşmektedir. Bu da volümetrik verimi azalttığı gibi yanma verimini de olumsuz yönde etkilemektedir. Oksijen miktarının az olması, yanmamış hidrokarbonların dışarı atılmasına neden olup, egzozdaki CO konsantrasyonunu arttırmaktadır. Motor devir ve yüküne göre bu oran değişmektedir.

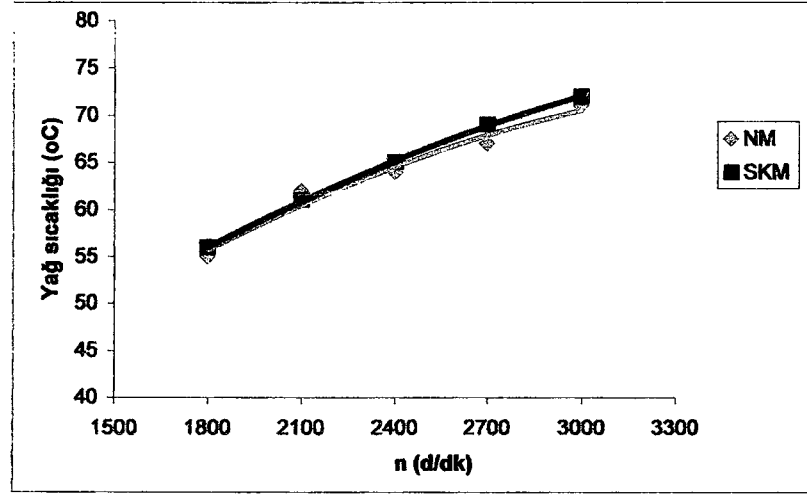
Motorlarda CO oluşumunun eksik hava ve düşük sıcaklıklarda arttığı bilinmektedir. Şekil 7.7' ye bakıldığında CO emisyonunun bir minimumdan geçtiği görülmektedir.

Şekil 7.9'a bakıldığında egzoz gazı sıcaklığının artan devir sayısı ve motor yükü ile doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Bu; CO oluşumunun sadece sıcaklığa bağlı olmadığının bir göstergesi olarak ileri sürülebilir. Düşük motor devirlerinde yanma odası sıcaklığının az olmasının CO oluşumunu azalttığı açıkça görülmektedir [72].

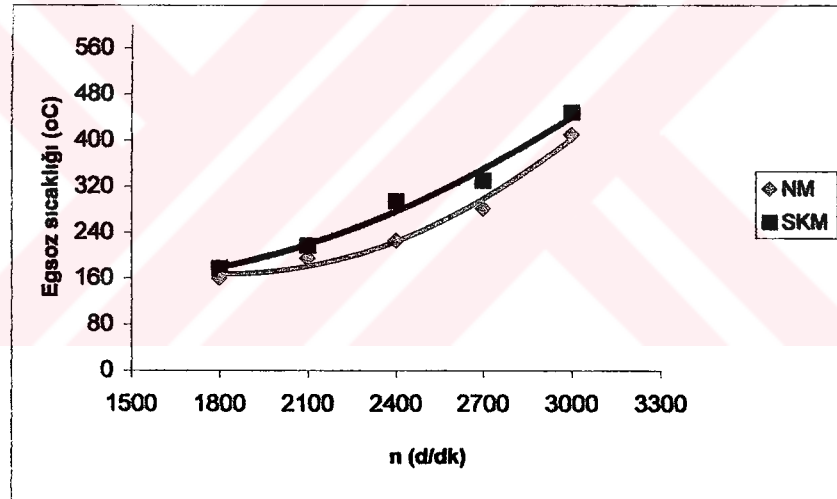
Motora verilen enerjinin artması ile birlikte CO konsantrasyonun düşmesi; CO oluşumunda yanma odası sıcaklığını oldukça etkiler. Motor devir sayısı arttıkça motor volümetrik verimi de artmaktadır. Dizel motorları, stokiyometrik orandan daha fazla hava içeren karışım oranları ile çalışmaktadır. Motor devri arttıkça motorun HFK'nın (hava fazlalık katsayısı) arttığı bilinmektedir. Yüksek HFK'larda karışım teşkilinin iyi olmaması nedeniyle, bölgesel olarak zengin karışımlar ortaya çıkabilir. Dolayısıyla tam yanma yerine, bölgesel eksik yanma sonucu CO oluşumunun arttığı söylenebilir [72].

Her iki motor tipinde de genel olarak CO konsantrasyonu ve eğilimi benzer özellik göstermektedir. Ancak silindiri seramik kaplanmış motorda CO oluşumunda az da olsa bir

düşüklük görülmektedir. Bu; silindiri seramik kaplanmış motorun daha sıcak çalışmasının bir sonucu olarak yanmamış hidrokarbonların yanmaya iştirak etmesiyle açıklanabilir.



Şekil 7.8. Yağ sıcaklıklarının devir sayısı ile değişimi.



Şekil 7.9. Egzoz sıcaklıklarının devir sayısı ile değişimi.

Motorlarda, yakıt-hava yakılarak ısı enerjisi üretilmektedir. Havanın bileşenlerinden oksijen dışındakiler önemli ölçüde yanma olayında etkin değildirler. Emme stroku sırasında hava, herhangi bir kısılmaya maruz bırakılmadan silindire tam olarak doldurulduğu ve bu motorlarda sıkıştırma oranı yüksek olduğu için silindirde gaz sıcaklığı oldukça yüksektir. Dolayısıyla sıkıştırma zamanında enjektörün yakıtı püskürtmesiyle yanma başlamakta, sıcaklık yanma odasında yükselmekte ve maksimum değerine çıkmaktadır.

Motorun $\frac{1}{2}$ yüklenmesi durumunda farklı devirlerdeki egzoz gazı sıcaklığı değişimi şekil 7.9'da görülmektedir. Egzoz gazlarının yanma odasından çıktıktan sonra ölçüm yapılan

noktaya kadar uğradığı değişimler göz önüne alınırsa yapılan bu ölçüm yanma odasında meydana gelen yanma sıcaklığı hakkında tam olmasa da bir fikir vermesi açısından önemlidir. Sıcaklık artışından kaynaklanan ısı üretimi, soğutma sistemi, egzoz ve efektif güç arasındaki dağılım bu yapılan ölçümlerle belirlenebilir. Şekle bakıldığında sabit yükte artan devir sayısı ile egzoz gazı sıcaklığının her iki motor için yükseldiği görülmektedir. Sabit yükte artan devir sayısı ile birlikte birim zamanda motorda yakılan yakıt artmakta ve buna bağlı olarak üretilen ısı enerjisi artmaktadır. Sonuçta egzoz gazı sıcaklığı da yükselmektedir. Şekil 7.9’da yanma odası elemanları seramik kaplanmış (SKM) motorda egzoz gaz sıcaklığının normal motora (NM) göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu fark 48 °C’ye kadar yükselmektedir. Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile kaplama yapılan motor silindirinde ısı transferine karşı az da olsa bir termal bariyer oluşturduğu ve motorun sürekli çalışma sıcaklığında artış olduğu ölçülmüştür. Aynı çalışma şartlarında silindiri kaplanmış motorda egzoz gazı sıcaklığının artması da kaplamanın termal bariyer etkisi olarak açıklanabilir. Şekil 7.8’deki seramik kaplanmış motorun normal motora göre motor yağ sıcaklığının yüksek olması buna bağlanabilir.

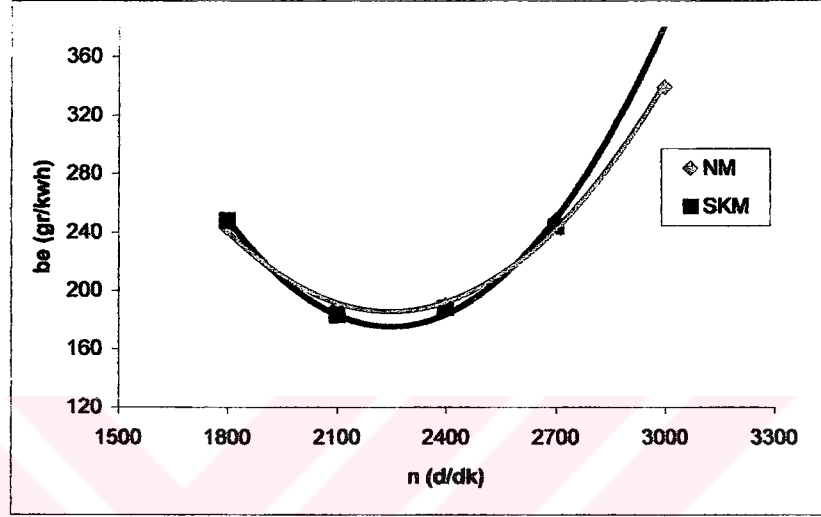
Motorlarda silindirlerin soğuması, silindirlerin etrafında dolaşan su veya hava kanatçıklarına üflenen hava tarafından sağlanmaktadır. Piston ısısının silindire ve buradan soğutma suyuna geçişi, büyük ölçüde sekmanlar yoluyla olmaktadır. Egzoz supabının sıcaklığı gaz çıkışı sırasında 700 °C’ye kadar çıkar. Supabın soğuması, yuvasına oturduğu zaman sağlanır. Yanma odası elemanları CrN ile kaplı olan motorda, kaplama elemanlarının ısı geçişine karşı kısmi bir termal bariyer etkisi yapmasının bir sonucu olarak hem motor sıcaklığı hem de egzoz gazı sıcaklığı yükselmektedir. Bu, kaplama elemanlarının soğutma suyuna geçen ısı transferinin azalmasına neden olduğu görüşüne [73] uygun gelmektedir.

Motor verimi, konstrüktif ve işletme şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Bu iki konu üzerindeki çalışmalarda temel amaçlardan birisi, iyi bir yanma için uygun ortam oluşturmaktır. Birim yakıttan daha fazla verim alınması, yanma odasındaki fiziksel ve kimyasal şartlara bağlıdır. Motorların çalışma sıcaklığının artması, efektif verimi olumlu yönde etkilemektedir [74].

Yanma odasındaki sıcaklığın yükselmesi yanmayı iyileştirmektedir. Ancak dizel motorlarında sıcaklığın arttırılması, özellikle birtakım malzeme problemlerini de beraberinde getirmektedir. Motor yanma odası elemanlarının seramik malzeme ile kaplanması bu sorunu bir dereceye kadar azaltmıştır. Bu sayede motor daha sıcak çalıştırılabilmektedir. Yapılan ölçümlerde seramik kaplanmış motorda sıcaklığın arttığı görülmüştür. Bu sıcaklık artışı bir taraftan motor için ısı kayıplarını azaltırken, diğer taraftan yanmayı iyileştirmektedir. Egzoz gazı emisyonlarındaki iyileşme bunun kanıtı olarak gösterilebilir.

7. 5. 2. Motor Performansı Sonuçları

Özgül yakıt tüketimi motor performansının belirlenmesi açısından oldukça önemli bir parametredir. İçten yanmalı motorlarda özgül yakıt tüketimini etkileyen bir çok parametre vardır. Yanma odası sıcaklığının iyileşmesi ve yanma odası dizaynı bu etkenlerin başında gelmektedir. Şekil 7.10'da özgül yakıt tüketimlerinin devir sayısı ile değişimi verilmektedir



Şekil 7.10. Özgül yakıt tüketimlerinin devir sayısı ile değişimi.

Şekil 7.10'a bakıldığında düşük devirlerde özgül yakıt tüketiminin yüksek olduğu görülmektedir. Düşük devirlerde motorlarda ısı kaybının yüksek, yanma koşullarının motor devri olarak optimum yanma bölgesinden uzak olması, ayrıca düşük devirlerde motor gücünün düşüklüğü dikkate alındığında bu, beklenen bir sonuçtur. Devir artışı ile yanma şartlarının iyileştiği bilinmektedir. Yapılan ölçümlerde devir artışı ile yakıt tüketimi ve güç arasındaki ilişki eğilimi motor gücü lehinde geliştiği görülmektedir. Bunun sonucu olarak artan devirle birlikte özgül yakıt tüketiminin hızla düştüğü söylenebilir. 2100-2400 devir aralığında özgül yakıt tüketimi en düşük değerde olup bu aralığa motorun ekonomik çalışma aralığı denir. Yüksek devirlere çıkıldığında yanma reaksiyonları için gerekli zamandaki daralma, yanmayı olumsuz etkilemektedir. Emisyon ölçümlerinde bu açıkça görülmektedir. Bunun sonucunda ortalama efektif basınç düşmekte, yakıt tüketimi ile motor gücü arasındaki ilişki tersine dönmektedir. Yani artış eğilimi, yakıt tüketimi yönünde gelişmektedir. Sonuçta ekonomik bölgenin üzerindeki devirlerde özgül yakıt tüketimi aşırı şekilde artmaktadır.

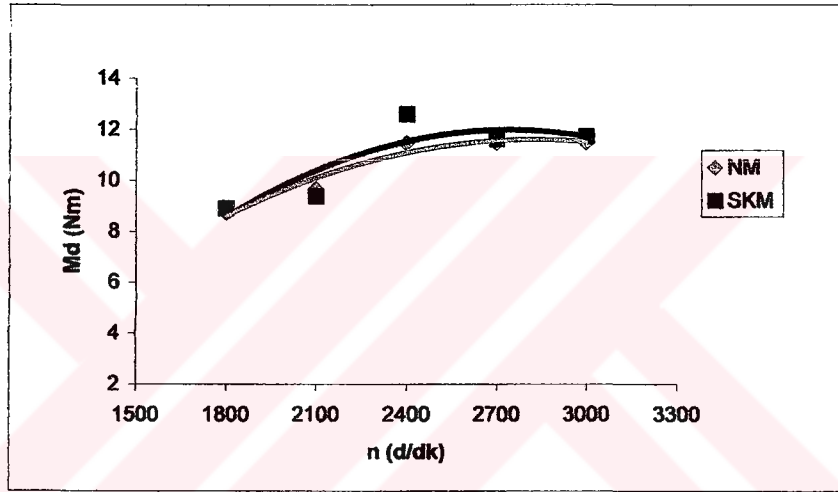
Egzoz gazı ve motorun sürekli çalışma sıcaklığına bakıldığında, silindirleri kaplanmış motorun daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Bu sıcaklık farkı yüksek devirlerde daha

fazla artmaktadır. Motor elemanlarındaki bu sıcaklık artışı, motorun volümetrik verimini olumsuz etkilemektedir [74].

Ancak kaplanmış motorda doldurma veriminin azaltmasının negatif etkisi, yanma sıcaklığının yüksek olmasından dolayı daha iyi bir yanma ile karşılanmaktadır. Böylece volümetrik verimin olumsuz etkisi ancak 2400 d/dk. sonra ortaya çıkmaktadır [4].

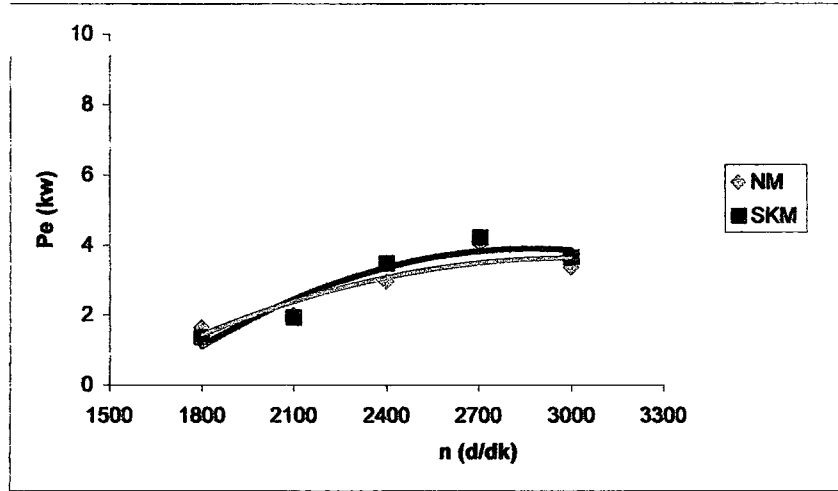
Şekil 7.10'da görüldüğü gibi kaplamalı motordaki özgül yakıt tüketiminde çok az bir iyileşme olduğu, bunun da orta devirlerde gerçekleştiği görülmektedir. Bu iyileşme, yapılan kaplama ile kısmi termal bariyer oluşması ve yanma odası sıcaklığını artmasının sonucu olduğu fikrine uygun gelmektedir [4, 74].

Şekil 7.11'de CrN kaplanmış ve normal motorun, motor momentinin devir sayısı ile değişimi verilmektedir.



Şekil 7.11. Motor momentinin devir sayısı ile değişimi.

Şekil 7.11'de görüldüğü gibi seramik kaplanmış motorun (SKM) motor momentinin normal motora (NM) göre özellikle orta devirlerde biraz artış gösterdiği görülmektedir. Bu artış, yapılan kaplama neticesinde oluşan kısmi termal bariyer etkisiyle yanmanın normal motora göre iyileşmesi şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 7.12. Efektif gücün devir sayısı ile değişimi.

Tablo 7. 5. Deneyler sonucunda kaplamalı ve normal motorda elde edilen P_e (kw) ve M_d (Nm) değerleri

Motor devri (d/dk)	Pe (kw)		Md (Nm)	
	KM	NM	KM	NM
1800	1,35	1,64	7,87	8,75
2100	1,92	1,99	8,75	9,05
2400	3,10	2,51	12,37	10
2700	3,50	2,89	12,05	10,25
3000	4,16	4,08	13,25	13

Kaplamalı ve normal motorların efektif güçlerinin devir sayısı ile değişimi şekil 7.12’de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi düşük devirlerde her iki motora ait efektif güç değerlerinde pek fazla bir değişme olmamaktadır. Orta devirlerde kaplamalı motorun efektif gücünde çok az bir artış gözlenmiştir. Bunun sebebi de orta devirlerde kaplamalı motordaki yanmanın normal motora göre biraz daha iyi olması ve yanma verimiyle birlikte efektif gücün bir miktar artması olarak düşünülebilir. Her iki motorda da orta devirlerde yanmanın iyileşmesi, yanma verimini de iyileştirmektedir. Birim yakıttan daha fazla güç elde edilmesi şekil 7.12’de görüldüğü gibi efektif verimin bir miktar artmasına neden olmuştur. Yapılan deneylerde motor tam yük altında çalıştırılmadığı için elde edilen sonuçlarda bir miktar değişiklik gözlenmiştir. CrN kaplanmış motorun orta devirlerinde normal motora göre efektif veriminde çok az da olsa bir artış gözlenmiştir. Bunun da yapılan kaplamanın kısmi bir termal bariyer etkisi yapmasıyla yanma sıcaklığını arttırdığı [74], böylece birim yakıttan daha fazla gücün elde edilmesi şeklinde yorumlanabilir. Ancak kaplanmış motorda efektif gücün normal motora göre biraz daha fazla olmasında silindir yüzey pürüzlülüğünün de etkisi vardır. CrN kaplanmış motorda silindir yüzey

pürüzlülüğünün düşük olması, sekmanların dolayısıyla pistonun ölü noktaları atlamasında kolaylık sağlayacaktır. Bu, kayıp enerjinin efektif güce dönüşmesi şeklinde açıklanabilir.

7. 5. 3. Metalografik Çalışma

Yapılan deneyler sonucu numunelerin mikro yapılarını ve meydana gelen fazları belirlemek amacıyla çeşitli metalografik çalışmalar yapılmıştır. Bunların başında SEM (Scanning Elektron Microscopy), EDS (Energy Dispersive Spectrograf) noktasal analiz çalışmaları, X-ışınları difraksiyonu (X- Ray Diffraction), yüzey pürüzlülük ve mikro sertlik ölçümleri gelmektedir.

Yapılan deneyler sonunda her iki motordaki silindir gömleği sökülerek bu parçaların karşılıklı olarak üst, orta ve alt bölgelerinden numuneler alınarak bunların SEM, EDS, X-RAY, sertlik ve yüzey pürüzlülük analizleri yapılmıştır. Çalışma sonunda elde edilen bulgular değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

Kaplanmış ve normal motora ait silindirler CNC tezgahında 10 mm x10 mm x10 mm ebadında kesildikten sonra 60-120-400-600-800-1200'lük zımparalar ile zımparalanmıştır. Çuhada 1µm'lik elmas pasta ile yüzeyleri zımparalanan numunelerden önce kaplama yapılan numuneler, daha sonra normal numuneler parlatılmıştır. Yüzeyleri parlatılan numuneler alkol ile temizlenmiştir. Yüzeyleri temizlenen numuneler % 2-3 nital (%98 alkol + %2 nitrik asit HNO_3) ile dikkatli bir şekilde dağlanmıştır. Sırasıyla bütün numuneler dağlanarak analizler için hazırlanmıştır. CrN kaplı numunelerden sadece bir tanesi mikro yapıyı incelemede kolaylık sağlaması amacıyla $\text{HNO}_3 + \text{COH}_3\text{COOH}$ çözeltisi ile dağlanmıştır. Ortamdaki nemden etkilenmemesi ve oksitlenmesinin önüne geçmek için kutulanan numunelerin içine silikagel konarak kapatılmıştır.

7. 5. 3. 1. Yüzey Pürüzlülüğünün ve Sertliğinin Aşınma Üzerine Etkisi

Pürüzlülük ölçümlerinde Perthometer 58P yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Numunelerin ölçüm aralıkları VB: 125 mm ve LT: 5,6 mm olarak belirlenmiştir.

Motorlarda, silindir-sekman-piston çalışma mekanizması düşünüldüğünde, bu parçalardan özellikle silindir yüzey pürüzlülüğünün aşınma üzerinde önemli bir etkisi vardır. Yüzey pürüzlülüğü, dönen millerde malzeme yorulmasına neden olduğu için böyle sistemlerde pürüzsüz bir yapı istenmektedir. Ancak silindirlerde belirli bir seviyede pürüzlülük olması, aşınma esnasında yağ tutma özelliği kazandırması bakımından arzu edilen bir özelliktir. CrN kaplanmış silindir gömleğinin lamel grafitli dökme demir silindire göre yüzey pürüzlülüğünün düşük olmasının sadece silindir üzerinde meydana gelen aşınmayı azaltmadığı, aynı zamanda

karşıt malzeme olan aynı işleme tabi tutulmuş sekman ve piston yüzeyleri üzerinde de aşınmayı azalttığı söylenebilir. Şekil 7.26'da görüldüğü gibi aşınmadaki bu azalmanın silindir-piston-sekman arasına giren aşınma partiküllerinin az olmasından ve CrN kaplı silindirin yüzey pürüzlülüğünün düşük, yüzey sertliğinin ise yüksek olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Bahsedilen bu aşınma mekanizmasının meydana getirdiği plastik deformasyon ve diğer hasarlar şekil 7.27'de açıkça görülmektedir.

Katodik Ark fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle bir malzemenin üzerine elektrolitik sert krom kaplama yapılan yüzeyin kaplanmamış (substrate) malzemeye göre yüzey sertliğinin yüksek, pürüzlülüğünün düşük olmasından dolayı aşınmasının azaldığı bildirilmiştir [68].

Elde ettiğimiz sonuçlar bu çalışma ile paralellik göstermektedir. Tablo 7. 6'da deneylerde kullanılan motor silindirlerinin ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri görülmektedir.

Tablo 7. 6. Deneylerde kullanılan motor silindirlerinin ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri

Silindirlerin yüzey pürüzlülüğü (μm , VB:125 μm , LT: 5,6mm)		
CrN kaplanmış (çalışmamış) silindir (Ra: 0.22)		
Normal (çalışmamış) silindir (Ra: 0.34)		
Ü.Ö.N.	Kaplı silindir	Normal silindir
	RA: 0,26	RA: 0,47
	RZ: 2,17	RZ: 3,38
Orta kısım	RA: 0,23	RA: 0,42
	RZ: 2,59	RZ: 3,73
A.Ö.N.	RA: 0,22	RA: 0,39
	RZ: 2,47	RZ: 3,31

Tablo 7.7. Deneylerde kullanılan motor silindirlerinin ölçülen sertlik değerleri.

HV Sertlik	
CrN kaplanmış silindir	1800
Normal silindir	243

Malzemelerin sertliği ile aşınma dirençleri orantılı olarak değişmektedir. Bir malzemenin sertliğinin artması, onun aşınmaya karşı direncini arttırmaktadır. Deneylerde kullanılan motor silindirlerinin ölçülen sertlik değerleri Tablo 7. 7'de verilmiştir. Tablo 7.8'de ise incelenen numunelerin silindirlerdeki yerleri görülmektedir.

Tablo 7. 8. İncelenen numunelerin silindirlerdeki yerleri.

Numune no	Silindirlerdeki yerleri
1	Normal silindirin çalışma sonrası orta bölümü
2	Kaplanmış silindirin çalışma sonrası orta bölümü
3	Normal silindirin çalışma sonrası orta bölümü
4	Kaplanmış silindirin çalışma sonrası orta bölümü
5	Normal silindirin Ü.Ö.N.'ya yakın bölümü
6	Kaplanmış silindirin çalışma sonrası Ü.Ö.N.'ya yakın bölümü
7	Kaplanmış silindirin A.Ö.N.'ya yakın bölümü
8	Normal silindirin A.Ö.N.'ya yakın bölümü
9	Normal silindirin orta kesiti
10	Kaplanmış silindirin orta kesiti
11	Kaplanmış silindirin Ü.Ö.N.'ya yakın bölümü
12	Normal silindirin Ü.Ö.N.'ya yakın bölümü
13	Kaplanmış silindirin çalışma öncesi durumu
14	Normal silindirin çalışma öncesi durumu

Silindir gömleğinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde iki faktör etkilidir. Bunlardan bir tanesi malzemeyi oluşturan elementer yapı, diğeri ise işleme sırasındaki hassasiyettir. Yüzey pürüzlülüğünde mikro yapıda bulunan karbür miktarının artması ve karbür tanelerinin irileşmesi, abrasiv aşınma direncini arttırmaktadır. Yüzey pürüzlülüğünün artışı ile abrasiv aşınma doğru orantılıdır. Dolayısıyla silindir gömleklerinde en çok meydana gelen aşınma tipi olan abrasiv aşınma miktarı, yüzey pürüzlülüğünün azaltılması ve matris mikro sertliğinin artırılmasıyla azaltılabilmektedir. Aşınma sistemindeki artış pürüzlü yerlerde daha çok görülmektedir. Bu mikroskobik temas alanında en yüksek gerilme, temas iç yüzeyinde görülür. Burada ince bir kaplama uygulanması, sürtünme ve aşınma özelliklerinin gelişmesi için bir fikir vermektedir. Yüzey topografyası, artık gerilme (residual stress), kaplamanın mikro yapısı ve kaplama kalınlığı kaplama malzemesinin cinsi ile ilişkilidir. Malzemenin bu özellikleri kaplama malzemenin seçimi ile değiştirilebilir.

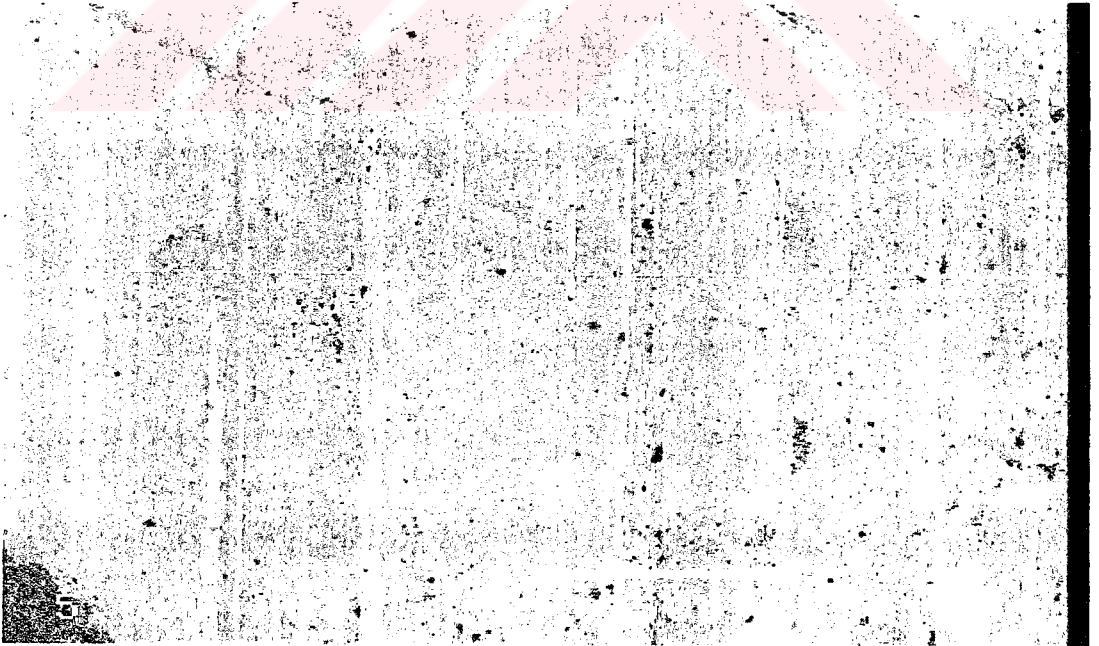
İnce (CrN) kaplamalar, yüksek sertlik ve artık gerilme özellikleri ile kaplamanın yapışmasını artırdığı için tavsiye edilir [75].

Malzemelerin yüzey pürüzlülük değerleri aşınma ve sürtünme katsayısı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Deney motorunda kullanılan iki tip silindir gömleğinin yüzey pürüzlülükleri tablo 7.6'da verilmiştir. Kaplanmış silindir gömleği ile normal silindir gömleğinin karşılıklı aynı

bölgelerinden alınan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil.7.13’de CrN kaplanmış silindir gömleğinin, şekil 7.14’de ise normal silindirin çalışma öncesi SEM fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 7.13. CrN kaplanmış silindir gömleğinin çalışma öncesi SEM fotoğrafı. (Numune 13x1000)

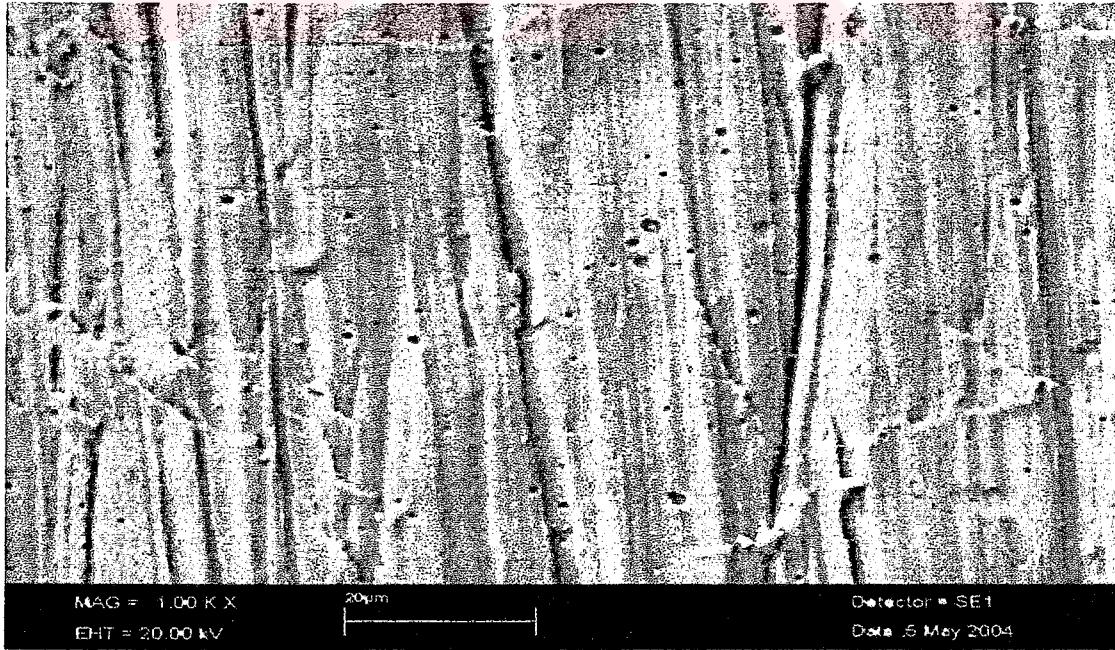


Şekil 7. 14. Normal silindir gömleğinin çalışma öncesi SEM fotoğrafı. (Numune 14 x1000)

SEM fotoğraflarında CrN kaplanmış silindir gömleğinin yüzeyinin normal silindire göre daha az pürüzlü olduğu görülmektedir. CrN kaplanmış silindir gömleğinin yüzey pürüzlülük değerinin düşük olması,şekil 7.16’da görüldüğü gibi silindir yüzeyinde meydana gelen aşınmayı azaltmıştır.



Şekil 7.15. Normal silindir gömleğinin orta bölümünün çalışma sonrası yüzeyinin SEM fotoğrafı .
(Numune 1 x750)



Şekil 7.16. CrN kaplanmış silindir gömleğinin çalışma sonrası yüzeyinin SEM fotoğrafı .
(Numune 2 x500)

Pürüzlü yüzeylerdeki temas alanının genişlemesi, silindir yüzeylerindeki sürtünme katsayısının değerini yükseltmektedir.

CrN kaplı silindir gömleğinin yüzey pürüzlülük değerinin düşük olmasının karşıt malzemede de aşınmayı azalttığı düşünülmektedir [76].

Silindir-sekman-piston çalışma mekanizması düşünüldüğünde CrN kaplanmış silindirin yüzey pürüzlülüğünün düşük olması, hem piston hem de sekman üzerinde oluşan abrasiv aşınmayı azalttığı düşünülmektedir.

Yüzey pürüzlülüğü arttığı zaman aşınma temas noktalarında kopan aşınma partikülleri, zamanla kazımalı aşınma olarak tarif ettiğimiz aşınmayı meydana getirmektedir. Şekil 7.15’de görüldüğü gibi silindir yüzeyinde kopmalara ve yırtılmalara bu aşınma partiküllerinin sebep olduğu düşünülmektedir.

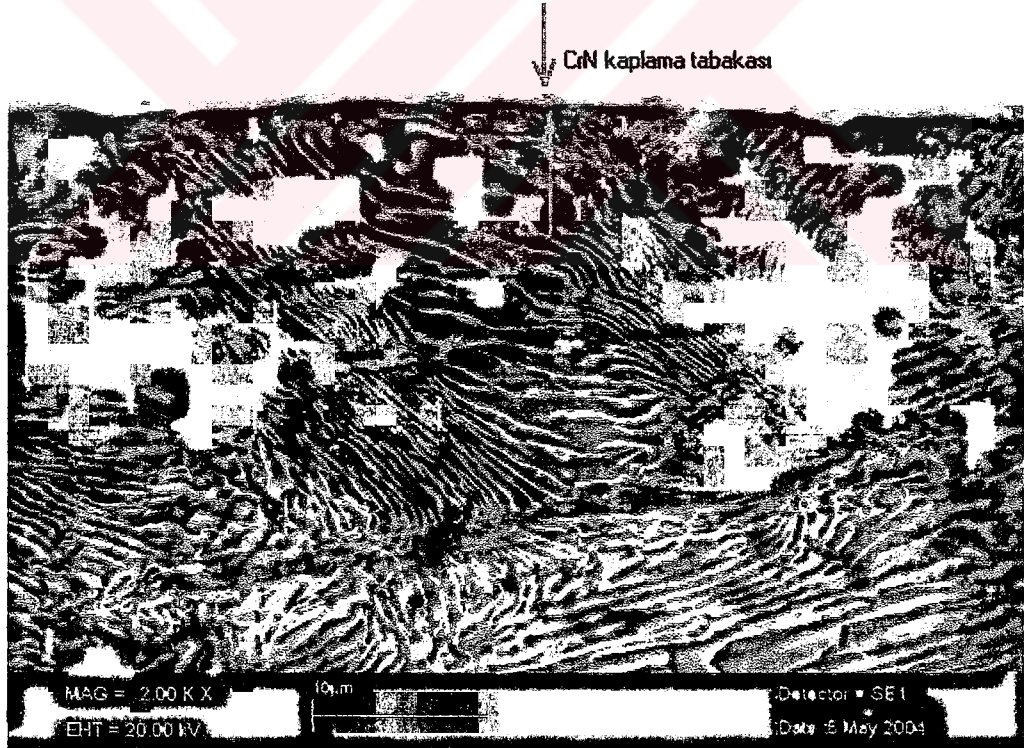
7. 5. 3. 2. Silindirlerin Mikro Yapısı ve Aşınma

İçten yanmalı motorlarda genellikle lamel grafitli dökme demir silindirler kullanılır. Şekil 7.17’de lamel grafitli dökme demir silindir gömleğinin mikro yapı fotoğrafı verilmiştir. Şekil 7.17’de görüldüğü gibi mikro yapı; ferrit, perlit ve lamel grafitten oluşmaktadır. Dökme demir silindir gömleği, karbon ihtiva eden bir alaşımdır. Karbon, şekil 7.17’de görüldüğü gibi yavaş soğuma esnasında temel dokunun içinde grafit yaprakçıkları şeklinde ayrışmaktadır. Silindir gömlekleri mümkün olduğu kadar perlitik bir yapıya sahip olması gerekir. Perlitik yapı inceldikçe aşınmaya karşı mukavemet artmaktadır. Silindirlerin yapısında mümkün olduğu kadar sementit ve ferrit yapıdan kaçınılmalıdır. Silindirlerde grafit dağılımının homojen bir görünüme sahip olması gerekir. Şekil 7.17’ye bakıldığında deneylerde kullanılan silindir gömleğinin homojen bir grafit dağılımına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca grafitlerin kendi kendini yağlayıcı özelliği silindirlerin aşınmaya karşı direnci açısından oldukça önemlidir.

Katodik Ark PVD yöntemi ile yüzeyi CrN kaplanan silindir gömleğinin kesit yüzeyi üzerinden alınan SEM fotoğrafında kaplama tabakası şekil 7.18’de görülmektedir. Kaplama tabakası ile esas malzeme ara yüzeyinde; boşluk ve çatlağın olmadığı açıkça görülmektedir.



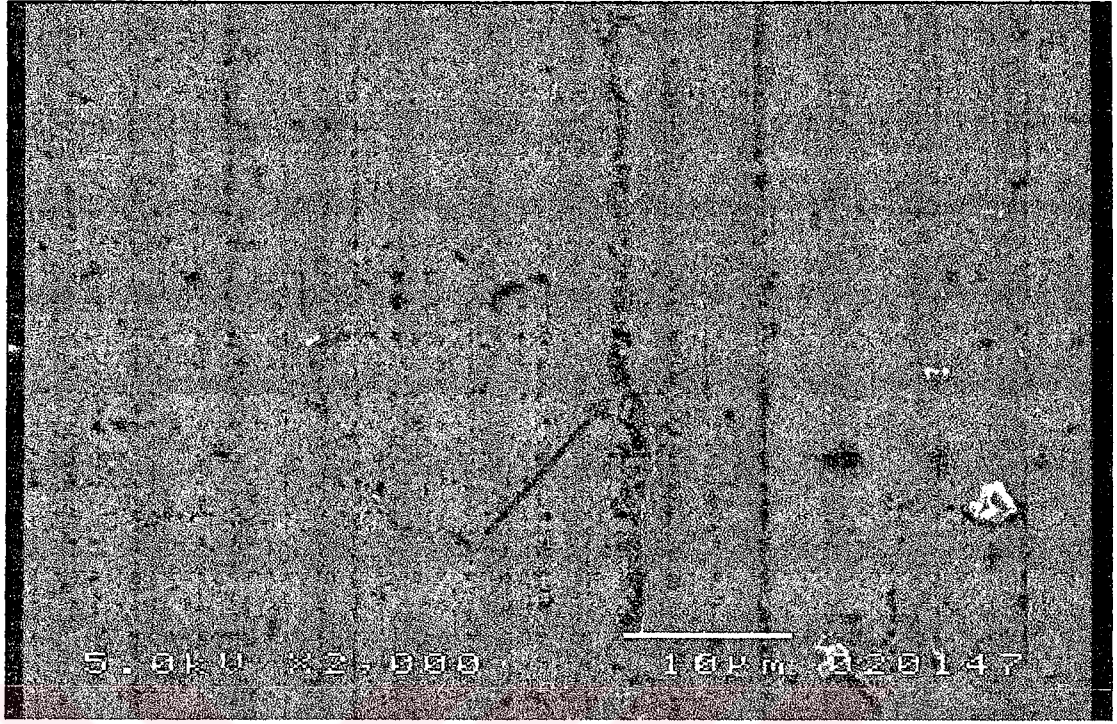
Şekil 7.17. % 2-3 nital çözeltisi ile dağlanmış CrN kaplı silindir gömleğinin kesitinden alınmış SEM fotoğrafı. (Numune 9x500)



Şekil 7. 18. $\text{HNO}_3 + \text{COH}_3\text{COOH}$ çözeltisi ile dağlanmış CrN kaplı silindir gömleğinin kesitinden alınmış SEM fotoğrafı. (Numune 10x2000)

Modifikasyon yapılmış silindir gömleğinde aşınmanın az olması ve yüzey pürüzlülüğünün düşük olmasının hidrodinamik yağlamanın ömrünü uzattığı düşünülmektedir. CrN kaplamada şekil 7.21’de görüldüğü gibi FBB yönteminin üretiminden dolayı oluşan bazı dropletler görülmektedir. Bu dropletler aslında üretim hatasıdır. Ancak silindir yüzeyinin yağlaması açısından düşünüldüğünde bu dropletlerin içerisine dolan yağın, yağlamaya katkıda bulunabileceği ileri sürülmektedir. Motor birkaç gün çalıştırılmadığında silindir yüzeylerindeki yağ kartere sızar ve yüzeyler kurur. Motor ilk çalıştırıldığında, yağlama sistemi normal işlevini yerine getirmeye başlayıncaya kadar ki geçiş sürecinde silindir yüzeylerine yeterli yağ gelmez ve istenilen seviyede yağlama gerçekleşmez. Böyle durumlarda, geçiş sürecinde, yağlama da kötüleşir. Bu geçiş sürecinde silindirde meydana gelen aşınma çok yüksek olmaktadır. CrN kaplı silindir yüzeyinde oluşan bu dropletler sayesinde yağ çukurcukları oluşur, böylece motor ilk çalıştırılmaya başlandığında karterdeki yağın silindir yüzeyine ulaşmasına kadarki sürede yağlamaya ve hidrodinamik yağlama rejimine katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Silindir-piston-sekman çalışma sisteminde meydana gelen aşınmayı azaltmak için silindirler yağlanmaktadır. Ancak silindir yüzeylerinin bir miktar yağ tutma özelliğine sahip olması istenir. Bu da silindir yüzeylerine honlama dediğimiz işlemle yapılır. Silindirlerin mikro yapısında bulunan grafitler de, kendi kendini yağlama özelliğinden dolayı yağlamaya katkıda bulunur.



Şekil 7.19. Normal silindir gömleğinin orta bölümünün çalışma sonrası SEM fotoğrafı. (Numune 3x2000)

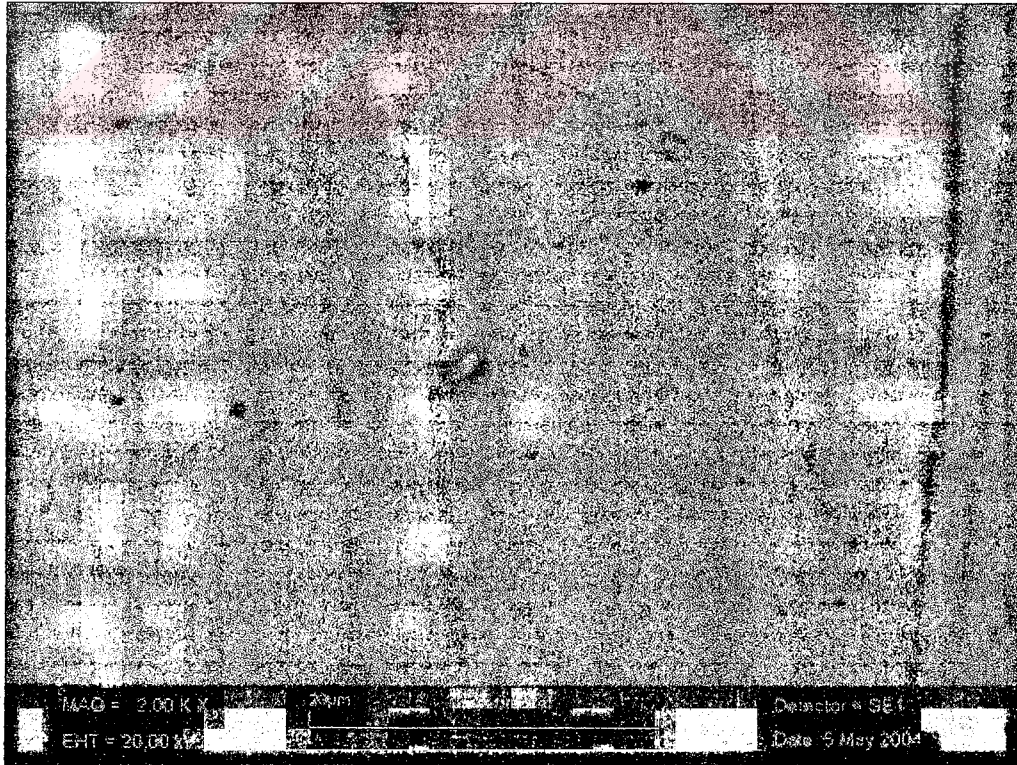


Şekil 7.20. Normal silindir gömleğinin çalışma sonrası SEM fotoğrafı. (Numune 3x1000)

Silindirlerde meydana gelen aşınmanın birçok sebebi vardır. Bu sebeplerin başında silindir cidarlarındaki yağ noksanlığı gelmektedir. Silindirlerde yağlama yapılmasına rağmen sekmanlar çalışma sırasında bu yağı sürekli bir şekilde silindir cidarlarından kazımaktadırlar. Dolayısıyla kuru metal-metal temasa neden olarak aşınmayı başlatmaktadırlar. Sonuç olarak sürtünmeden meydana gelen sıcaklık, metal kaynamalarına ve yüzey bozulmalarına neden olarak yüzeyde çeşitli çatlaklar meydana getirir. Silindirlerde bu tip arızalar genellikle silindirlerin alışma döneminde meydana gelir. Dolayısıyla silindir yüzeyinde sızan yanmış sıcak gaz, pistonu ısıtacak ve aşırı yük altında sekman ile birlikte silindirde sarma ve krepaj çiziklerine neden olabilmektedir.

Deney sırasında motor yük altında çalıştırılarak aşırı ısındığı dikkate alınırsa, şekil 7.19 ve 7.20’de görülen derin çiziklerin yukarıda anlatılan krepaj mekanizmasının sonucu olduğu söylenebilir. Bunlara ilave olarak CrN kaplı silindir gömlek yüzeylerinin dökme demire göre daha sert olması, derin çizikler oluşmasını engellediği düşünülmektedir.

CrN kaplanmış silindir gömleğinin lamel grafitli dökme demir (GG 25) silindire göre sürtünme katsayısının düşük olmasında CrN kaplamanın sertliği ve temas alanının etkisi de vardır. CrN kaplanmış silindir yüzeyinin lamel grafitli dökme demir silindire göre yüksek sertliği, taşıyabileceği yük kapasitesini de arttırmaktadır [75].



Şekil 7. 21. CrN kaplanmış silindir gömleğinin orta bölümünün çalışma sonrası SEM fotoğrafı. (Numune 4x2000)

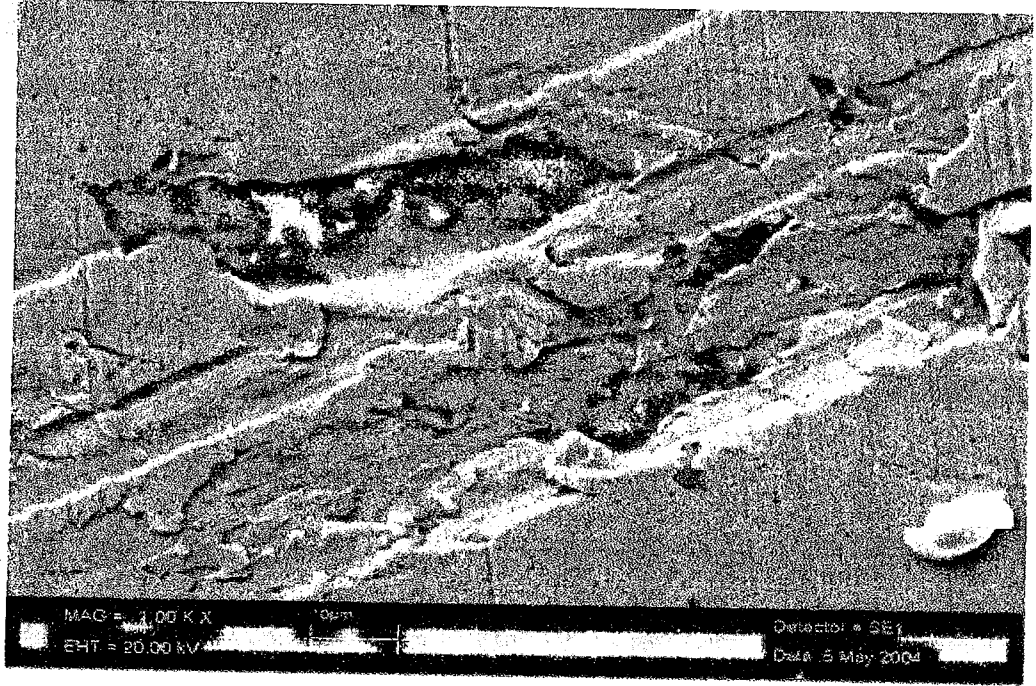
Motorun çalışması esnasında silindir ile sekman arasındaki yağ filminin zaman zaman veya ilk çalışma esnasında yırtılmasından dolayı metal-metal teması sonucu üretilmiş çeşitli metal hasarları meydana gelmektedir. Şekil 7.19 ve 7. 20'ye bakıldığında normal silindir yüzeyi üzerinde meydana gelen abrasiv aşınma ve aşınma partiküllerinin oluşturduğu serbest yüzey kırıkları, mikro çatlaklar ve aşınma izleri açık bir şekilde görülmektedir. SEM fotoğraflarına bakıldığında aşınma olukları dar ve derin olmasına rağmen bazı bölgelerde genişleyip derinleştiği, ayrıca silindir malzemesinin GG 25 lamel grafitli dökme demir olmasından dolayı oluşan kısmi döküm boşlukları görülmektedir.

CrN kaplanmış silindirde aşınma yüzeyinde önemli bir hasarın olmadığı, ince taneli ve düzgün bir yüzey topografyasına sahip olduğu şekil 7.21'de görülmektedir. CrN kaplamanın düşük yüzey pürüzlülüğü ve yüksek yüzey sertliğinin, silindir yüzeyinin aşınma direncini arttırdığı ve sonuçta aşınmayı azalttığı söylenebilir.

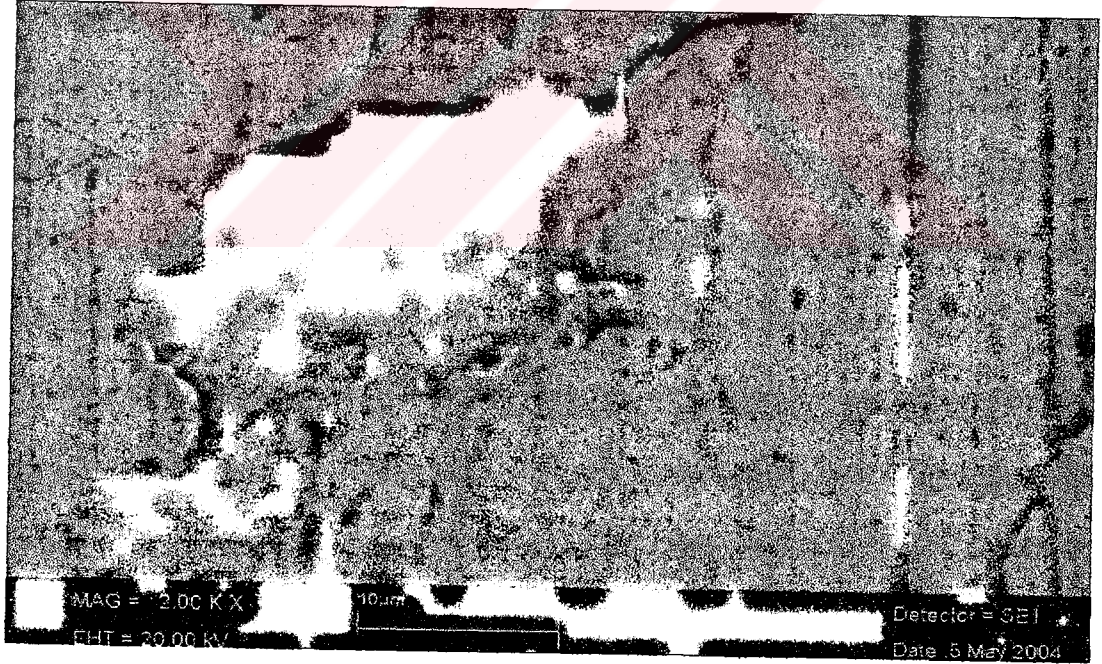
CrN kaplanmış silindir yüzeyine bakıldığında herhangi bir derin mikro çatlakın veya normal silindire göre aşınma izinin çok az olduğu açıkça görülmektedir. Yapılan kaplama işleminde bileşik tabaka yapısının (adhezyonun) yüksek olması, hem iyi bir aşınma hem de iyi bir sürtünme direncine sahip olduğunu göstermektedir.

CrN kaplamalar, dökme demir silindire göre daha yüksek korozyon direncine sahiptir. Yapılan çalışmalarda, CrN kaplamanın yüksek korozyon ve plastik deformasyon direncine sahip olduğu [41,47], sert kaplanmış malzemelerin korozyon direncinin iyileştirilmesinde; kaplama kalınlığının artırılması, daha düşük substrate pürüzlülüğü ve uygun morfoloji faktörlerinin etkili olduğu [40,44] bildirilmiştir.

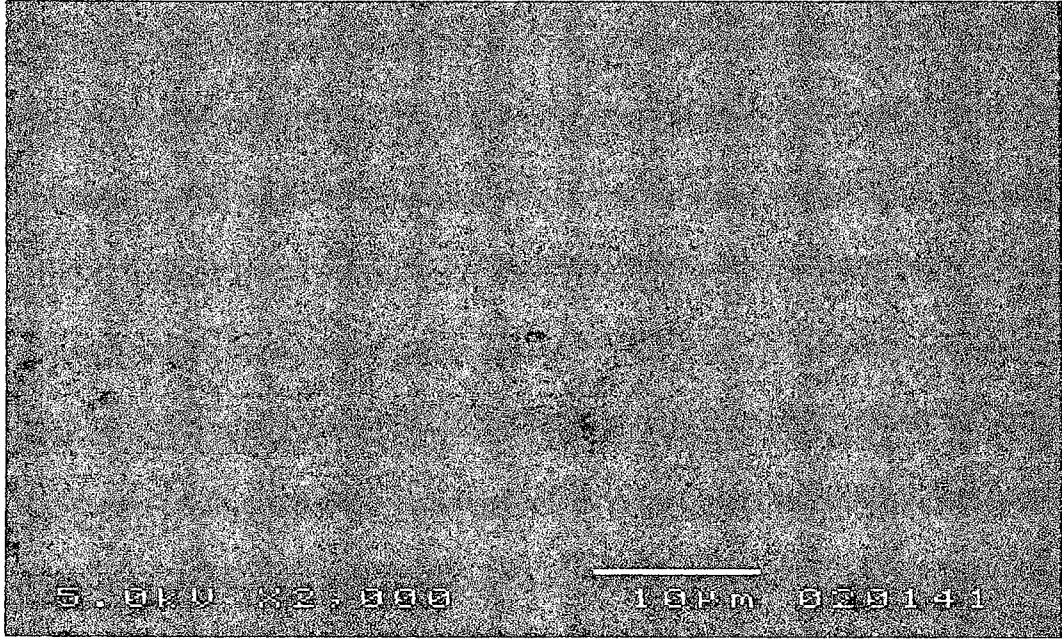
Piston malzemesi üzerine ion-implantation yöntemi ile A390 alaşımı kaplama yapılan bir çalışmada, kaplama yapılan malzeme üzerine karşıt malzemeden kütle transferi olduğu bildirilmiştir [25]. Bu da aşınma mekanizmasında karşıt malzemeden kütle (malzeme) transferinin gerçekleşebileceği görüşünü desteklemektedir.



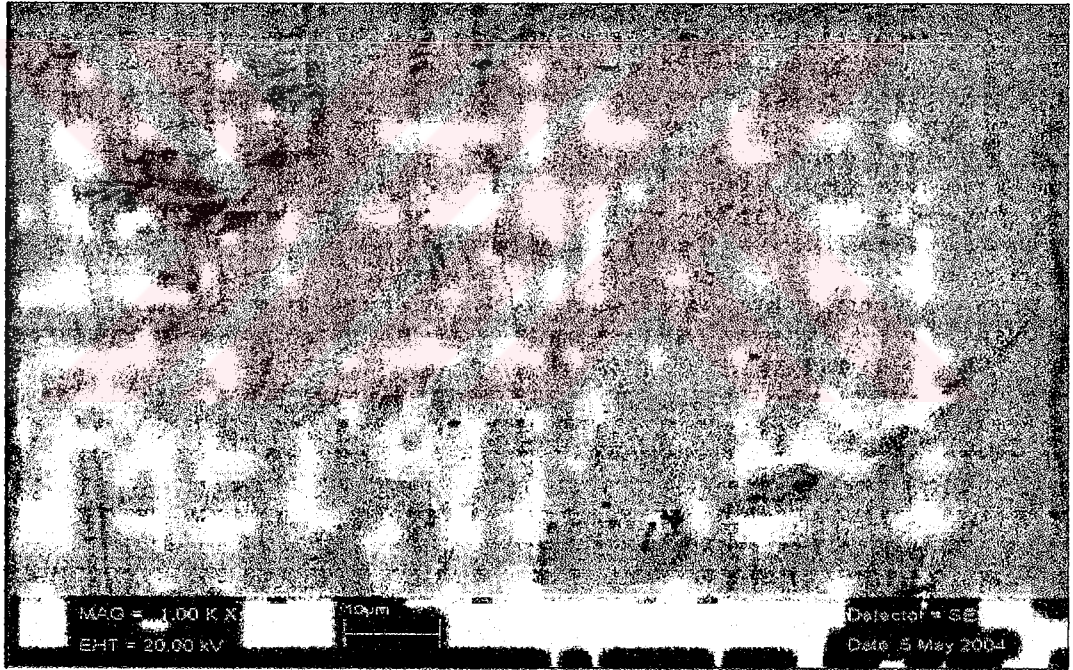
Şekil 7. 22. Normal silindir gömleğinin çalışma sonrası SEM fotoğrafı. (Numune 12 x1000)



Şekil 7. 23. Normal silindir gömleğinin Ü.Ö.N.'ya yakın bölümünün çalışma sonrası SEM fotoğrafı (Numune 5x2000).



Şekil 7.24. CrN kaplanmış silindir gömleğinin Ü.Ö.N.'ya yakın bölümünün çalışma sonrası SEM fotoğrafı.(Numune 6x2000)



Şekil 7.25. CrN kaplanmış silindir gömleğinin çalışma sonrası SEM fotoğrafı. (Numune 11x1000)

Motorlarda çalışma esnasında yağ filminde aniden oluşan yırtılmanın ve tekrar oluşmanın sürtünme katsayısı üzerinde önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir.

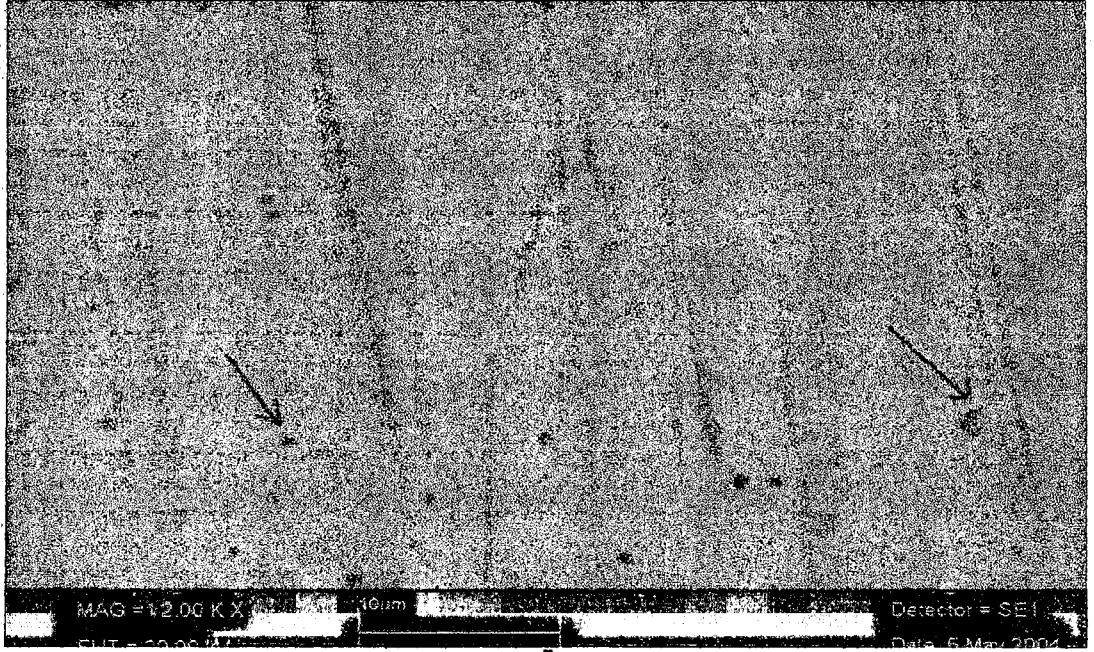
Wang ve diğ. [25], silindir ve pistondaki aşınma üzerine yaptıkları çalışmalarında, silindir gömleği ve piston eteğinin soğuk sürtünmesinin esas sebebinin, yüksek yan kuvvetlerden dolayı oluşan yağın yüksek viskozitesi ve yakıtın sulanması olduğunu belirtmişlerdir.

Genel anlamda aşınma, sürtünme sonucu aşamalı ve düzgün bir şekilde oluşan şekil bozukluğudur. Silindirlerdeki aşınma; sürtünme ile birlikte yanma, yağlama ve soğutmanın oluşturduğu fiziksel ve kimyasal etmenlerin silindir yüzeyini etkilemeleri sonucu meydana gelir. Motorun çalışması ile artan ısı da, aynı şekilde silindir çevresinde, özellikle üst tarafta farklı gerilmeler oluşturur. Değişik kaynaklı bu gerilmelerin etkisiyle silindirler şekil değiştirir ve silindiriklik bir miktar bozulur. Dairesel olan sekmanlar ise, şekil bozukluğunun ilk anlarında, silindirin ovalliğine tam olarak uyamazlar. Bu nedenle, silindir ve sekmanlar karşılıklı uyum sağlayıncaya kadar birlikte aşınır.

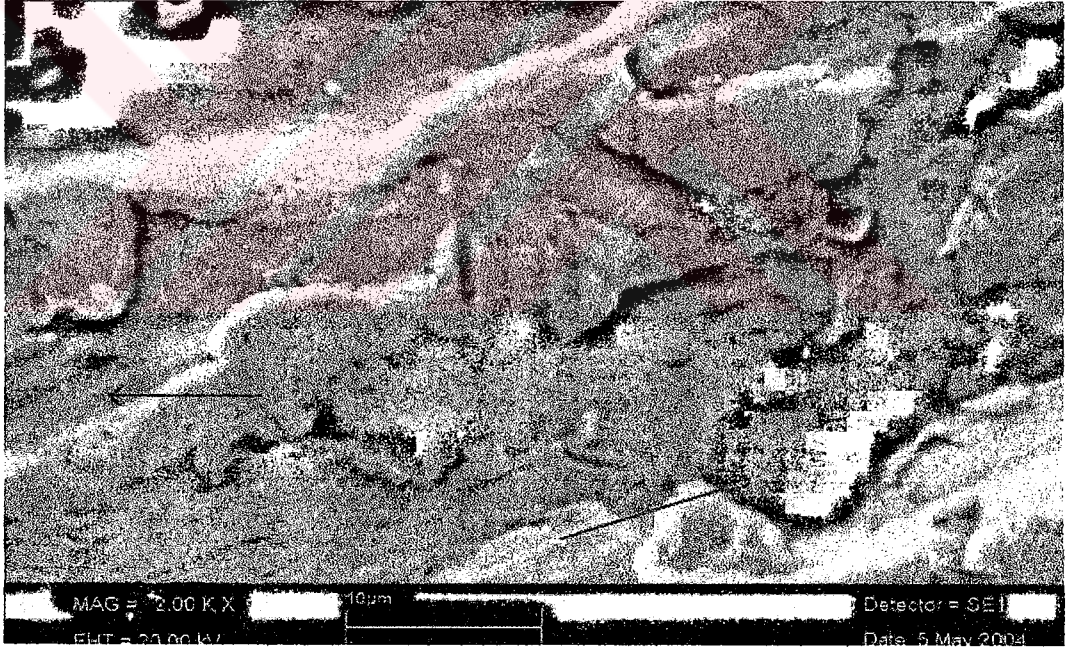
Silindir ve sekman arasındaki etkileşimde bahsedildiği gibi kısmi yağ filminin yırtılması özellikle pürüzlü yerlerde deformasyona sebep olur ve sonuçta bu bölgelerde kırılma meydana gelir. Normal silindir gömleğinde silindir yüzey pürüzlülüğü dikkate alındığında üst bölümlerinde, silindir yüzeylerindeki derin yırtılmalar bu fikre uygun gelmektedir (şekil 7.23). Şekil 7.25’de görülen CrN kaplanmış silindir gömleği aynı bölgesinde daha az deformasyon ve kırılmaların oluşması yüzey pürüzlülüğü ve yağ filminin yırtılma ve deformasyon üzerinde etkili olduğu düşüncesini desteklemektedir. Meydana gelen kırılmaların bu bölgelerde aşınma ürünlerini oluşturduğu, böylece abrasiv aşınma tipi aşınmayı başlattığı söylenebilir. Oluşan bu aşınma partiküllerinin tamamını yağ kartere taşıyamaz. Bu partiküller silindir yüzeyine yapışır yada çizilmeye sebep olarak silindir yüzeyinde mikro kesikler ve iz oluşturur.

Aşınma sırasında kopan sert partiküller, toplam aşınma özellikleri üzerinde negatif bir etkiye sahiptir. Bu partiküller aşınma mekanizması sırasında yüzey üzerinde yarıp geçme şeklinde bir rol oynayarak abrasiv aşınmayı meydana getirir [39].

Şekilde 7.23’de görüldüğü gibi bu aşınma partiküllerinin silindir yüzeyinde oyuklar açması ve mikro kesme davranışları göstermesi, sınır yağlama şartlarında aşınma mekanizmasının abrasiv tipte olduğunu ispatlamaktadır. CrN kaplı silindirin aynı bölgesinden alınan SEM fotoğrafı incelendiğinde herhangi önemli bir kopma, kırılma ve plastik deformasyon olmadığı şekil 7.24’de görülmektedir. Bu da CrN modifikasyonu yapılmış silindirde normal silindire göre daha az aşınmanın meydana geldiğini ispatlamaktadır. Şekilde 7.24’de görüldüğü gibi modifikasyon yapılmış yüzeyde oluşan mikro çatlakların sebebi, kaplama sırasında katot ve anot arasında uygulanan bias voltajının oluşturduğu manyetik alanın meydana getirdiği yüksek iç gerilmelerdir [68].



Şekil 7.26. CrN kaplanmış silindir gömleğinin A.Ö.N.'ya yakın bölümünün çalışma sonrası SEM (Numune 7x2000)



Şekil 7.27. Normal silindir gömleğinin A.Ö.N.'ya yakın bölümünün çalışma sonrası SEM fotoğrafı. (Numune 8x2000)

Sıkıştırma zamanı sonunda yanma odasında, yanma başladığı zaman alev cephesi her zaman üniform bir şekilde yayılmaz. Yanma odasında alev cephesinin düzensiz yayılması, kısmi alev çarpışmaları ve vuruntu gibi olumsuz etkiler meydana getirmektedir. Böylece yanma odası parçaları termal gerilmelere ve termal şoklara maruz kalmaktadır. Bu yanma

olumsuzlukları, yanma odasını oluşturan parçaların düzensiz gerilmesine ve normalden daha fazla yük altında çalışmasına sebep olmaktadır. Yanma odası elemanlarından biri de silindir gömleğidir.

Silindir gömleğinin yüzey modifikasyonun değiştirilmesi, bu olumsuz etkileri kaplamanın karşılamasına neden olacaktır [54].

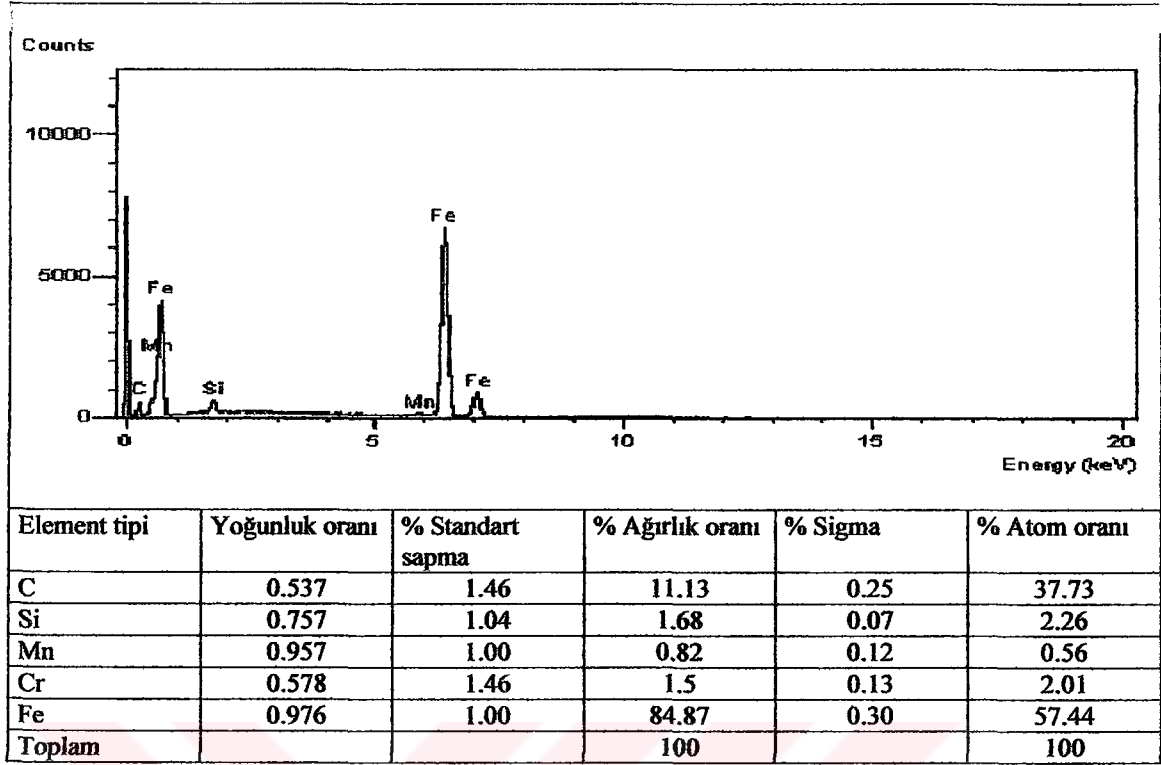
Böylece ana malzeme (substrate) zarar görmemekte ve silindir gömleğinin ömrünün artması sağlanmaktadır.

Silindirin bütün yüzeylerinde aynı oranda aşınma meydana gelmez silindirlerdeki sürtünme bilhassa yan kuvvetler denilen yönde olur. Bu da bilhassa piston pimine dik olan yüzeylerdir. Yüksek yanma basıncı, silindir üst kısmının maruz kaldığı alev cephesinin düzensiz ilerlemesi, meydana gelen termik gerilme ve şoklardan dolayı silindirlerde en fazla aşınma Ü.Ö.N. bölge civarında meydana gelir. Yapılan analizlerde silindirin Ü.Ö.N.'ya yakın bölgelerdeki yüzey pürüzlülük değerinin orta ve alt bölgelere daha yüksek olması bu görüşü desteklemektedir. Motor silindirlerinin A.Ö.N.'ya yakın bölümü ise en az aşınan kısmıdır. Bunun sebebi, bu bölgede yağlamanın iyi olması, pistonun ve dolayısıyla sekmanın Ü.Ö.N' ya göre bu bölgede daha az aşınma oluşturması ve bu bölgenin daha az sıcaklığa maruz kalması silindirlerin bu bölgede az aşınmasına neden olmaktadır. Deneyler sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinden (Tablo 7.6) bu açıkça görülmektedir.

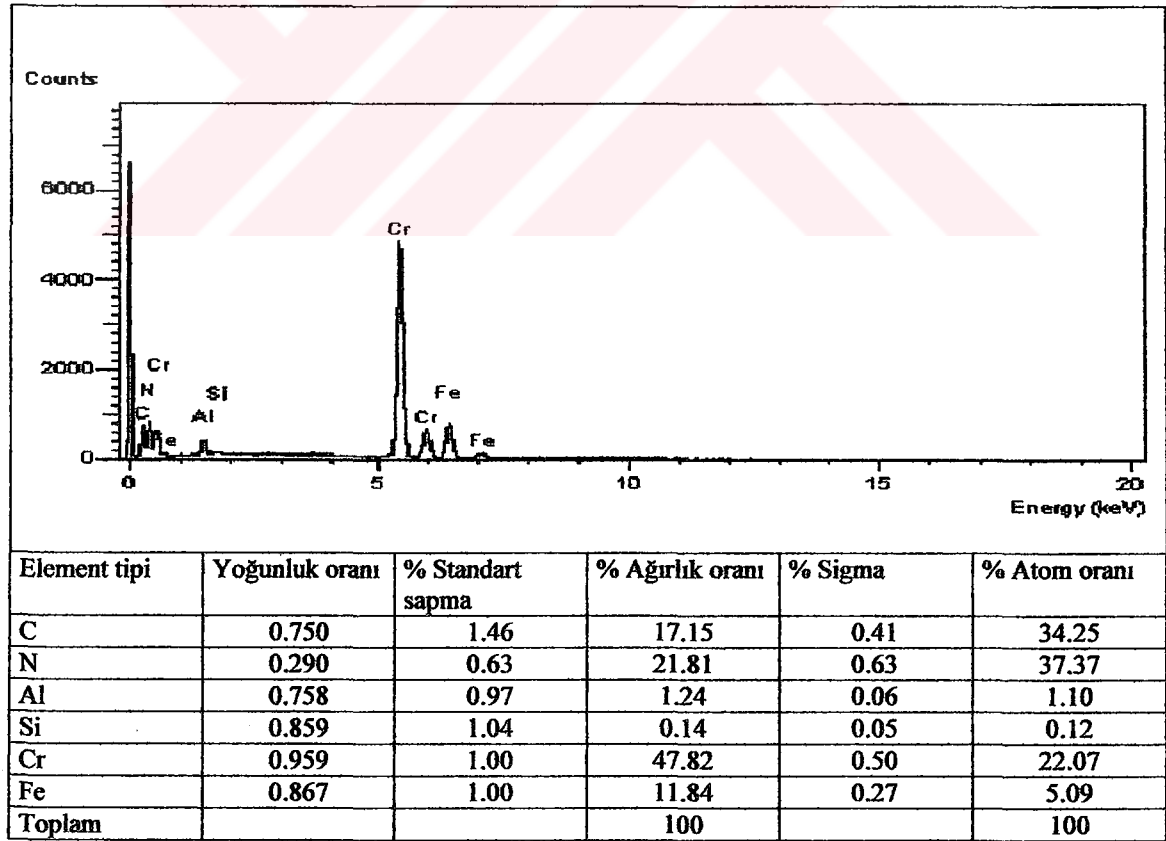
Motorlarda silindir-piston-sekman çalışma mekanizması düşünüldüğünde, birim alana düşen taşınabilecek yük kapasitesinin ne kadar önemli bir etkiye sahip olduğu ortaya çıkmaktadır. Parçaların daha fazla yük taşıma kapasitesi sayesinde motorların daha yüksek sıkıştırma oranlarında çalıştırılabileceği düşünülmektedir.

7. 5. 3. 3. EDS (Energy Dispersive Spectrograph) Sonuçları

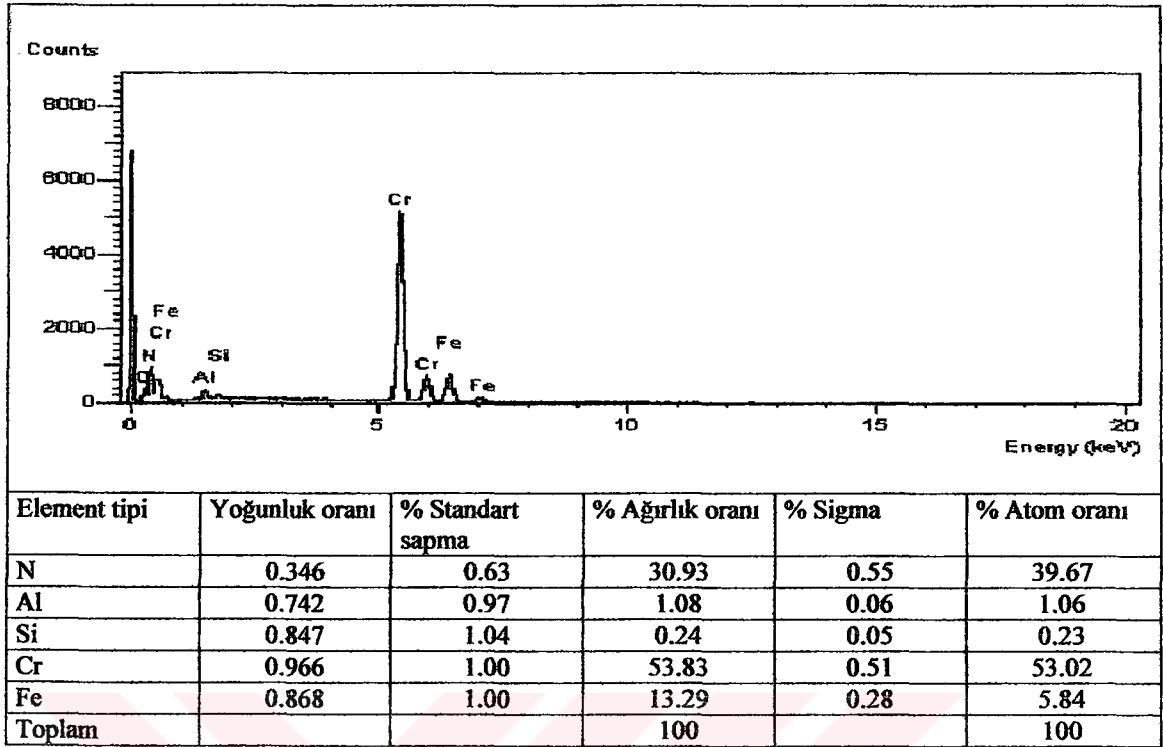
EDS, SEM'in (Scanning Electron Microscopy) bir ünitesini oluşturur ve numunelerin mikro yapısında görülen fazların noktasal analizlerini belirlemek amacıyla yapılır. Bu amaçla silindir gömleğinin karşılıklı bölgelerinden alınan numunelerin EDS (Energy Dispersive Spectrograph) analizleri yapılmıştır.



Şekil 7.28. 3 no'lu numunede matris üzerinden alınan EDS analiz sonuçları.

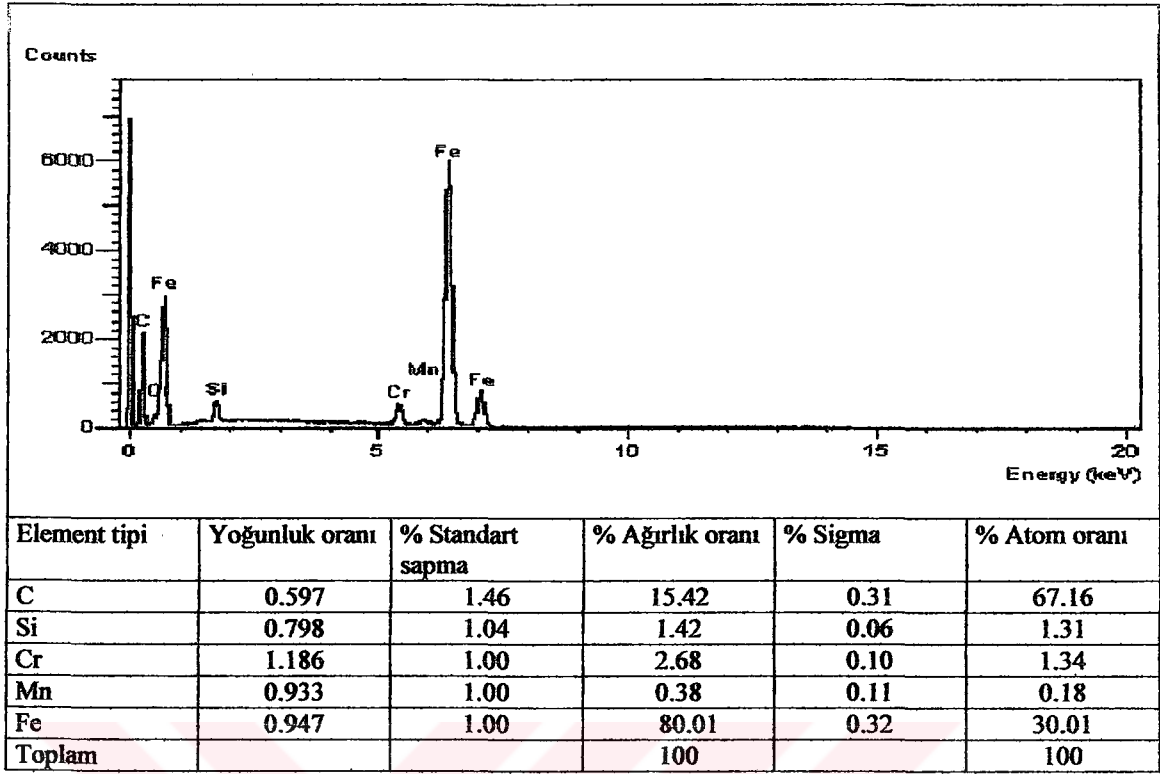


Şekil 7.29. 4 no'lu numunede matris ile modifikasyonun ara yüzeyi üzerinden alınan EDS analiz sonuçları.

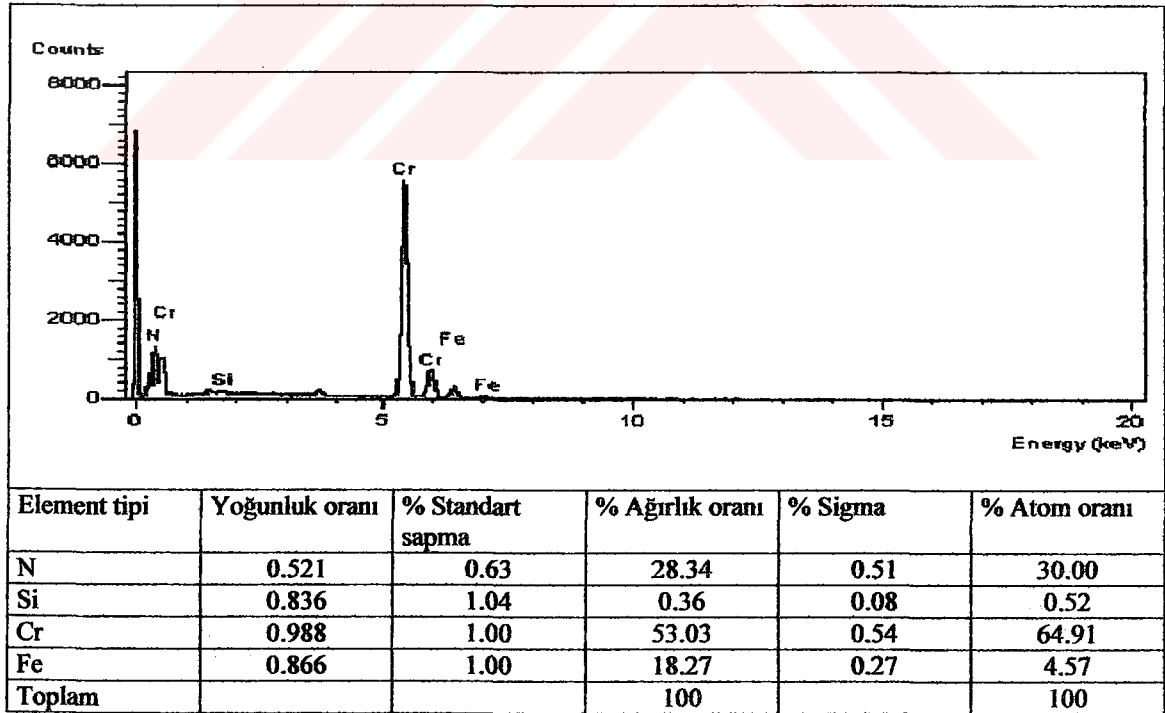


Şekil 7.30. 4 no'lu numunede modifikasyon üzerinden alınan EDS analiz sonuçları.

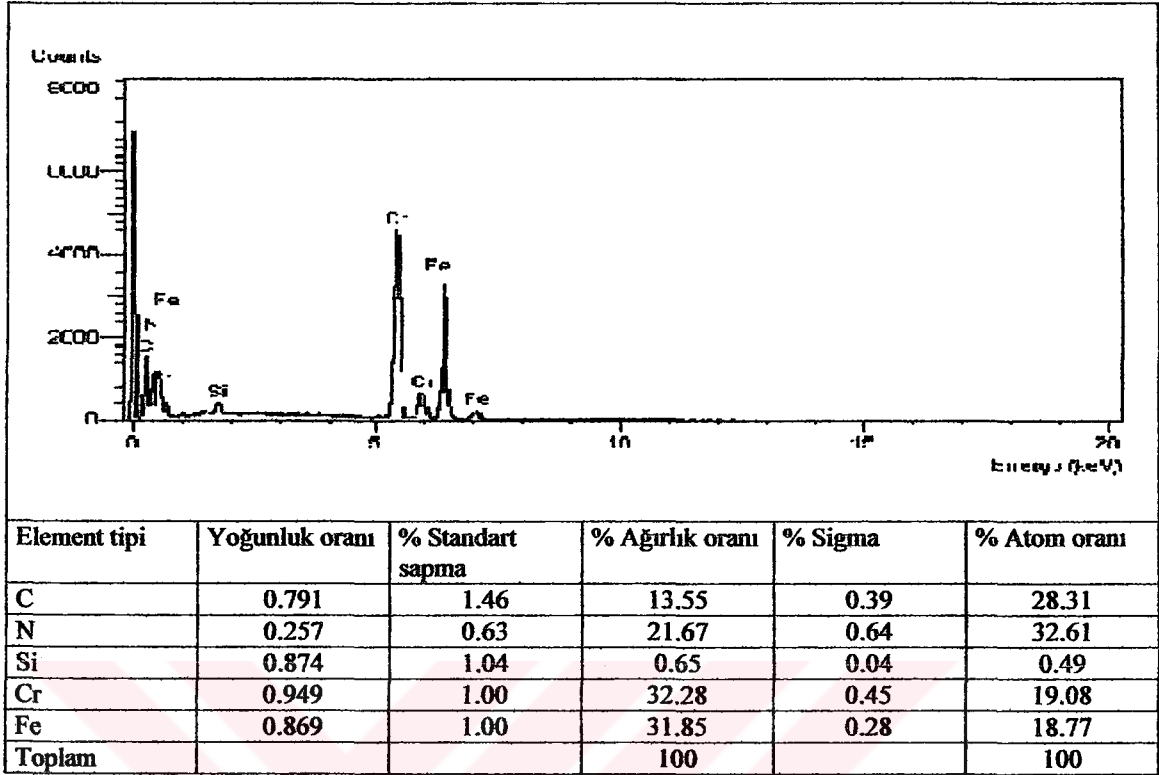
Yapılan EDS sonuçlarına göre, şekil 7.28'de görüldüğü gibi 3 no'lu numunenin elementer içeriği % olarak; C:11.13, Si: 1.68, Mn: 0.82, Cr: 1.5, Fe: 84.87 içeriğine sahipken; şekil 7.30'de 4 no'lu numunenin modifikasyon yapılmış yüzeyi üzerinden alınan analizlerde % olarak N: 30.93, Al: 1.08, Si: 0.24, Cr: 53.83, Fe: 13.92; şekil 7.28'de matris üzerinden alınan EDS sonuçlarına göre C'da bir miktar artış, Cr'da ise azalma tespit edilmiştir. C ve Cr'daki bu değişim, silindir-sekman-piston aşınma mekanizması düşünüldüğünde, piston ve sekmanın silindir içindeki hareketiyle ana (substrate) malzeme yüzeyinden grafitin taşınmasının bir sonucu olduğu düşünülebilir. Şekil 7.30'de görüldüğü gibi modifikasyon yapılan numune üzerinden alınan EDS sonuçlarına göre malzeme yapısında keskin bir değişimin olmadığı tespit edilmiştir. Ancak çok az da olsa Al transferinin gerçekleştiği, bunun da aşınma mekanizmasında piston malzemesinde bulunan Al transferinin bir sonucu olduğu söylenebilir. Bu ölçümler sonucuna göre malzeme değişiminin keskin bir düşüş yada yükselme göstermediği ve element konsantrasyonunun normal olduğu söylenebilir.



Şekil 7. 31. 5 no'lu numunede matris üzerinden alınan EDS analiz sonuçları.

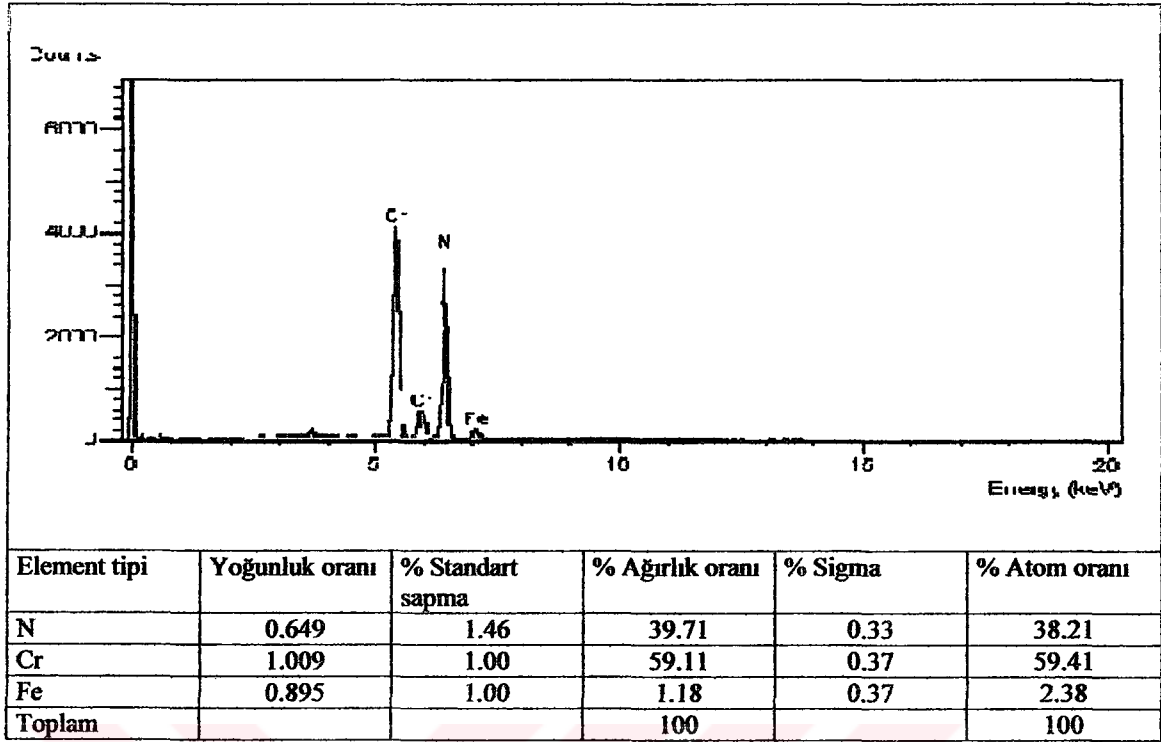


Şekil 7. 32. 6 no'lu numunede modifikasyon üzerinden alınan EDS analiz sonuçları.

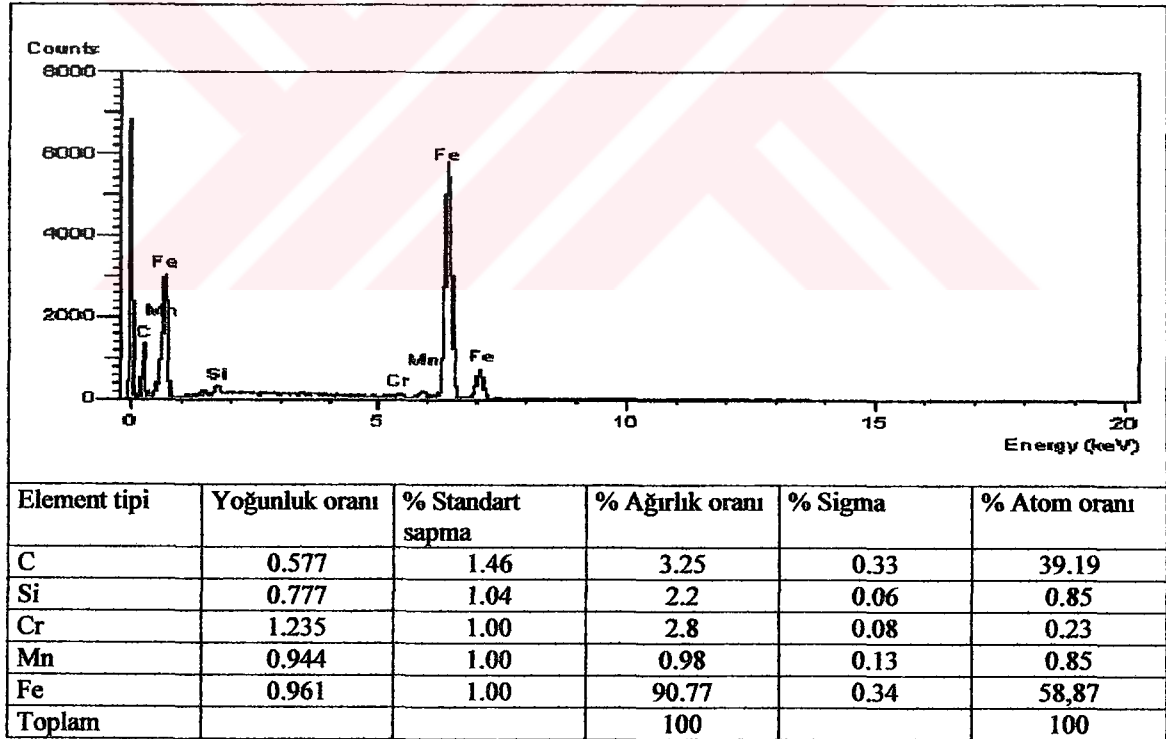


Şekil 7. 33. 6 no'lu numune ara yüzey üzerinden alınan EDS analiz sonuçları.

Lamel grafitli dökme demir silindir gömleğinin Ü.Ö.N.'ya yakın bölgesinde, matris malzemenin EDS sonuçları şekil 7.31'de görülmektedir. EDS sonuçlarına göre elementer içerik % 15.42 C, % 1.42 Si, % 2.68 Cr, % 0.38-1.01 Mn ve % 80.01 Fe olarak tespit edilmiştir. Şekil 7.35'de görüldüğü üzere referans olarak alınan 8 no'lu numuneye ait EDS sonuçları ile 5 no'lu numuneye ait EDS sonuçları karşılaştırıldığında, malzeme değişiminin keskin bir düşüş yada artma göstermediği, elementer konsantrasyonun normal olduğu tespit edilmiştir. Ancak az da olsa C'nun arttığı, Fe'in ise azaldığı görülmektedir. Bunun da aşınma mekanizmasının meydana getirdiği malzeme taşınımının bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Şekil 7.32'de görüldüğü gibi modifikasyon yapılan silindir gömleğinde % 10.34 N, % 0.36 Si, % 83.03 Cr ve % 6.28 Fe olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlerle şekil 7.34'deki referans olarak alınan EDS sonuçları kıyaslandığında silindir üzerinde sekman ve pistonun taşınması sonucu Cr ve Fe miktarında bir artış olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7. 34. 7 no'lu numunede modifikasyon üzerinden (referans) alınan EDS analiz sonuçları.



Şekil 7. 35. 8 no'lu numunede matris üzerinden (referans) alınan EDS analiz sonuçları.

CrN kaplanmış silindir gömleğinin A.Ö.N.'sına yakın bölgesinden (referans) alınan EDS sonuçları şekil 7.34'de görülmektedir. Şekil 7.34'de görüldüğü gibi modifikasyon (referans) malzemesinin EDS sonuçları; % 39.71 N, % 59.84 Cr, % 1.18 Fe iken, matris

malzemesinin aynı bölgesinde; % 3.25 C, % 2.2 Si, % 2.8 Cr, % 0.98 Mn, % 90.77 Fe elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre her iki malzemenin de elementer yapısının normal olduğu söylenebilir.

7. 5. 3. 4. X-Ray Analiz Sonuçları

CrN kaplanmış silindir gömleğinin belirli yerlerinden alınan numunelerin X-Ray analizleri yapılarak yeni oluşan fazlar belirlenmiştir. Şekil ek 1-2-3'de görüldüğü gibi bu fazlar; $Ni_{10.3} Al_{11.3} Si_{2.4} O_{32}$, $Fe_4 C_{63}$ ve Ni-Cr-Fe'dir. Oluşan bu fazların piston ve sekman malzemesinde bulunan Ni ve Al' un silindir-piston-sekman aşınma mekanizmasında çalışma esnasında silindir yüzeyine taşındığı düşünülmektedir [39,25]. Her iki numuneden elde edilen fazlar aynı olup değişmemektedir. Sadece bu numuneler üzerindeki X-Ray difraksiyon desenlerindeki fazlara ait pik şiddetleri ve yarı pik genişliklerinin değiştiği görülmüştür. Bu da malzemedeki tanelerin büyümesi veya küçülmesi ile ilişkilendirilebilir. Piston-sekman-silindir aşınma mekanizması düşünüldüğünde hem yanma hem de sürtünmeden oluşan yüksek sıcaklıktan dolayı difüzyon ile $Ni_{10.3} Al_{11.3} Si_{2.4} O_{32}$ olarak adlandırılan yeni bir fazın oluştuğu gözlenmiştir. Ayrıca EDS ile yapılan malzemenin kimyasal kompozisyonunun belirleme sonuçları ile uyushmaktadır. 4 ve 6 no'lu malzemelerin X-Ray analizlerinde N atomunun oluşturduğu bir faza rastlanmamıştır. Bununda N atomunun düzlemleriyle difraksiyon oluşturmamasından kaynaklandığı düşünülebilir. Modifikasyon yapılmamış silindir gömleği üzerinde alınan 3, 5, 12 no'lu numuneler üzerindeki X-Ray analizleri şekil ek 4,5,6'da görülmektedir. 6 no'lu referans olarak alınan numuneyle karşılaştırıldığında 3 ve 5 no'lu numunelerin X-Ray analizlerinden görüldüğü gibi Ni-Cr-Fe olarak adlandırılan bir faz oluşmuştur. Bu fazın (piston-sekman-silindir aşınma mekanizmasının bir sonucu olarak) piston ve sekman malzemesinden silindir yüzeyine taşınması sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir.

7. 5. 3. 5. Sekman ve Supaplar

CrN kaplanmış ve normal motor olarak iki aşamada yapılan deneylerde modifikasyon yapılmış motorda silindir gömleği ile birlikte sekman ve supaplarda aynı malzeme ile kaplanmıştır. Çalışma sonunda her iki motorun sekman ve supaplarının durumunu karşılaştırmak için numuneler alınarak bunların analizleri yapılmaya çalışılmıştır. Ancak sekmanın dairesel, supapların ise açılı bir yapıya sahip olması, analizlerde kullanılan yöntemlerden sağlıklı bir sonuç almayı engellemiştir. Bundan dolayı deneyler sonucunda her iki motorun sekman ve supaplarının karşılaştırılması gözle kontrol edilerek yapılmaya çalışılmıştır. Yapılan mukayeseler sonucunda her iki motorun sekman ve supaplarının görünüm olarak birbiriyle benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. CrN kaplanmış motorun normal motora göre 48

°C'ye kadar yüksek olan çalışma sıcaklığı düşünöldüğünde, sekman ve supaplarda görünüş olarak fazla bir farkın olmaması, yapılan kaplamanın sekman ve supaplar için bir koruyucu tabaka olarak düşünölebilir.



8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; dört zamanlı, hava soğutmalı, direkt püskürtmeli ve tek silindirli bir dizel motorunun silindir yüzeyi seramik bir malzeme (CrN) ile kaplanarak aşınma davranışı incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- 1) Yapılan kaplama sonucunda özgül yakıt tüketiminde yaklaşık % 2'lik bir azalma tespit edilmiştir. Bu azalmanın yapılan CrN kaplama neticesinde oluşan kısmi termal bariyer etkisiyle olduğu düşünülmektedir.
- 2) Silindir yüzeyinin CrN ile kaplanması, bu malzemeler üzerinde kısmi bir termal bariyer etkisi oluşturmaktadır. Yanma esnasında soğutmaya giden ısıнын büyük bir kısmı silindir üzerinden sağlanmaktadır. Silindirin kaplanmış olması, bu transfer edilen ısıнын bir miktar azalmasını sağlamaktadır [2,4,5,7,52]. Bu da yanma odası sıcaklığını arttırarak yanmamış hidrokarbonların daha fazla oksijenle reaksiyona girmesini sağlamakta, böylece yanma sonu sıcaklığı artmaktadır. Yüzey modifikasyonu yapılmış motorun egzoz gaz sıcaklığının normal motora göre 48 °C'ye kadar daha yüksek olması, kaplama elemanının ısı geçişine karşı kısmi termal bariyer etkisi yapmasının bir sonucudur.
- 3) Silindiri kaplanmış motorda CO konsantrasyonu daha düşük çıkmıştır. Yanma odası sıcaklığının CO oluşumu üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır.
- 4) Motorlardaki NO_x konsantrasyonu üzerinde; ortamdaki N₂ ve O₂ miktarları, ortam ve yanma sıcaklığının 1800 °K'nin üzerinde kalma süresi etkilidir. Normal motor ile yüzey modifikasyonu yapılmış motorun NO_x konsantrasyon değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Ancak her iki motorun NO_x konsantrasyonuna bakıldığında, düşük devirden orta devire kadar NO_x konsantrasyonun azaldığı, orta ve yüksek devirlerde bu oluşumun düşük olduğu görülmüştür. Bu da yapılan kaplamanın çok ince olmasının NO_x konsantrasyonu üzerinde fazla bir etkiye sahip olmadığını göstermiştir.
- 5) Modifikasyon yapılmış motorda yanma sonu sıcaklığının artması ve birim yakıttan daha fazla verim elde edilmesiyle efektif gücün az da olsa yükseldiği görülmüştür.
- 6) Motorun çalışması esnasında sekman ile silindir gömleği arasındaki yağ filminin zaman zaman yırtılması, silindir aşınması üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. SEM fotoğraflarına göre CrN kaplı silindir gömleği üzerinde ciddi bir aşınma izinin olmadığı görülmüştür. Ancak lamel grafitli dökme demir silindir gömleğinde; serbest yüzey kırıkları, mikro çatlaklar ve derin aşınma izleri açık bir şekilde görülmektedir.
- 7) Aşınma açısından hidrodinamik yağlama çok önemlidir. Lamel grafitli dökme demir silindir gömleğinin CrN kaplanmış silindir gömleğine göre yüzeyinin daha pürüzlü

olması, oluşturulan yağ filminin yırtılmasını hızlandırmaktadır. Ancak CrN kaplı silindirin yüzey pürüzlülüğünün daha düşük olmasıyla bu olumsuz etkinin ortadan kalktığı, böylece hidrodinamik yağlama rejiminin daha uzun ömürlü olduğu düşünülmektedir.

- 8) Silindirlerin aynı bölgelerinden alınan numunelerden CrN modifikasyonu yapılmış silindir gömleğinin yüzey sertliğinin yüksek, pürüzlülüğünün düşük olmasından dolayı herhangi bir yüzey kırılmasının ve plastik deformasyonun olmadığı görülmüştür. Bunun aksine normal silindir olarak adlandırdığımız lamel grafitli dökme demir silindirde bu olumsuz etkiler SEM fotoğraflarında net olarak görülmüştür.
- 9) Silindir-sekman-piston çalışma mekanizmasında normal olarak silindirde aşınma sırasında oluşan aşınma ürünlerinin tamamı kartere taşınmamaktadır. Bu aşınma partikülleri silindirlerde abrasiv aşınmayı hızlandırmaktadır. Yüzey modifikasyonu yapılmış silindir gömleğinin yüzey sertliğinin yüksek olması, kopan partikül sayısını azaltmaktadır SEM fotoğraflarında bu partiküllerin oluşturduğu herhangi bir olumsuz etkiye rastlanmamıştır.
- 10) Dizel motorları yanma odasında düzensiz termal şok ve termal gerilmeler meydana gelir. Bu da yanma odası elemanlarından olan silindir yüzeyi üzerinde kopma ve yırtılmalara neden olmaktadır. CrN kaplanmış silindir gömleğinin Ü.Ö.N' sına yakın bölgesinden alınan numunelerin analiz sonuçlarına göre bu parçalar üzerinde termal şok ve termal gerilme neticesi oluşan herhangi ciddi bir hasara rastlanmamıştır. Ancak lamel grafitli dökme demir silindir gömleğinin aynı bölgesinden alınan numunelerin analiz sonuçlarına göre ise, bu yüzeyler üzerinde bu hasarların meydana geldiği tespit edilmiştir.
- 11) Silindir-piston-sekmanın oluşturduğu aşınma mekanizması düşünüldüğünde, silindir yüzeyinin pürüzlülük değeri sadece silindir üzerindeki aşınmayı arttırmaz, aynı zamanda karşıt malzemeler olan piston ve sekman üzerinde de aşınmanın artmasına neden olur. CrN kaplanmış silindir yüzeyinin pürüzlülük değerinin düşük olması, karşıt malzemeler olan piston ve sekmanın aşınması üzerinde azaltıcı bir faktör olarak düşünülebilir.
- 12) Yapılan yüzey modifikasyonun çalışma esnasında olumsuz etkileri üzerine almasıyla matris malzemenin (substrate) herhangi bir hasar görmesinin önüne geçilmiştir. Böylece silindir gömleğinin daha uzun ömürlü olması sağlanmıştır.
- 13) Yapılan CrN modifikasyonu ile silindir gömleğinin mikroyapı, sertlik ve yüzey pürüzlülük değerlerinin iyileştiği, silindir gömleğinin aşınmasının lamel grafitli dökme demir silindire göre yok denecek kadar az olduğu sonucuna varılmıştır.

- 14) Her iki motorun sekman ve supaplarının gözle kontrolünde, fazla bir farkın olmadığı görülmüştür. CrN kaplanmış motorun normal motora göre daha yüksek çalışma sıcaklığında çalıştığı dikkate alınırsa yapılan kaplamanın koruyucu bir bariyer etkisi yaptığı düşünülebilir.

Bunun haricinde; bu kaplama yöntemiyle bütün yanma odası elemanlarının kaplanması motor performansı ile mikro yapı açısından incelemeye değer olduğu, kaplama kalınlığının ve seramik malzemenin değiştirilebileceği ve seramik kaplama malzemesinin bu amaçla kullanılabileceği düşünülmektedir. Ancak sadece silindir gömleğinin kaplama kalınlığının artırılması, termal bariyer etkisini de arttıracaktır. Bu durumda yanma odasının diğer elemanlarının sıcaklıklarındaki artış, bunların yapıldığı malzemelerin termik stabilitelerini koruduğu sıcaklığın üzerine çıkabilir. Bu durumda motorun soğutma sistemi yeniden düzenlenmelidir. Yanma odasının diğer elemanlarının da kaplanması halinde motorun daha yüksek sıcaklıklarda çalıştırılabileceği, seramik kaplanmış ve kaplanmamış motorlarda yanma odası sıcaklığının ölçülmesinin ısı dağılımı bilançosu açısından fikir teşkil edebileceği, piston yanma odasının kaplanması motor yanma sıcaklığını arttırması, böylelikle motor performansı ve aşınma açısından değerlendirilebileceği, soğutma sistemi veya hava debisinin değiştirilerek motor performansı açısından etkilerinin incelenebileceği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Çelik, B. ve Balcı, M., 1999, Buji Ateşlemeli Bir Motorun Sıkıştırma Oranının Değişken Hale Dönüştürülmesi ve Kısmi Yüklerde Performansa Etkisinin Araştırılması, 6th International Combustion Symposium, No.6, 323-325.
2. Hocking, M. and Vasatasree, V., 1989, Metallic and Ceramic Coatings, Production High Temperature and Applications, 24-26.
3. Wacker, E. and Sonder, W., 1982, Piston Design for High Combustion Pressures and Reduced Heat Rejected Heat Rejection to Coolant, SAE, International Congress, 5-6.
4. Hejwowski, T. and Weronki, 2002, The Effect of Thermal Barrier Coatings on Diesel Engine Performance , Vacuum, No. 65, 427-432.
5. Yaşar, H., 1997, Termal Bariyer Kaplamanın Turbodoldurmalı Bir Dizel Motorunun Performansına Etkileri, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2,6.
6. Reddy, C. and Domingo, N. 1990, Low Heat Rejection Engine Research Status, SAE Paper, 63.
7. Kamu, R. and Bryzik, W., 1984, Commins/Tacom Advanced Adiabatic Engine, SAE International Congress, 23-25.
8. Leising, C. and Purchit, G., 1978, Waste Heat Recovery in Truck Engine, SAE National West Coast Meeting, 78.
9. William, F., 2000, Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, Universty of Central Florida, 549, 575.
10. Onaran, K., 1992, Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 348,349,355.
11. Evans, G. and A., J., 1982, Ceramic Soc, No.65,127.
12. Geçkinli, E. A., 1992, İleri Teknoloji Malzemeleri, İ.T.Ü. Yayınevi, No. 1453.
13. Woods, M. E. and Oda, I., 1982, PSZ Ceramic for Adiabatic Engine Components, SAE International Congress.
14. Gerhold, E. A., 1964, Hard Facing with Plasma Spray Gungs, Welding Journal, 60-70.
15. Pamuk, U., 1996, Plazma Spreylenmiş Cr_3C_2 -NiCr ve Al_2O_3 -TiO₂ Kaplamaların Abrasiv Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 8.
16. Lutz, E. H., 1993, Plasma Ceramics, Powder Metallurgy International, No. 25, 131-137.
17. Bhushan, B. and Gupta, B. K., 1991, Handbook of Tribology, Mc. Graw- Hill, 87.
18. Üçışık, A. H. Avcı, E., Zeytin, S. ve Vural, M., 1991, Metallerin Seramik Kaplanması ve Metalografik İncelenmesi, Tübitak-Mam, Malzeme Bölümü Raporu.

19. Hocking, M. G. Vasatasree, V., and Sıdky, P. S., 1989, *Metallic and Ceramic Coatings, Production High Temperature and Applications*.
20. Akkurt, M., 1982, *Makine Elemanları, İ.T.Ü. Maçka Makine Fakültesi, İkinci Cilt, 1*.
21. Staudt, W., 1995, *Motorculukta Metal Tekniği, Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları, 12*.
22. Akalın, Ö., *Motorlarda Plazma Sprey Kaplı Silindirin Tribolojik Özellikleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, 1-6*.
23. Gahlin, R. Larsson, M. and Hedenqvist, P., 2001, *ME-C:H Coatings In Motor Vehicles, Wear, No. 249, 302-309*.
24. Qiu, X. Hamdi, A. Elmoursi, A. and Malaczynski, G., 1996, *Development of Bench Test Methods for the Evaluation of Ion-Implanted Materials: Piston/Bore Application, Surface and Coatings Technology, No. 88, 190-196*.
25. Wang, Y. Tung, S.C., 1999, *Scuffing and Wear Behavior of Aluminium Piston Skirt Coatings Against Aluminium Cylinder Bore, Wear, No. 225-229, 1100-1108*.
26. Pekin, Ş., Vuorisiti, P. ve Mantyla, T., 1993, *System Approach for Rezinstant Coatings. Workshop on Anti-Wear Coatings, Tübitak-Mam, Kocaeli*.
27. Kragesky, I. V., and Demkin, N. B., 1960, *Contact Area of Rough Surfaces. Wear, 3, 170-187*.
28. Çimenoglu, H. ve Kayalı, E. S., 1991, *Kobalt Esaslı Alaşımların Aşınma Özellikleri. 4. Denizli Malzeme Sempozyumu. 571-579*.
29. Kosel, T., 1992, *Hard Chromium Plating, ASM Handbook, No.5, USA*.
30. Fiedrich, C., and Berg, G., 1997, *PVD Cr_xN Coatings for Tribology Application on Piston Rings, Surface and Coatings Technology, No. 97, 661-668*.
31. Juanshang, J. and Barbezat, G., 1992, *The Tribological Behavior of Various Plasma-Sprayed Coatings Against Cast Iron, Surface and Coatings Technology, No. 52, 169-178*.
32. Kvernes, I. and Fortum, P., 1978, *Use of Corrosion-Resistant Plasma-Sprayed Coatings in Diesel Engines, Thin Solid Film, No. 5, 259-269*.
33. Godfrey, D., 1983, *The Use of Ceramics for Engines, Materials and Design, No. 4, 759-765*.
34. Tovell, J., 1984, *Ceramics and the Reciprocating Internal Combustion Engine, Materials and Design, No. 5, 215-220*.
35. Levy, A. and Macadam, S., 1987, *The behavior of Ceramic Thermal Barrier Coatings on Diesel Engine Combustion Zone Components, Surface and Coatings Technology, No. 30, 51-61*.

36. Gadow, R and Scherer, R. , 2002, Composite Coatings with Dry Lubrication Ability on Light Metal Substrate, Surface and Coatings Technology, No. 151, 471-477.
37. Jehn, H., 1999, PVD and ECD-Competition, Alternative or Combination, Surface and Coatings Technology, No. 112, 210-216.
38. Wang, Y. and Brogan, K., 2001, Wear and scuffing characteristics of composite polymer and nickel / ceramic composite coated piston skirt against aluminum and cast iron cylinder, Wear, No. 250, 706-717.
39. Hwang, Byoungchul and Lee, S., 2002, Effect of Oxides on Wear Resistance and Surface Roughness of Ferrous Coated Layers Fabricated by Atmospheric Plasma Spraying, Materials Science and Engineering, No. A000, 1-13.
40. Jehn, H. A., 2000, Improvement of the Corrosion Resistance of PVD Hard Coating-Substrate System Surface and Coatings Technology, No. 125, 212-217.
41. Liu, C. Leyland, A. Bi, Q. and Matthews, A., Corrosion Resistance of Multi-Layered Plasma-Assisted Physical Vapour Deposition TiN and CrN Coatings, Surface and Coatings Technology, No. 141, 164-173.
42. Yalçın, B. ve Özsoy, A., 2003, Tornalama Kesici Takımlarda Aşınma Davranışının İyileştirilmesi, S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, No. 7-1, 52-57.
43. Nordin, M. Larsson, M. and Hogmark, S., Mechanical and Tribological Properties of Multilayered PVD TiN/CrN, Wear, No. 232, 221-225.
44. Su, Y. L. Yae, S. H. Leu, Z. L., Wei, C. S., and Wu, C. T., Comparasion of Tribological Behavior of Three Films- TiN, TiCN and CrN Grown by Physical Vapour Deposition, Wear, No. 213, 165-174.
45. Benea, L. Bonora, P. L.. Borella, A. and Martelli, S., 2002, Wear Corrosion Properties of Nano-Structured SiC , Nicel Composite Coatings Obtained by Eletroplating, Wear, No 249, 995-1003.
46. Han, S. Lin, J.Hu. Tsai, S. H. Chung, S. C. Wang, D. Y. Lu, F. H.,and Shih, H. C., 2000, Corrosion and Tribological Studies of Chromium Nitride Coated on Steel with an Interlayer of Electroplated Chromium, Surface and Coatings Technology, No. 133-134, 460-465.
47. Liu,C. Bi, Q. and Matthesw, A., 2001 Eis Comparison on Corrosion Performance of PVD TiN and CrN Coated Mild Steel in 0.5 N NaCl Aqueous Solution, Corrosion Science, No. 43, 1953-1961.
48. Pamuk, U. ve Çimenoglu, H., 1999, Plazma Spreylemiş (Seramik) $Al_2O_3-TiO_2$ ve (Sermet) Cr_3C_2-NiCr Kaplamalarda Spreyleme Esnasında Meydana Gelen Yapısal Değişmelerin İncelenmesi, 6th International Combustion Symposium, No.6, 501-506.

49. Sasaki, T and Koga, N, 2000, An Experimental Study on Ejection Forces of Injection Molding, Precision Engineering, No. 24, 270-273.
50. Karaman, İ. ve Yurt, Ö., 1997, İçten yanmalı Motorlar ve Gaz Türbinleri, Milli Eğitim Basımevi, 196,197.
51. Borat, O. Balcı, M., ve Sürmen, A., İçten Yanmalı Motorlar, Teknik Eğitim Vakfı Yayınları, 260.
52. Sudhakar, V., 1984, Performance Analysis of Adiabatic Engine, SAE International Congress and Exposition,54.
53. Miyairi, Y. Matsuhisa., T. and Ozawq, T., 1989, Selective Heat Insulation of Combustion Chamber Wall for a DI Diesel Engine with Manolithic Ceramics, SAE Paper, 89.
54. Havstad, P. H. Gervin, I. J. and Wade, W. R., 1986, A Ceramic Insert Uncooled Diesel Engine, SAE Paper, 68.
55. Sieglä, C. S. and Aman, C. A., 1984, Exploratory Study of the Low-Heat-Rejection Diesel for Passenger-Car Applications, SAE International Congress and Exposition, Detroit, 75.
56. Stone, R., 1989, Motor Vehicle Fuel Economy, Macmillan Education Ltd. 78.
57. Bryzik, W. and Kamu, R., 1983, Takum/Cummings Adiabatic Engine Program, SAE International Congress, 135.
58. Voevoding., A. and Yerokhin, A., 1992, Development and Testing of Multilayer Physically Vapour Deposited Coatings For Piston Rings, Surface and Coatings Technology, No. 52, 145-151.
59. Prasad, R. and Samria, N., 1990, Heat Transfer and Stres Fields in the Inlet and Exhaust Valves of a Semi-Adiabatic Diesel Engine, No. 34, 765-777.
60. Rastegar, F., and Craft, A., 1993, Piston Ring Coatings for High Horsepower Diesel Engines, Surface and Coatings Technology, No. 61, 36-42.
61. Venkatesh, S., Surface Treatments for Pistons and Their Effect on Engine Performance, Wear, No. 25, 65-71.
62. Parlak, A. Yaşar, H. ve Gören, R., 2001, İçten Yanmalı Dizel Motorlarında Seramik Kaplama Kusurları ve İyileştirme Yöntemleri, Makine ve Metal, No. 117.
63. Yaşar, H. Büyükkaya, E., Fidil, A., 2000, Termal Bariyer Kaplamanın Turbodoldurmalı Bir Dizel Motorunun Egzoz Gaz Ekserjisi Akışına Etkisi, 12. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği ve Kongresi, 310-391.
64. Büyükkaya, E. Yaşar, H. Çelik, V., ve Ekmekçi, İ., 1998, Termal Bariyer Kaplamanın Turbodoldurmalı Bir Dizel Motorunun Egzoz Emisyonlarına Etkileri, 469-481.

65. Parlak, A. ve Yaşar, H., 1999, Düşük Isı Kayıplı (DİK) Dizel Motorlarında Yapılan Çalışmaların Performans Açısından Değerlendirilmesi, 6th International Combustion Symposium, 299-312.
66. Kamu, R., and Bryzik, W., 1978, Adiabatic Turbo-Compound Engine Performance Prediction, SAE Paper, 145.
67. Nilsson, L. and Ohlsson, R., 2001, Accuracy of Replica Materials when Measuring Engineering Surface, Machine Tools and Manufacture, No.41, 2139-2145.
68. Bozyazı, E. E., 2002, Elektrolitik Sert Krom ile Katodik Ark Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemiyle Krom Nitrür Kaplamaların Yağlı Ortam Aşınma Davranışlarının Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 38.
69. Ercan, A. ve Güven, R., 1999, Orta devirli gemi dizel motorlarında NO_x emisyonunun azaltılması, 6th International Combustion Symposium, 377-387.
70. Altın, R. ve Yücesu, H. S., 1999, Mısır Yağının Alternatif Yakıt Olarak Dizel Motorlarında Kullanımının Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkilerinin Deneysel İncelenmesi, 6th International Combustion Symposium, 409-422.
71. Öner, C., 2000, Bir Benzinli Motorda L.P.G.'nin Yakıt Olarak Kullanılması ve Egzoz Gazı Emisyonlarının Deneysel İncelenmesi, V. Ulusal Yanma Sempozyumu, Yanma ve Hava Kirliliği Bildiriler Kitabı, 228-239.
72. Borat, O., 1983, Yanma stokiometrisi, İ.T.Ü. Makine Fakültesi.
73. Lyubimov, V. Voevodin, A. A. Yerokhin, A. L. and Timofeev, Y. S., 1992 Development and Testing of Multilayer Physically Vapour Deposited Coatings to Piston Rings, Surface and Coatings Technology, 52, 145-151.
74. Büyükkaya, E. Yaşar, H., Çelik, V., 1998, Termal bariyer kaplamanın turbodoldurmalı bir dizel motorunun egzoz emisyonlarına etkileri, 5. Yanma Sempozyumu, 469-481.
75. Lee, S. C. Ho, W. Y. and Lai, F. D., 1996, Effect of Substrate Surface Roughness on the Characteristics of CrN Hard Film, Materials Chemical and Physical, No. 43, 266-273.
76. Joseph, H. T. and Oregon, A., 1992, Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM, No. 18

ÖZGEÇMİŞ

6 Haziran 1973 tarihinde Elazığ'da doğdum. İlk, orta ve lise öğrenimimi Elazığ Merkez Anadolu Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesi Motor Bölümünde tamamladım. 1997 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Öğretmenliği Bölümünden mezun oldum. 1998 yılında Erzurum Anadolu Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesinde Motor öğretmeni olarak göreve başladım. 1999 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünde Yüksek Lisans programını tamamladım. Halen Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi bölümünde doktora eğitimime ve Elazığ Merkez Anadolu Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesinde Motor öğretmenliği görevime devam etmekteyim.



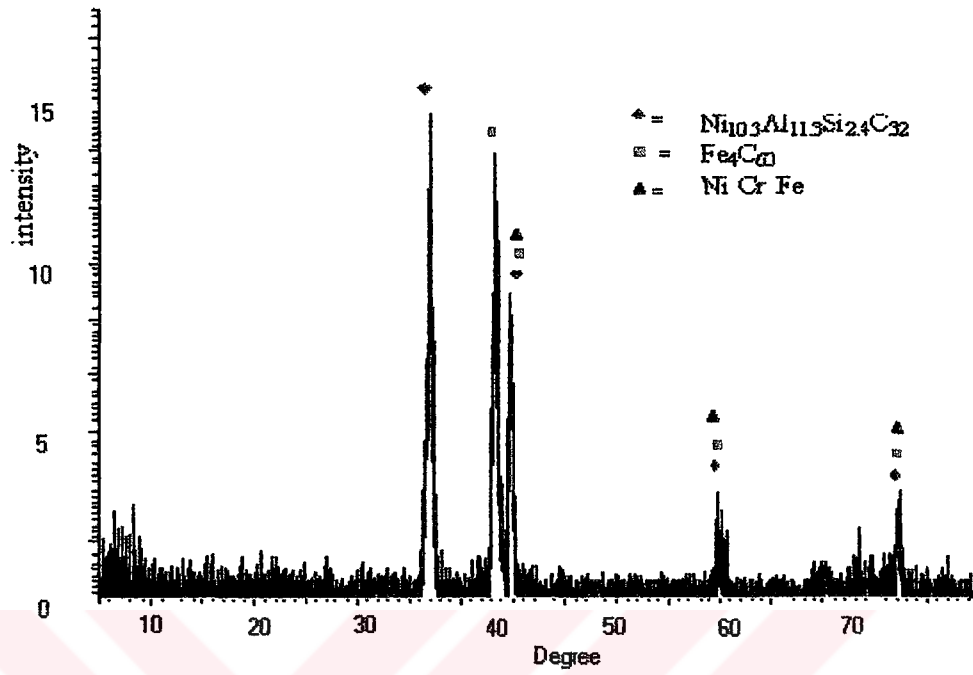
EK 1**Tablo 1. Deneyler sonucunda kaplanmış motorda elde edilen sonuçlar.**

Kaplanmış motor					
	1800 d/dk (n)	2100 d/dk (n)	2400 d/dk (n)	2700 d/dk (n)	3000 d/dk (n)
Özgül yakıt tüketimi (g/kwh)	252,8	245,17	250	260,02	280
Yağ sıcaklığı (°C)	56	61	65	69	72
Egzoz sıcaklığı (°C)	177	217	294	330	430
Karbonmonoksit (CO, ppm)	195	461	226	1096	1450
Karbondioksit (CO ₂ , %)	1,8	2,5	2,4	3,1	2,9
Oksijen (O ₂ , %)	19,5	17,5	17,6	16,6	17,1
Hava fazlalık katsayısı (AFR)	6,50	6,12	6,37	4,93	5,46
Yakıt tüketimi (g/dk)	8,2	10,01	15,45	18,96	26,83
Yakıt tüketimi (kg/h)	0,492	0,600	0,927	1,137	1,609
Azotoksit (NO _x , ppm)	612	747	653	555	315
Md (Nm)	7,87	8,75	12,37	12,05	13,25
Pe (kw)	1,35	1,92	3,10	3,50	4,16

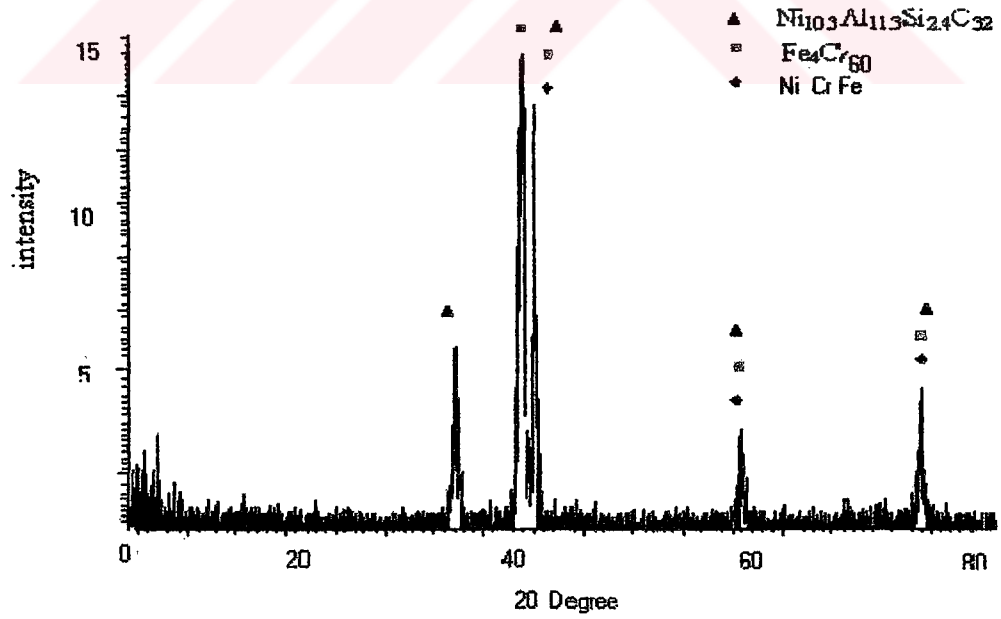
Tablo 2. Deneyler sonucunda normal motorda elde edilen sonuçlar.

Normal motor					
	1800 d/dk (n)	2100 d/dk (n)	2400 d/dk (n)	2700 d/dk (n)	3000 d/dk (n)
Özgöl yakıt tüketimi (g/kwh)	243	248,54	251,79	302,79	265,54
Yağ sıcaklığı (°C)	55	62	64	67	71
Egzoz sıcaklığı (°C)	160	195	226	282	410
Karbon monoksit (CO, ppm)	298	472	240	1113	1555
Karbondioksit (CO ₂ , %)	1,7	2,2	2,3	3,0	2,8
Oksijen (O ₂ , %)	-	-	-	-	-
Hava fazlalık katsayısı (AFR)	6,40	6,11	6,34	4,89	5,50
Yakıt tüketimi (g/dk)	8,3	10,3	13,16	18,99	22,57
Yakıt tüketimi (kg/h)	0,498	0,618	0,789	1,139	1,354
Azot oksit (NOx, ppm)	610	743	651	552	314
Md (Nm)	8,75	9,05	10	10,25	13
Pe (kw)	1,64	1,99	2,51	2,89	4,08

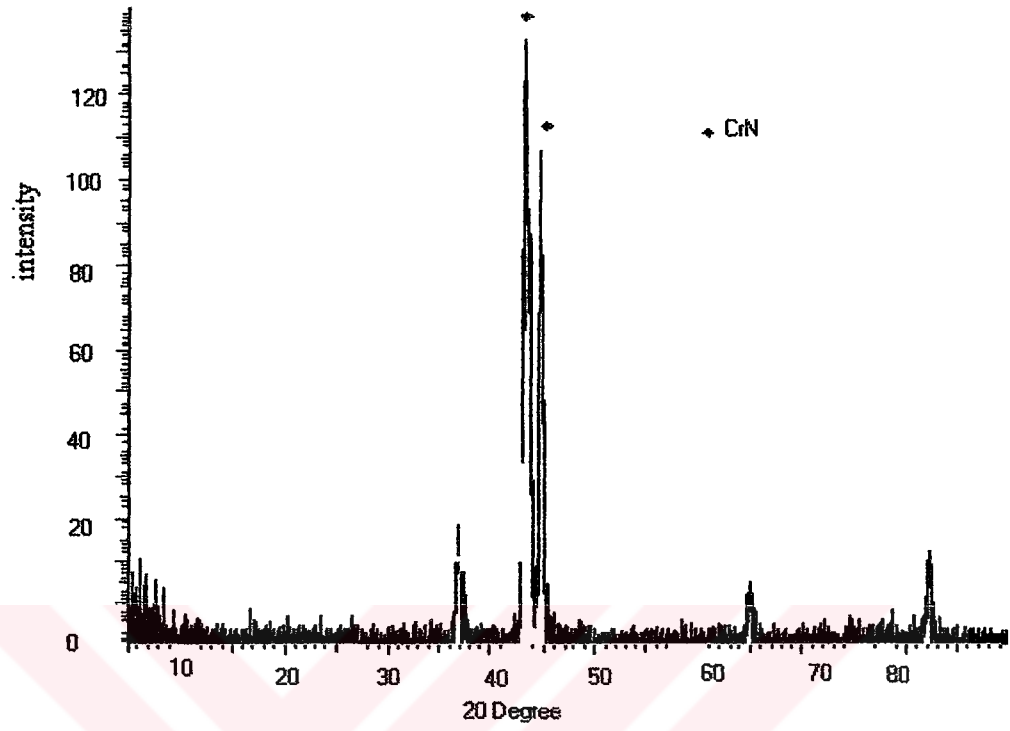
EK 2 – Numunelere Ait X-Ray Analizleri



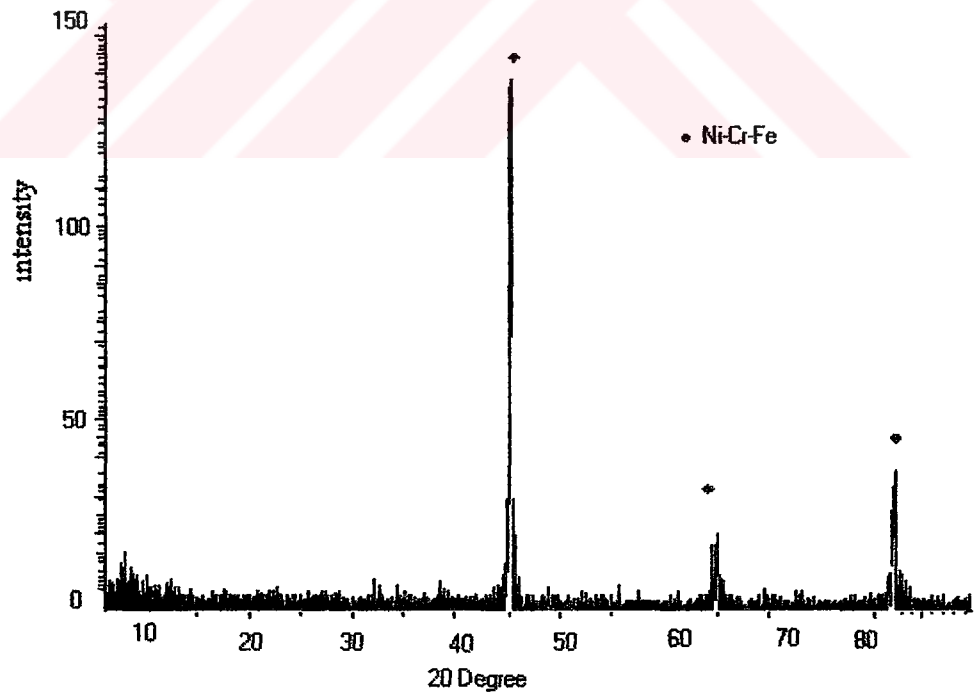
Şekil 1. 6 no'lu numuneye ait X- ışınları difraksiyonu.



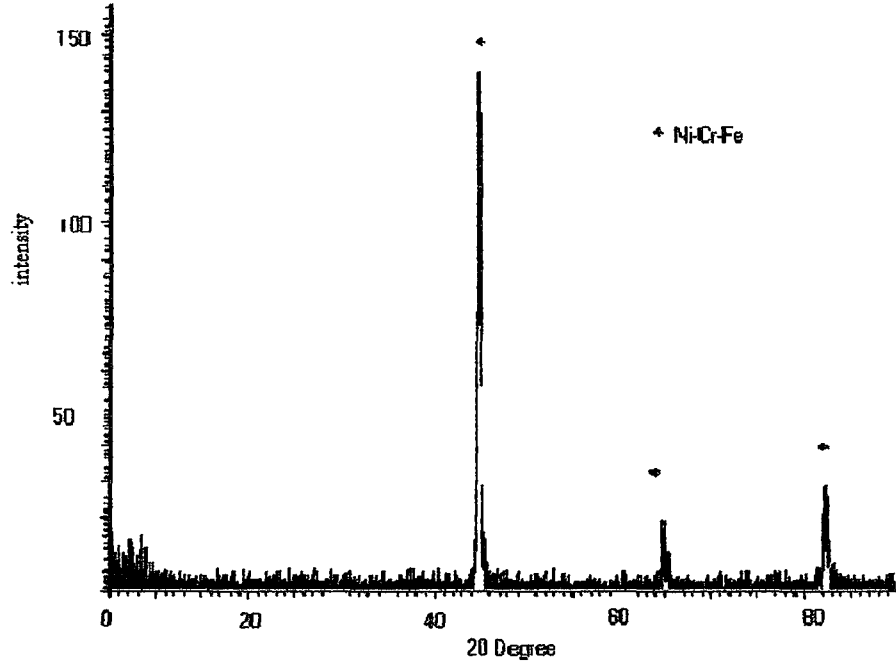
Şekil 2. 4 no'lu numuneye ait X- ışınları difraksiyonu.



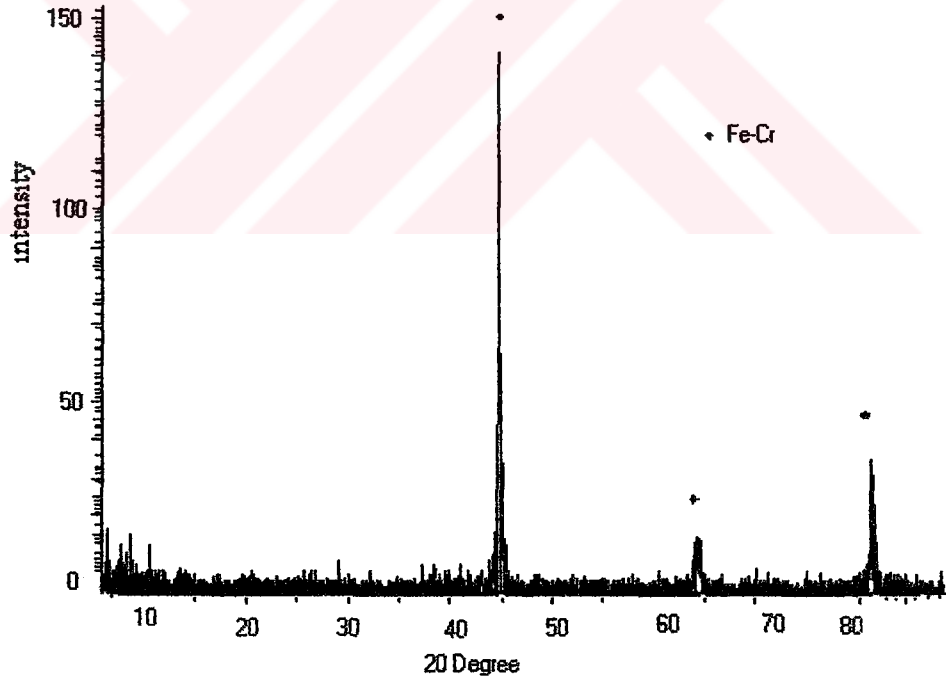
Şekil 3. 7 no'lu numuneye ait X- ışınları difraksiyonu.



Şekil 4. 5 no'lu numuneye ait X- ışınları difraksiyonu.



Şekil 5. 3 no'lu numuneye ait X- ışınları difraksiyonu.



Şekil 6. 14 no'lu numuneye ait X- ışınları difraksiyonu.