

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İÇTEN YANMALI MOTORLARDA MEYDANA GELEN  
AŞINMA MEKANİZMALARI ve ÖRNEK  
MOTORLARDAKİ PİSTON, SEGMAN ve SİLİNDİR  
YÜZEYLERİNDE OLUŞAN AŞINMALARIN  
MİKROSKOBİK OLARAK İNCELENMESİ**

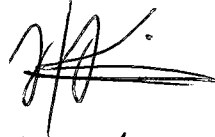
139742


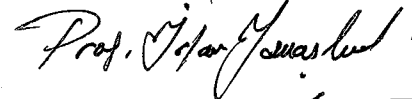
Makine Müh. Serden MÜJDECI

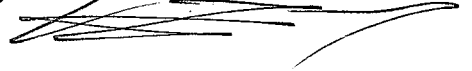
FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Makineleri Programında  
Hazırlanan

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Hakan KALELİ



Dr. Cemalettin Yaman  Prof. Tamer Yavaşlı 



İSTANBUL, 2003

**Y.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
GÖRÜMLÜLÜK BİRİMİ**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ.....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Araştırması.....	2
2. YAĞLAMA VE YAĞLAMA REJİMLERİ.....	4
2.1 Yağlama.....	4
2.2 Yağlama Rejimleri.....	6
2.2.1 Hidrodinamik Yağlama.....	7
2.2.2 Elastohidrodinamik Yağlama.....	8
2.2.3 Karışık Yağlama.....	8
2.2.4 Sınır Yağlama.....	8
3. AŞINMA MEKANİZMALARI.....	9
3.1 Abrasyon Aşınması.....	14
3.1.1 İçten Yanmalı Motorlarda Abrasyon Aşınması.....	16
3.2 Adhezyon Aşınması.....	18
3.2.1 İçten Yanmalı Motorlarda Adhezyon Aşınması.....	20
3.3 Titreşim (Fretting) Aşınması.....	27
3.4 Korozyon Aşınması.....	28
3.4.1 İçten Yanmalı Motorlarda Korozyon Aşınması.....	29
3.5 Yorulma Aşınması.....	32
3.5.1 İçten Yanmalı Motorlarda Yorulma Aşınması.....	33
4. MOTOR ÇALIŞMA KOŞULLARININ AŞINMAYA ETKİSİ.....	36
4.1 Motor Gücü ve Ortalama Efektif Basınç.....	36
4.2 Anormal Yanma.....	37
4.3 Sıkıştırma Oranı.....	38
4.4 Sıcaklık.....	39
4.5 Devir Sayısı.....	40
4.6 Hava Fazlalık Katsayısı.....	41
4.7 Motor İlk Hareketi.....	42
4.8 Egzoz Gazlarının Resirkülasyonu.....	44
5. PİSTON, SEGMAN VE SİLİNDİR MALZEMELERİ.....	46
5.1 Silindirlere.....	46
5.2 Pistonlar.....	49

5.3	Segmanlar .....	56
6.	AŞINMALARIN MİKROSKOBİK OLARAK İNCELENMESİ .....	64
7.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	68
7.1	Örnek Motor 1 (Iveco Diesel) .....	68
7.2	Örnek Motor 2 (Renault 9 Broadway) .....	79
8.	SONUÇLAR .....	81
KAYNAKLAR .....		82
ÖZGEÇMİŞ .....		83



## SİMGE LİSTESİ

$F_F$	Eksenli iki silindirde sürtünme kuvveti
$\eta$	Viskozite
$V$	Milin hızı
$h_{av}$	Ortalama efektif yağ filmi kalınlığı
$E$	Bağıl aşınma dayanımı
$K$	Aşınma sabiti
$S$	Kayma mesafesi
$P$	Uygulanan yük
$P_m$	Aşınan yüzeyin akma gerilmesi
$k$	Sürtünme katsayısı
$x$	Kayma uzaklığı
$H_v$	Yüzey sertliği
$E_e$	Elastik enerjisi
$E_a$	Adhezyon enerjisi
$d$	Aşınan parçaların çapı
$E$	Young modülü
$W_{ab}$	Temas eden metalin işi
$\nu$	Poisson oranı
$\sigma_y$	Metalin eğilme gerilimi
$\gamma_a$	Metalin yüzey enerjisi

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Geleneksel yağlama rejimlerini gösteren Stribeck diyagramı.....	7
Şekil 3.1 Çelikte abrazyon aşınmasının yüzeydeki görünümü .....	14
Şekil 3.2 Abrazyona uğramış yüzeydeki deformasyon ve kırılma.....	14
Şekil 3.3 Abrazyon aşınması dayanımı ile sertlik grafiği .....	17
Şekil 3.4 Çeliğin adhezyon aşınması sonucu transfer olan partikülün yaptığı aşınma .....	19
Şekil 3.5 Partiküllerin ortalama çapları .....	23
Şekil 3.6 Adhezif silindir aşınmasının tipik şekli .....	25
Şekil 3.7 Dizel motorda piston segmanları üzerindeki basınç .....	25
Şekil 3.8 Katmanlarına ayrılma aşınması (adhezyon).....	26
Şekil 3.9 Gri dökme silindir gömleğinde yüzeydeki korozyon ve abrazyonun görünümü .....	28
Şekil 3.10 Zamana bağlı korozyon aşınması tipleri .....	30
Şekil 3.11 Yumuşak korozyon aşınması.....	31
Şekil 3.12 Adhezyon aşınması ile kimyasal aşınma arasındaki ideal denge diyagramı.....	31
Şekil 3.13 Yorulmaya maruz kalan yatağın görünümü .....	32
Şekil 3.14 Tipik yorulma çatlakları .....	34
Şekil 4.1 Peter AV1 motorunda motor yüküne bağlı olarak segman aşınması.....	36
Şekil 4.2 Tek silindirli benzin motorunda motor yüküne bağlı olarak segman aşınması.....	37
Şekil 4.3 Pik yanma basıncının fonksiyonu olarak segman aşınması .....	38
Şekil 4.4 Tek silindirli motorda sıkıştırma oranının üst segmana etkisi .....	39
Şekil 4.5 Pik sıcaklığın fonksiyonu olarak motorda segman aşınması .....	40
Şekil 4.6 Motor hızının segman aşınması üzerindeki etkisi .....	41
Şekil 4.7 Motor hızının silindir cidarı aşınmasına etkisi .....	41
Şekil 4.8 Hava fazlalık katsayısının üst segman aşınmasına etkisi.....	42
Şekil 4.9 İlk hareket aşınması .....	42
Şekil 4.10 Benzinli motorda radyoaktif yöntemle aşınma oranının belirlenmesi.....	43
Şekil 4.11 Çalıştırma koşullarının değiştirilmesi durumunda meydana gelen değişim .....	44
Şekil 4.12 E.G.R.'nin segman aşınmasına etkisi .....	44
Şekil 4.13 Yapılan E.G.R. yüzdesinin piston aşınmasına ve NO <sub>x</sub> oluşumuna etkisi .....	45
Şekil 5.1 Değişik gömlek malzemeleri için aşınma oranları .....	49
Şekil 5.2 Alüminyum gövdeli, çelik başlı pistonun yapısı .....	51
Şekil 5.3 Aşırı derecede aşınmış segman ve oluk .....	52
Şekil 5.4 Aşınmış üst oluğun neden olduğu kırık segman ve zarar görmüş piston.....	52

Şekil 5.5 Metal transferi.....	53
Şekil 5.6 Alaşım piston oluşunun dökme demir segman kenarı tarafından kesilmesi.....	54
Şekil 5.7 Yetersiz boşluk sonucunda pistonun çizilmesi.....	55
Şekil 5.8 Krom kaplı piston segmanlarının yüzeyi .....	58
Şekil 5.9 Molibden kaplı pistonun yüzey porozitesini gösteren mikro fotoğraf.....	60
Şekil 5.10 Çinko ditiofosfatın kaynama yüküne etkisi .....	61
Şekil 5.11 Piston segman kaplama malzemelerinin aşınmaya etkisi .....	61
Şekil 5.12 Kazınmış segman örnekleri .....	62
Şekil 6.1 Adhezyon, abrazyon ve korozyon aşınması .....	65
Şekil 6.2 9-59K Deltic motorunun segmanı .....	66
Şekil 6.3 Valenta motorundaki silindir gömleği .....	67
Şekil 7.1 Iveco silindir gömleği (X 100) .....	68
Şekil 7.2 Iveco piston (X 100) .....	69
Şekil 7.3 Iveco segman (X 50), (X 100), (X 200).....	69
Şekil 7.4 Iveco silindir gömleği (X 2000) .....	70
Şekil 7.5 Iveco piston (X 100) .....	70
Şekil 7.6 Iveco piston (X 350) .....	71
Şekil 7.7 Iveco piston (X 2000) .....	71
Şekil 7.8 Iveco segman (X 500).....	72
Şekil 7.9 Iveco segman (X 2000).....	72
Şekil 7.10 Iveco silindir gömleğinin yüzeyinde bulunan metaller.....	73
Şekil 7.11 Iveco piston yüzeyinde bulunan metaller.....	74
Şekil 7.12 Iveco segman yüzeyinde bulunan metaller .....	75
Şekil 7.13 Iveco silindir gömleği yüzeyinde bulunan metallerin X-Ray Haritası .....	76
Şekil 7.14 Iveco piston yüzeyinde bulunan metallerin X-Ray Haritası .....	77
Şekil 7.15 Iveco segman yüzeyinde bulunan metallerin X-Ray Haritası .....	78
Şekil 7.16 Renault silindir gömleği (X 50), (X 100), (X 200).....	80
Şekil 7.17 Renault pistonu (X 100).....	80
Şekil 7.18 Renault segmanı (X 50).....	80

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Bazı metal çiftlerinin sürtünme katsayıları ve aşınma oranları .....	9
Çizelge 3.2 Sanayide karşılaşılan aşınma çeşitleri .....	11
Çizelge 3.3 İçten yanmalı motorlarda meydana gelen aşınma çeşitleri .....	12
Çizelge 3.4 Abrazyona karşı metal dayanımları .....	18
Çizelge 3.5 Yorulma ömrüne katkıların etkisi .....	35
Çizelge 7.1 Örnek motor 1'in özellikleri.....	68
Çizelge 7.2 Örnek motor 2'nin özellikleri.....	78



## ÖNSÖZ

Endüstri dünyasında tribolojinin önemi, 1966 yılındaki ünlü Jost raporundan başlayarak, bu şekilde tekrarlanan raporlar ile anlaşılmaya başlandı. Tribolojik hesaplar, otomotivin birçok yerinde, taşıt dizaynı ve performansında anahtar bir rol oynar. Triboloji ayrıca otomotivde taşıtların üretim aşamasında da önemli bir rol oynar.

Güvenilirlik ve dayanıklılık, elbette bir taşıtın dizaynındaki en önemli önceliktir ve tribolojinin rolü özellikle motor için önemlidir. Güvenilirlik ve dayanıklılığa ilave olarak, triboloji motorun yüksek çalışma verimi içinde önemlidir.

Modern taşıtlar için yakıt ekonomisi sağlama amacı, motor sürtünmesinin ve aşınmasının mekanizmasını anlama ve bu anlayışı düşük sürtünmeli motor parçalarının dizaynı için uygulama konusunda yeni bir ilgi alanı oluşturmuştur.



## ÖZET

Aşınma, yüzeyin topografyasındaki değişimler üzerindeki etkisi, içten yanmalı motorların bazı parçaları üzerindeki zarar verici etkisi ve mekanizmaları açısından incelenmiştir. Bu parçalar; piston, segman ve silindir cidarıdır. Sürtünme ve aşınma mühendislik sisteminin karakteristiğidir ve ilerlemeler işletme parametrelerini değiştirerek, aşınma yüzeyinin durumunu değiştirerek veya aşınma karşıt yüzey bileşimini en iyi şekilde kullanarak sağlanabilir.

Aşınma mekanizmaları çoğunlukla tarayıcı elektron mikroskobu (SEM – Scanning Electron Microscope) tekniklerinin kullanımı ile elde edilen gözlemler ile açıklanır ve bu gözlemlere göre, en çok abrasif ve metal metale kayma durumları gözlenir. Aşınma araştırmaları giderek hem temel hem de daha yaygın hale gelmektedir ve gelişmiş yüzeyler elde etmek için kayda değer çalışmalar yapılmaktadır. Tribolojik yüzeylerde karşılaşılan aşırı derecedeki ağır şartlarla savaşmak için yüzey kaplamaları ve yüzey işlemleri yaygınlaşmaktadır.

Tezin sonunda, örnek motorlarda deneysel incelemeler ile aşınma mekanizmaları araştırılmıştır. Aşınma tipleri literatür ile bağdaştırılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Yağlama rejimleri, aşınma, aşınma mekanizmaları, içten yanmalı motorlarda aşınma (piston, segman ve silindir cidarı).

## **ABSTRACT**

Wear is investigated as the effect on the change the surface topography, mechanisms and damage effect on some of the internal combustion engines' parts such as piston, piston ring and cylinder liner. Friction and wear is the part of engineering system and innovations can be made by changing the working parameters, changing the wear surface conditions or using the opposite wear surface compositions in a best way.

Mostly, wear mechanisms are explained by observations after the usage of scanning electron microscope (SEM) techniques. And according to these observations abrasive and sliding metal to metal situations occurs mostly. Wear researches are becoming to both basic and widespread position and to obtain improved surface, important experiments are being made. To struggle with the heavy conditions on the tribological surfaces, the usage of surface coatings and treatments are becoming widespread.

At the end of this study, wear mechanisms are observed on the sample engines. Wear types are reconciled with literature.

**Keywords:** Lubrication regimes, wear, wear mechanisms, wear occurring in internal combustion engines (piston, piston ring and cylinder liner).



## 1. GİRİŞ

Günümüzde, makinelerdeki bozuklukların ve parçalardaki arızaların azalması, gerek makinelerde ve gerekse motorlarda karlılık ve güvenilirlik oranını arttırmıştır. Geliştirilmiş malzeme performansı, modern hesaplama yöntemleri ve parça kontrol teknikleri, ortaya çıkabilecek ciddi kazaları önlemektedir. Öte yandan mekanizmaların ömürleri ve performansları, yağlama hataları ve aşınmalar, yıpranmalar, kazınmalar, metal yüzeylerdeki oyuklaşmalar ve kabarmalardan dolayı sınırlanmaktadır. Yağlayıcıların başlıca fonksiyonları, sürtünme kayıplarını ve aşınmaları ortadan kaldırmaktır. Bu olay, kullanıcıya rahatsızlık vermeden aracın hareketliliğini sağlaması açısından önemlidir.

Motorlardaki aşınmalar farklı şekillerde karşımıza çıkabilir:

*Ani Bozulmalar:* Motorun geçici hareketsizliğine, hatta kalıcı arızalara yol açar.

*Performans Kayıpları:* Bu durum aracın kullanıcılara sağladığı rahatlığı engeller ve hızlanmadaki kayıplar, gürültü, titreşim ve egzozdaki is gibi rahatsızlıklara yol açar.

*İşletme Masraflarının Yükselmesi:* Aşırı yağ ve yakıt tüketimi, yağın eskimesinden kaynaklanan yağ değişim aralıklarının sıklaşması, parça değişimleri ve sonradan meydana gelen motor ömrünün azalması işletme masraflarının yükselmesine neden olur.

Motor aşınmalarının engellenmesinde sadece yağlayıcı rol oynamaz. Bunun yanında imalatçı tarafından uygulanan metalürji, yapısal toleranslar, çalışma şartları, uygunluk derecesi gibi konuları içeren genel motor teknolojisi, kullanılan yakıt cinsi, yanma verimi, sıcaklık, basınç, havadaki nem oranı, denize yakın bölgelerdeki aşınma ve yıpranma gibi özelliklere sahip olan çevresel iklim şartları da etkilidir.

Çalışma şartlarındaki farklılıkla birlikte teknolojik ve metalürjik problemler, uzmanların motor aşınmalarının önemi hakkında ortaya koydukları çeşitli düşünceleri açıklar. Ancak bu düşünceler sadece özel durumlar için geçerli olabilir. Bu yüzden literatürün yeniden gözden geçirilerek yeni teknolojiye uygun olan bilgileri ele alıp önceki bilgilerle kıyaslamak gerekmektedir.

Aşınma olgusundaki karışıklığa rağmen, son yirmi yıl içerisinde motor performansı yükseltilmiş, motor dizaynı ve konstrüksiyonundaki gelişmeler kadar aşınma önleyici özellikleri bulunan yağların da kullanılması motor ömrünü uzatmıştır.

Yükseltilmiş motor performansları yüzünden ortaya çıkan yüksek gerilimler altında çalışacak motor parçalarında önemli gelişmeler sağlanmıştır. Yakın gelecekte malzemelerdeki ve konstrüksiyondaki gelişmeler sürecektir.

### 1.1 Literatür Araştırması

Literatürde konu ile ilgili mevcut bir çok bilimsel çalışmaya rastlanmış olup bunlardan belli başlı olanları şunlardır :

- Taylor (1998), içten yanmalı motordaki ana sürtünen parçaların, tribolojik tasarımının önemi üzerinde verim, dayanıklılık ve emisyon açısından durmuştur. Ayrıca, bazı motor parçalarının bugünkü işletme şartları gözden geçirilmiştir.
- Taylor (1993), yağlama çeşitleri ile ilişkili fiziksel ve kimyasal hareketleri tanımlamıştır. Bunlar hidrodinamik, elastohidrodinamik, karışık ve sınır yağlamadır. Bu yağlama rejimlerini, otomobil motorunun ana tribolojik parçaları ile ilişkilendirmiştir.
- Hwang vd. (2002), gri dökme demirden oluşan sertleştirilmiş katmanın karakteristiklerinde, lazer gücünün ve transfer hızının etkisini incelemişlerdir. Lazer ile sertleştirilmiş katmanın aşınma ömrü, hiçbir şey uygulanmamış katmana göre iki kat olarak gerçekleşmiştir.
- Eyre (1976), sanayide genel olarak karşılaşılan aşınma çeşitlerine değinmiştir. Bunlar adhezyon, abrazyon, erozyon, titreşim ve kimyasal aşınma olarak sıralanabilir. Ayrıca bu aşınmalar, mikro fotoğraflarla açıklanmış olup bunların oluşum mekanizmaları da anlatılmıştır.
- Eyre vd. (1990), içten yanmalı motorlarda meydana gelen aşınma mekanizmalarına değinmişlerdir. Bunlar adhezyon, abrazyon, korozyon ve yorulma aşınması olarak sıralanabilir. Özellikle silindir cidarı ve segman arasındaki ilişkiyi tartışmışlardır.

- Neale, M. (1985), içten yanmalı motorlardaki silindir gömleklerinin yüzey malzemeleri için potansiyel yeni malzemelerin araştırmalarını yapmıştır. Çalışmalarda Paxman motorları kullanılmıştır. Çalışma, varolan krom kaplama prosesine modifikasyon ve yeni malzeme arayışını kapsamaktadır. Buradaki amaç aşınma ömrünü uzatmaktır.
- Neale, M. (1981), 9-59K Deltic donanma motorlarındaki (gemi dizeli) piston aşınmaları üzerine çalışma yapmıştır. Raporda, önceden meydana gelmiş hata istatistikleri, hata tipleri ve bunların çözümlenmeleri irdelenmiştir.
- Waterman, N. A. (1979), İngiliz yüksek hızlı trenlerinde kullanılan Valenta motorlarındaki silindir gömleği aşınması üzerine çalışma yapmıştır. Sonuç olarak problemin neden kaynaklandığı ve alınması gereken önlemleri dile getirmiştir.



## 2. YAĞLAMA VE YAĞLAMA REJİMLERİ

### 2.1 Yağlama

Yağlamanın amacı birbirine göre bağıl olarak hareket eden iki yüzeyi, yüzeye zarar vermeden kolayca yüzeyden kopabilen bir sıvı filmi yardımı ile ayırmaktır. Yağlayıcılar 5000 yıl önce Asurlular ve Mısırlılar tarafından büyük heykellerin veya taş blokların nakledilmesinde kullanılan kızaklarda kullanılmıştır.

Yağlayıcıların eski çağlarda kullanımı ve Leonardo da Vinci'nin yağlama üzerindeki araştırmalarının dışında, Sanayi Devrimi sonucu üretilen metal makine parçalarında kullanımı, yağlama konusunu bilimsel ve mühendislik açıdan araştırmaya yönlendirmiştir. Bu dönemden önce, bilimsel ilgi "saf" sıvı mekaniği teorileri üretmek üzerine yoğunlaşmıştı. Bu bağlamda matematikçi John V. Neumann'ın bir hatırlatmasından alıntı yapılabilir. Hidrodinamikler üzerine 1900 yılına kadar yapılan araştırmalarda, asıl ilgi sıvıların iç sürtünmesini ihmal eden matematik problemlerini çözmek üzerine yoğunlaşmıştı.

Yağlanmış makina parçaları üzerine yapılan ilk araştırmalar sadece mil yatakları göz önüne alınarak yapılmıştır. 1883'te Petroff aynı eksenli iki silindirde sürtünme kuvveti  $F_F$ 'in hesabı için aşağıdaki formülü önermiştir:

$$F_F = \frac{\eta \times v}{h_{av}} \times (\text{ıslak alan}) \quad (2.1)$$

burada "η" viskozite, "v" milin hızı ve "h<sub>av</sub>" ortalama efektif yağ filmi kalınlığı. Bu ifade yağlamanın tam-akışkan-tipi için türetilmiş olan ilk ifadesidir.

Hidrodinamik yağlama teorisinin matematiksel temelleri 1886 yılında Reynolds tarafından kendi adıyla anılan ve aynı zamanda sonraki yağlama teorilerinin de temelini oluşturan denklemlerden elde edilmiştir. Bu alandaki ilk deneysel çalışmalar, 20. yüzyılın başlangıcında, Berlin-Dahlem'deki "Budensanstalt für Materialprüfung (BAM)" enstitüsünde Stribeck tarafından yapılmıştır. Stribeck, yük ve hız gibi işlevsel değişkenlerin kaymalı ve dönen yataklardaki sürtünme ve yağlama üzerine olan etkilerini detaylı olarak çalışmıştır. Stribeck'in deneysel sonuçları Sommerfeld'in, Reynold'un denklemlerinde dahice bir değişim yaparak sağladığı, kuramsal sürtünme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. 1920 yılında Biel,

Stribeck tarafından ölçülen sürtünme tipi eğrisinin – genelleştirilmiş Stribeck eğrisi – yağlanmış yüzeylerin genel davranışını yağlayıcı viskozitesi, kayma hızı ve yük’e bağlı olarak tanımlayan bir fonksiyon olduğunu ilk belirten kişi olmuştur. Hidrodinamiksel yağlanmış yatakların dizayn kriterleri yağlama teorisinin bu esaslarına dayanarak geliştirilmiştir.

Hidrodinamik yağlama teorisi tarafından ele alınmayan bir soru ise “tam-sıvı yağlamanın” sınırlarıdır. Örneğin, eğer; yük çok fazla ve bağıl hız çok düşükse, çok viskoz yağlayıcılarla bile yeterince kalın bir yağ filmi elde etmek çok zordur. Bu yağlama rejiminde, kayan yüzeylerin bir kısmı sadece 1 veya 2 moleküler boyut kalınlığında yağ filmi ile kaplanmış olabilir. Hardy 1922 yılında, yağlayıcı davranışının yağlayıcının viskozitesinden çok kimyasal yapısına bağlı olduğu, “Sınır” yağlama rejimini detaylı olarak ilk ele alandır. Hardy’nin çalışmasından sonra, yağlamanın hidrodinamik olmayan rejimleri birçok yönden yoğun bir şekilde incelenmiştir. Daha sonraları, aşırı basınç katkıları ve sürtünme önleyici katkıları, gibi değişik tiplerde aktif kimyasal yağlayıcı katkıları geliştirilmiştir. Aktif kimyasal katkıları içeren yağlayıcıların gelişimi, saf madeni yağlar kullanılması halinde onarılamayacak arızalar oluşan makine elemanları üzerinde mühendislik uygulamalarının yapılmasına olanak sağlamıştır.

II. Dünya Savaşından sonra, makine mühendisliğinde genel eğilim; daha yüksek hızlar, yükler ve çalışma sıcaklıkları ile, hareket eden makine aksamının ağırlıklarını azaltma girişimleri yönünde olmuştur. O zamandan beri sürtünme, aşınma ve yağlama problemlerine olan ilgide devamlı bir artış olmuştur.

1960’ların başında, makine ve aksamlarında aşınma ve aşınmayla ilişkili olarak meydana gelen arızalarda artış meydana gelmiştir. Bu zamanlarda, gelişen teknoloji, artan ekipman yoğunluğu ve daha uzun süreli kullanımlar, makine ve ekipmanlarında meydana gelen hasarların daha masraflı ve daha ciddi olmasına sebep olmuş; ve bu yüzden eskisine göre daha az cazip hale gelmişlerdir. Bu eğilim; aşınma, sürtünme ve yağlama konuları ile uğraşan uzmanlar tarafından fark edilmiştir. Bu durum, bu konularda daha iyi ve daha fazla eğitim ve daha iyi ve daha fazla koordineli araştırmanın gerekliliğini göstermiştir.

Bu konuda geçmişte meydana gelen ihmalleri saptamaya çalışırken, teknolojik ve ekonomik öneminin dışında, ihmallerle ilgili belli başlı üç sebepten söz edilebilir :

- a. Bu konunun, makine mühendisliği, fizik, metalürji ve kimyayı da içeren, çok disiplinli doğası.
- b. Sadece, son yıllarda üretim yöntemlerindeki teknolojik ilerleme ile ilginin bu çok disiplinli konuyu oluşturan unsurlar üzerinde yoğunlaştığı bir gerçektir.
- c. “Yağlama” teriminin, dar bir anlamda kullanılması, yalnızca insanların konunun ekonomik önemini anlamalarını engellemekle kalmamış, aynı zamanda da “yükün hareketli bir yüzeyden bir diğerine transferi” tanımının yanlış adlandırılmasına sebep olmuştur.

## 2.2 Yağlama Rejimleri

Otomobil motorlarının daha yüksek çıkışlı ve aynı zamanda daha az yer kaplaması için devam eden trend parça tasarımcılarına dikkate değer bir yük getirmektedir. Gelişmiş özellik elde etmek için , daha duyarlı tasarım öngörülerine gereksinim vardır. Bu, motorun ana sürtünen parçaları olan yataklar, subap mekanizması ve piston topluluğu için kesinlikle doğrudur. Yükleme, hız veya sıcaklığın çok daha aşırı olduğu koşullarda ki çalışma hakkında yapılan herhangi bir geliştirmenin herhangi bir makinanın dayanıklılığına olumsuz etkimesi de önemlidir.

İçten yanmalı motorun, belirli tribolojik parçalarında daha iyi bir tasarım elde etmek için, fiziksel ve kimyasal mekanizmaların sorumlu olduğu yükleme kabiliyeti ve hata mekanizmalarının anlaşılması gereklidir. Dağılım, yağlama rejimleri (veya değişik yağlama modları) üzerinde yoğunlaşmakta, bu rejimler genelleştirilmiş bir şekilde ifade edilerek, daha sonra otomobil motoruyla ilişkilendirilmektedir.

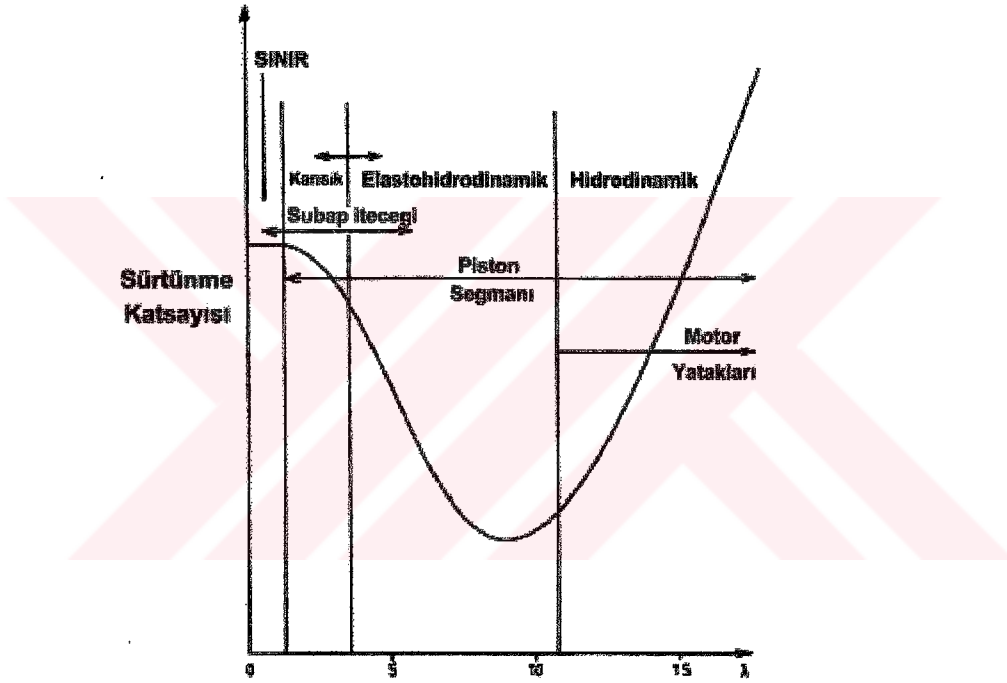
Yağlayıcının fiziksel ve kimyasal özellikleri ve katkı malzemelerinin önemi değişik yağlama şartlarında farklı olduğundan, kritik değişimlerin yapılması gerekmektedir. Yataklar, subap mekanizması ve piston topluluğunu yağlamak için tek bir yağ kullanılmış, değişik özellikteki yağ ile her birinin performansını optimize etmek istenmiştir. Bu, yağlayıcının önemini, mühendislik tasarım malzemesi olarak vurgular.

Birçok genel mühendislik uygulamasında tribolojik çiftlerin karşıt yüzeyleri toplam sürtünmeyi azaltacak ve aşınmayı düşürecek yağlayıcı ile ayrılmıştır. Modern yağlayıcılar bunu yağ filmi yaratarak bunu kolaylıkla halledebilirler buna rağmen toplam ayrılma yağlamanın ön şartı değildir. Örneğin birçok değişik yağlama tipi yüklü temaslar arasında yer almaktadır. Bunlar aşağıda görüldüğü gibi sıralanabilir ve Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

### 2.2.1 Hidrodinamik Yağlama

Burada yüzeyler yağ filmi tarafından tamamı ile birbirinden ayrılmıştır ve yükü taşımak için filmdeki basınçların oluşumu klasik hidrodinamik hareket ile kazanılmaktadır. Burada yağın dinamik viskozitesi , başlıca yağ karakteristiğidir.

Birbirine göre bağıl olarak hareket eden veya kayan iki yüzey arasında yeterli sıvı filminin ve basıncının oluştuğu sürtünme sistemidir. Harekete karşı direnç yağlayıcının viskozitesi ile oluşmuştur. Bu şartlar altında sürtünme katsayısı çok düşüktür ( $f= 0.001$  ila  $0.005$ ) ve aşınma teorik olarak sıfırdır.



Şekil 2.1 Spesifik yağlanmış motor parçaları ile ilişkilendirilmiş, geleneksel yağlama rejimlerini gösteren Stribeck diyagramı (Taylor, 1998).

$$\text{Film Kalınlık Oranı } (\lambda) = \frac{\text{Etkin Film Kalınlığı}}{\text{Yüzey Pürüzlülüğü}} \quad (2.1)$$

Hidrodinamik yağlanan mekanik sistemlerin tribolojik davranışı için mekanik enerjinin yayılmasında aşağıdaki görüşler önemlidir:

- operasyon değişkenleri hız, sıcaklık, basınç, film kalınlığı yağ filmi oluşturur.
- (a) ile sistem geometrisi arasındaki ilişki, malzemeler ve yağlayıcı parametrelerini içerir.

(c) Yayılan mekanik enerji ve sürtünme katsayısı değeri, (a) ve (b)'ye bağlıdır.

(d) Hidrodinamik yağlama (a), (b) ve (c) ile ilgilidir.

(Czichos, 1978)

### **2.2.2 Elastohidrodinamik Yağlama**

Burada yüzeyler yine teoride ayrıdır , ancak temas daha fazla konsantredir , filmler daha ince ve diğer fiziksel fenomenler (yüzeylerdeki elastik değişimler ve dinamik viskozitedeki basınç) etkilidir.

Zayıf geometrik uygunluk durumlarında örneğin Hertz yoğunluklu temas durumlarında yüzeylerin elastik deformasyonunun etkisi hesaba alınmak zorundadır. Ayrıca, yağlanan Hertz temaslarında yüksek basınçlar bulunmasından dolayı yağlayıcı maddenin viskozitesi üzerine basıncın etkisi aynı zamanda göz önüne alınmak zorundadır.

### **2.2.3 Karışık Yağlama**

Burada yağlı temasta, yüzeyler arasında pürüz uçları teması görülür ve bütün davranış karakteristikleri ve yük kapasitesi, (elasto) hidrodinamik ve sınır yağlama etkisi olarak tanımlanır.

### **2.2.4 Sınır Yağlama**

Burada fiziksel ve belirli bir kısmı kimyasal performansı tanımlayan yüzeylere yapışmış ince film hareketleri vardır. Yağlayıcının dinamik viskozitesi önemli değildir, ancak katkı malzemesinin anlamlı bir rolü vardır.

Sınır yağlama şartları, motorların ilk hareketinde ve durması esnasında yatak, segman ve silindirlerde; motorların değişik işletim şartlarında ise bilhassa piston-segman ve silindir yüzeyleri arasında, oldukça ağır yük altında çalışan Alt ve Üst Ölü Noktalarda ve yavaş hareket eden supap ve iticilerinde, krank mili yataklarında, yağ pompası dişlilerinde meydana gelir.

### 3. AŞINMA MEKANİZMALARI

En çok karşılaşılan endüstriyel problemlerden biri olan korozyon ve yorulma aşınmaları parçaların değiştirilmesine neden olur. Aşınma kaçınılmazdır ve güç kayıplarını, yağ tüketimini ve parça değiştirme sıklığını artırarak işletme verimini düşürür.

Mühendislik sistemlerindeki enerji tüketimini düşürmek ve kobalt, volfram ve kalay gibi az miktarda bulunan maddelerin yerine veya ilave uygun malzemeler bulabilmek için, aşınmaya verilen önem giderek artmaktadır. Verimli işletmeyi sağlayacak optimum çözümleri elde etmek için, kullanılmakta olan yeni tip araçlarda meydana gelecek sürtünmeyi tanımlamak özellikle önemlidir.

Sürtünme ve aşınma kendine özgü malzeme özelliği değildir ama mühendislik sistemi karakteristiğidir. Çizelge 3.1’de gösterildiği gibi sürtünme ve aşınma arasında basit bir evrensel ilişki yoktur, çoğunlukla aşınmadaki büyük değişimler sürtünmedeki küçük değişimler sonucu oluşacaktır. Fakat, genelde, düşük sürtünme sonucunda düşük aşınma oluşur ve sürtünmedeki değişimler aşınma oranındaki ve/veya aşınma mekanizmalarındaki değişimi muhtemelen gösterir. Yük, hız veya çevre koşullarındaki herhangi bir değişim temas halindeki yüzeylerden birinin veya her ikisinin de aşınma oranında hasara yol açacak değişimlere neden olabilir. Bu yüzden belirli problemlere genel sonuçları uygularken, büyük özen gösterilmelidir.

Çizelge 3.1 Bazı metal çiftlerinin sürtünme katsayıları ve aşınma oranları (Eyre, 1980)

Metal Kombinasyonu	Sürtünme Katsayısı ( $\mu$ )	Aşınma Oranı ( $\text{cm} \times 10^{-12}$ )
%0.2 Karbonlu alaşımsız çelik	0.62	157,000
Çelik üzerinde %60 Cu, %37 Zn, %3 Pb	0.60	24,000
Karbon çeliğinde paslanmaz ferritik çelik	0.53	270
Volfram karbür	0.35	2

Aşınmanın tam yeterli bir tanımı yoktur fakat, herkes tarafından kabul gören bazı fikirler vardır :

1. Malzemedeki hasar (yıkım) sürtünme bağlarının tekrar tekrar zorlanması sonucu oluşur (Krakelski).

2. Bir gövdenin çalışma yüzeyinde, yüzeyin göreceli hareketi sonucu oluşan, ileri malzeme kaybı (OECD).
3. Katı yüzeylerde, mekanik hareketin sonucunda oluşan malzeme kaybı (Rabinowicz).
4. Göreceli olarak hareket halindeki yüzeylerden mekanik ve/veya kimyasal yolla malzeme nakli (Tabor).

Aşınma, pürüzlerdeki yüzey etkileşimleri sonucu oluşur ve eğer göreceli olarak küçük bir miktar malzeme kaybindan sonra aşırı derecede pürüzlenme olmuşsa parçaların değiştirilmesi gerekebilir. İçten yanmalı motorlarda ve gaz kompresörlerinde piston segmanları ve keçeler, yüzeyler yağ ve gaz sızıntısına izin verecek derecede pürüzlendiğinde verimliliğini kaybeder, yetersizlik güçteki azalma ve yağ tüketimindeki artış ile fark edilir.

Demiryolu taşımacılığındaki frenleme sonucu sürtünme tamamen değişik sorunlar sergiler ve göreceli olarak büyük aşınma kayıplarına müsaade edilebilir. Düşük hızlarda metal olmayan malzemeler kullanılır ancak yüksek hızlarda oluşan sürtünme sıcaklığı daha büyük olduğu için malzeme olarak gri dökme demir kullanılır. Tecrübeye göre yüksek hızlar için kullanılan metalik bloklar yaklaşık olarak 8 ile 10 hafta içerisinde veya 4 cm aşınma meydana geldikten sonra değiştirilir. Bu malzemelerin kullanılmasının başlıca nedenlerinden biri sürtünen yüzeyin karşı yüzeye minimum zarar vermesi olmalıdır. Örneğin, tekerlek, termal çatlamların yorulma üzerindeki zararlı etkileri ile raydan çıkabilir.

Aşınma partiküllerinin oluşumu ve sirkülasyonu, özellikle boşlukların küçük olduğu sistemlerde gerçek aşınma miktarından daha fazla probleme yol açabilir. Partiküller tıkanmaya veya tutunmaya veya her ikisine de sebep olabilir. Aşınma partiküllerinin varlığı ise işletme verimi hakkında bilgi verebilir.

İşletme koşullarına uymak için yüzeyi işlemek giderek daha fazla önem kazanmaktadır (özellikle eğer pahalı malzeme, daha ucuz malzeme ile değiştirilebiliyor ise). Günümüzde, iyon implantasyonu, lazer metodu gibi çok çeşitli teknikler kullanılmaktadır.

Aşınmaya maruz kalmış yüzeyleri incelemenin en kolay yollarından biri uygun metalürjik tekniklerin, özellikle de Tarayıcı Elektron Mikroskopunun (SEM-Scanning Electron

Microscopy) kullanılmasıdır. Niteliksel çalışmalarda, mikro grafikler aşınma mekanizmalarının fark edilmesi ve ayırt edilmesi açısından çok önemlidir ve böylece bir grup malzeme ve uygulama için hasar karakteristiklerini gösteren bir 'harita' yapmak mümkün olmuştur. Öyle ki bu harita iyileştirilmiş malzeme seçimi için bir kılavuz olarak kullanılabilir.

Sanayide karşılaşılan aşınma çeşitleri aşağıdaki gibi gruplandırılabilmesine rağmen, bir tipin diğerine dönüştüğü durumlar veya, iki veya daha fazla tipin aynı anda olduğu durumlarda vardır. Bu da farklı problemlere optimum çözümler bulmayı aşırı derecede zorlaştırıyor.

Çizelge 3.2 Sanayide karşılaşılan aşınma çeşitleri (Eyre, 1976)

Abrazyon	%50
Adhezyon	%15
Erozyon	%8
Titreşim	%8
Kimyasal	%5

Aşınmaya etki eden faktörlerden en önemlileri yorulma, darbe, yüksek çalışma sıcaklıkları ve korozif veya diğer çevresel koşullar altında çalışma zorunluluğudur.

Aşınma mekanizmaları hakkında evrensel bir görüş birliği yoktur fakat, abrasif ve adhezif, olmak üzere iki temel aşınma mekanizmasını kabul eden ilk zamandan bu yana bu konuda büyük ilerleme kaydedilmiştir. Artık aşınma davranışının malzemenin arıza mekanizması üzerinde büyük rol oynadığı fikri kabul görmektedir. Literatürde adhezyon, abrazyon, erozyon, yorulma, darbe, plastik deformasyon ve kırılma, ve oksidasyonda dahil olmak üzere çeşitli aşınma tiplerinden bahsedilir. Buradan malzemelerin fiziksel, kimyasal, mekanik karakteristiklerinin aşınma davranışının kontrolünde rol oynadığı açıkça görülür. Sinterlenmiş parçalar sürtünme ve aşınma uygulamalarında birçok alanda kullanılmakta ve bu kullanım giderek artmaktadır. Sinterlenmiş parçaların, işlenmiş (dövme), dökme ve kaplanmış parçalara göre bazı avantajları vardır. Bunlar:

1. Birbirine bağlayıcı gözeneklilik, yağlayıcılar için hazne görevi görmesinden dolayı önemli bir avantajdır.
2. Üretilmesi imkansız veya çok zor olan alaşım ve malzeme bileşimlerini bu yolla üretmek mümkündür.

Daha önce de belirtildiği gibi aşınma, sürtünme yüzeyinden maddenin ayrılmasıdır. Genellikle bu olay zararlara sebep olur ama içten yanmalı motorun alışması esnasında faydalı da olabilir. İçten yanmalı motorlarda yüzeylerin kötüleşmesine etki eden faktörler izole edilmiş ve eş zamanlı çalışan mekanizmalardır. Bu aşınmaların başlıcaları aşağıdaki Çizelge 3.3'de gösterildiği gibidir.

Çizelge 3.3 İçten yanmalı motorlarda meydana gelen aşınma türleri (Schilling, 1972)

1	Adhezyon Aşınması
2	Abrazyon Aşınması
3	Korozyon Aşınması
4	Yorulma Aşınması

Pistonlu motorların en önemli parçalarını oluşturan segmanlar, silindirler ve pistonlar ağır çalışma ve çevre şartlarına tabidirler. Ana bölgeler:

- Segmanların alt ve üst yüzleri
- Piston oyuklarının alt ve üst yüzeyleri
- Piston etekleri
- Pistonun süpürdüğü alan, strok uzunluğu boyunca bulunan silindir gömlekleri
- Piston pernosu muylu yatağı

Çok şiddetli çalışma şartları, aşağıdaki gittikçe artan faktörlerle ölçülebilir:

- a- Yüksek ortalama kayma hızları, 10-15 m/s
- b- 12000'den 15000 m/s<sup>2</sup>'ye kadar olan maksimum piston ivmesi. Bu bazen 30000 m/s<sup>2</sup>'ye de çıkabilir. Yüksek hızlı motorlar için piston ivmesi, ortalama piston hızından daha önemlidir.
- c- Yüksek ve çok çabuk oluşan yanma basınçlarından dolayı meydana gelen yüksek segman-gömlek ve segman-oyuk spesifik basıncı.
- d- Sıcak yanma gazları ile yakın temas sonucu oluşan yüksek sıcaklıklar. Arka sayfadaki değerler, denge sıcaklıkları için olması gereken değerlerdir :

Piston Alt Kısmı	250-400 °C
İlk Piston Oyuğunun Altı	200-280 °C
İlk Segmanın Kenarı	200-250 °C
Silindir Gömleği İçi üst Kısım	160-250 °C
Silindir Gömleği İçi Alt Kısım	130-180 °C
Piston Eteği	120-150 °C

Elbette ki, motorun ilk çalıştırılmasında yada soğuk havada segman ve silindir gömleği çeper sıcaklıkları oldukça düşüktür.

e- Yetersiz yağlama:

- Yağ tüketimini ve yanma esnasındaki karbonizasyonu azaltmak için yağ tedarikinin bilerek sınırlandırılması.
- Yağın yanmış gazlar ile teması sonucu buharlaşması.
- Motorun ilk hareketi. Çünkü ilk etapta bu bölgeler, yağlama kaynağından uzaktadırlar.

f- Korozyon ortamı ile temas:

- Yanma ürünlerinin sonucu.

g- Aşındırıcılar ile temas:

- Emme havası ile getirilenler, temel olarak silindir gömleğinin üst kısımları ve en üstteki segmana etki ederler.
- Yağ tarafından getirilenler, silindir gömleğinin alt kısmına ve yağ segmanına etki ederler.

Bütün bunlar bize hangi parçaların değişik aşınma tipleri tarafından etkileneceğinin ve bunların hangi yayılımla ortaya çıktıklarının zorluğunu göstermektedirler.

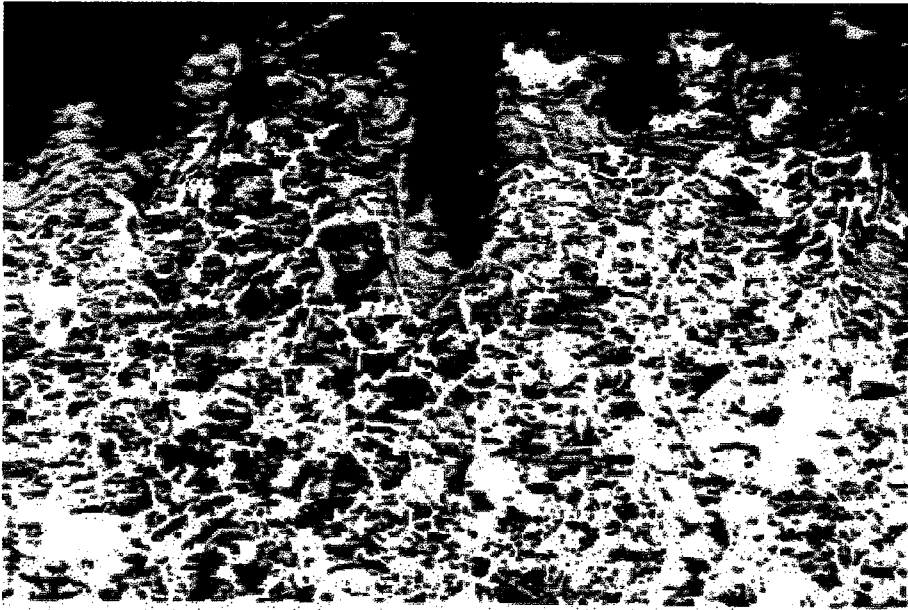
Korozyon aşınması tabi ki her durumda meydana gelmektedir fakat ani bozulmaların sebebi değildir çünkü hiç durmadan çeşitli derecelere doğru devam eder.

### 3.1 Abrazyon Aşınması

Abrasif aşınma, sert partiküllerin yüzey içerisinde kalması ve uzun çentikler ve kıymıklar şeklinde malzeme kaybı ile oluşur. Diğer bir deyişle düzgün yüzey, üzerinde yapışık metalik partiküllerin bulunduğu ve düzenli uzun yarıkların olduğu pürüzlü bir yüzey halini alır (Şekil 3.1). Bu tip aşınma, kuvvet derecesine bağlı olarak yüzeyde tırmalama, çizgisel sıyırma veya oluklar meydana gelmesi şeklinde tanımlanabilir. Ham demir çubukları sıcak haddeleme işlemine tabii tutmak için kullanılan, yüksek karbonlu perlit çelikte meydana gelen deformasyon, çizik ve çatlaklar Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Çelikte abrazyon aşınmasının yüzeydeki görünümü (Eyre, 1976)



Şekil 3.2 Abrazyona uğramış yüzeydeki deformasyon ve kırılma (Eyre, 1976)

Pratikte abrasif aşınma iki veya üç cisim durumunda oluşur. İlki, genellikle düşük gerilme altında çalışma durumunda, aşındırıcının partikül boyutunda ufak bozulmalarla partiküllerin yüzeyde taşınması ile gerçekleşir. Aynı sonuçlar yüksek gerilme durumunda da olur çünkü, partiküllerin boyutları küçülür veya sürtünen yüzeyler tarafından tutulurlar. Her iki durumda da partiküllerdeki ufak kırılmalar, çatlamlar çarpma açısına bağlı olarak aşınmaya neden olurlar; ve kayan veya yuvarlanan parçalar sürtünmeye çok az etki ederler. 80° ile 120° arasındaki açılarda gerçekleşen çarpmalar yüksek aşınma oranlarına neden olurlar. Yabancı partiküllerin yataklara kazara girmesi de problemlere yol açar, çünkü partiküller yumuşak yatak yüzeyi ve çelik mil yüzeyine gömülürler.

Aşınma hacmi genellikle hem yük hem de kayma mesafesi ile lineer olarak artar. Eğer sapmalar olursa, genellikle aşındırıcının boyutundaki azalmadan veya yüzeydeki engellerden dolayı gerçekleşir.

Abrazyon aşınması ile ilgili bilgilerimizin çoğu eski SSCB kaynaklıdır ve Kruschov 1975, özellikle bağlı aşınma dayanımından (E) söz eder:

$$E = (\text{Standart'ın lineer aşınması}) / (\text{test edilen malzemenin lineer aşınması}) \quad (3.1)$$

Rölatif aşınma dayanımı sertlikler ters orantılı olsa da alaşımın mikro yapısı değişikçe aralarındaki bağıntı daha karmaşık bir hal alır. E genellikle birden küçüktür, çünkü karşılaştırma için kullanılan standart sertlik göreceli olarak daha düşüktür.

Çelik için, mikro yapılar belirli bir karbon aralığındayken, E karbon miktarı ile artar. Perlitli temizlemek (rafine etmek) sureti ile de kayda değer ilerlemeler yapılabilir. Aynı zamanda bu çalışma sertliğinin artırılmasına da yardımcı olur.

Çeliklerde hem karbür hacminin hem de karbür kompozisyonunun önemli olduğunu bilinmektedir. Karbürlerin boyutlarını ve dağılımını dikkate alamamış olmasına rağmen onların da etkisi vardır. Karbür konsantrasyonunun optimum bir noktası vardır, bunun üstündeki değerlerde aşınmada önemli bir azalma değeri gerçekleşmez. Vanadyum ve niyobyum karbürleri krom ve volfram karbürlerinden daha üstündürler. Gemi dizel silindir gömleklerinde demir fosfat ve vanadyum karbürün varlığının aşınmayı büyük ölçüde azalttığı görülmüştür.

Sertleşmiş beyaz dökme demir için, aşınmış ve aşınmamış yüzler benzerdir ve aşınma hacmi ile sertlik arasında iyi bir korelasyon vardır. Aynı araştırmaya dahil edilen çeliklerin, aşınma özellikleri aşınmamış sertlikler baz alındığında beklendiğinden iyidir ancak bu sonuçlar, eğer aşınmış yüzey incelenirse görülebilir. Orijinal sertlik değil, aşınma sırasında oluşan bu sertlik göz önüne alınmalıdır. Eğer koşulların şiddeti daha az olursa, çok fazla aşınma meydana gelebilir çünkü oluşan sertleşme yetersizdir.

Bir de abrasif partiküllerin de sertliğini dikkate almak gereklidir. Eğer aşınma direncinde herhangi bir gelişme elde edilmek isteniyorsa, aşınmaya direnen yüzeyin sertliğinin abrasif'in (aşındırıcının) sertliğinin yarısından fazla olması gereklidir. Malzemenin sertliğini aşındırıcının sertliğinin 1.3 katından fazla artırmak gereksizdir, çünkü bu noktadan sonra kayda değer bir iyileşme elde edilmez.

Aşınmayla ilgili önemli bir nokta ise eğer bütün malzeme değil sadece yüzey sertleştiriliyorsa, bu bilgiler çok dikkatli uygulanmalıdır. Yüzeyin sertliği, kalınlığı ve alt tabakanın sertliği arasında bir ilişki olduğunu gösterecek bazı kanıtlar vardır. İnce sert katmanlar yetersiz alt katman desteğinden dolayı çökebilirler.

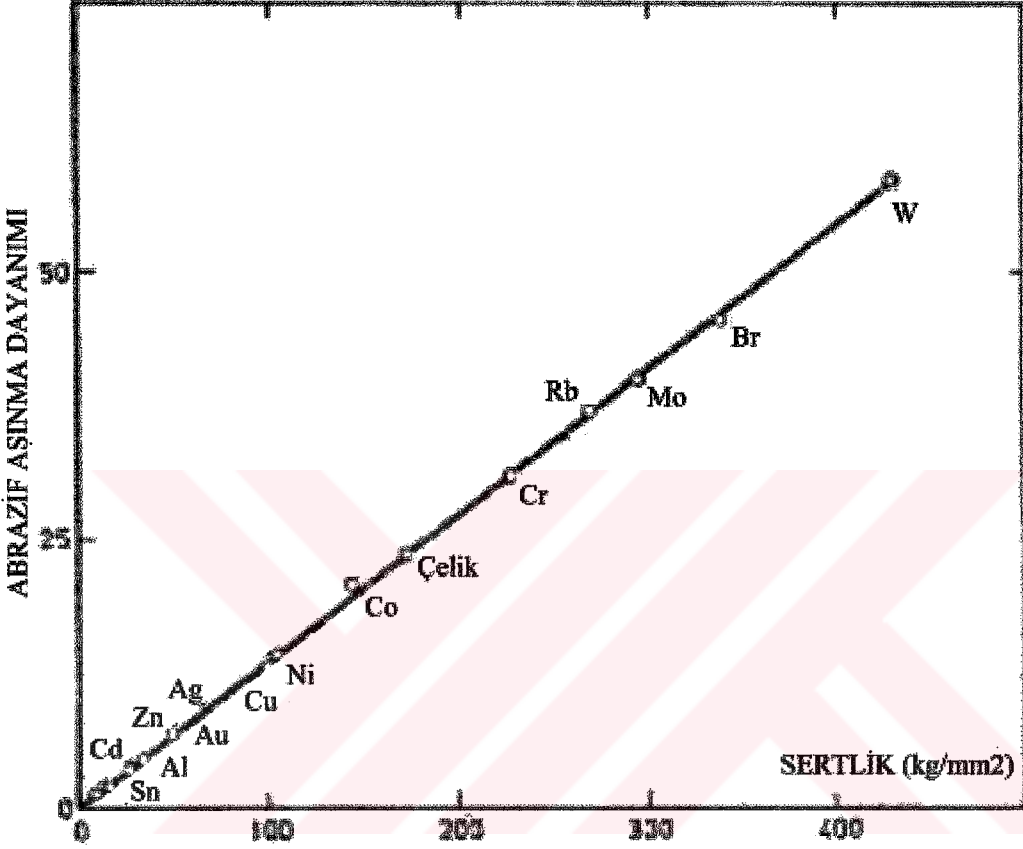
Sonuç olarak, demirden oluşan metaller abrasif aşınmaya, düzgün dağılmış ikincil karbürü martenzit matristen daha fazla direnç gösterirler. Alaşımdayarak karbürlerin sertliğini artırmakla aşınma direnci artar; fakat artışın derecesi abrasif partiküllerin sertliğine de bağlıdır. Eğer aşırı yüklenmiş darbe durumunda daha sert bir matris isteniyorsa, martenzitli matris kullanmak mümkün olmayabilir ve kararsız östenitli bir yapı tavsiye edilir.

### 3.1.1 İçten Yanmalı Motorlarda Abrasyon Aşınması

Abrasyon aşınması, bağlı hareket sırasında iki temas yüzeyinden birinde sert pürüzlerin bulunmasından dolayı, iki yüzeyden birinden malzeme kalkması, iki yüzey arasında sert partiküllerin bulunması yada bu partiküllerin yüzeylerden birinin içinde gömülü kalması durumunda oluşur. Bu partiküller yağlayıcı ile taşınmış olan aşındırıcı zerreler veya adhezyon aşınması sonucu sertleşmiş ve okside olmuş partiküller gibi yabancı maddeler olabilir.

Abrasyon aşınması altındaki sürtünmelerde yüzey, kayma yönüyle paralel çizgilere sahiptir. Bunlar derin olmayan çizikler yada bir sabanın açtığı izlere benzer derin çizikler de olabilir.

Abrazyon aşınma oranının tersi olan abrazyon aşınmasına karşı dayanım Şekil 3.3'te gösterildiği gibi iki benzer metalin sürtünme sertlikleri ile orantılıdır.



Şekil 3.3 Abrazyon aşınması dayanımı ile sertlik grafiği (Schilling, 1972)

Son zamanlardaki aşınmalar bize abrazyona karşı direncin atomlar arası uzaklıkla ters orantılı olduğunu göstermiştir. Metal atomları arasındaki mesafe kısa olduğunda etkileşimler daha büyük olmaktadır. Bundan dolayı da abrazyona karşı direnç ağır metaller için daha yüksektir. Örnek olarak Osmiyum abrazyona karşı direnci en fazla olan saf metaldir. Bunun yanında volfram, iridyum ve krom da direnci fazla olan metaller arasında yer almaktadır.

Aynı tipte iki metal yüzey, sert partiküllerin varlığı sonucu aşındırıcı bir faaliyete tabi ise aşınma direnci yüzeylerin sertliği ile orantılıdır.

Sürtünme yüzeyleri arasında üçüncü bir yüzeyin varlığı bir yıkıma sebep olabilir ve bu özellikle yağ tarafından taşınan partiküllerin boyutları ile kıyaslandığında boşluk alanların az

olduğu kaymalı yataklarda bir sorun oluşturur. Aşındırıcı ürünlerin çok az bir miktarının yarattığı hasarın farkında olunmamaktadır.

Abrazyon aşınması, malzeme seçimi, yüzey işlemleri ve metal sertliklerinin değişimi ile de daha kötü bir hal alabilir. Pürüzlülük; taşlama, parlatma, cilalama ve alıştırma ile keskin pürüzlerin yok edilmesinden etkilenir. Yağlama filtrasyonu aşındırıcı partikülleri yok etmenin bir yoludur. Yataklardaki sürtünme önleyici malzemelerin çok ince katmanları, belli bir miktarda, aşındırıcı partiküllerin gömülmesini sağlar. Bu partiküllerin boyutları yağ filmi kalınlığı yanında az kalır.

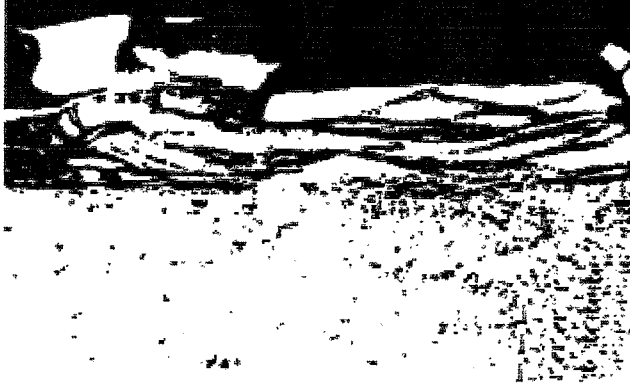
Çizelge 3.4 Abrazyona karşı metal dayanımları (Schiling, 1972)

Malzeme	Sertlik ( $\frac{kg}{mm^2}$ )
Yatak çeliği	700-950
Çelik	700-1000
Elektrolitik krom kaplı çelik	900
Semente edilmiş çelik	900
Nitrürlenmiş çelik	900-1250
Volfram karbür	1400-1800
TiC, SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , B <sub>4</sub> C gibi sert ametal veya kaplama	2000-2750

Hatırlanmalıdır ki, erozyon, bağıl hareket sırasında akışkan ile temas sonucu oluşur ve bir abrazyon aşınması şeklindedir. Katı moleküllerin bağıl hareketleri yüzeye paralel ise buna abrazyon erozyonu, eğer dik ise buna çarpma erozyonu denir.

### 3.2 Adhezyon Aşınması

Adhesif aşınma, karşılıklı yüzeyler kayarken ve temas eden pürüz uçları arasında basıncın plastik deformasyona ve adhezyona sebep olacağı değerlerde olduğu durumda meydana gelir. Adhezyon, temiz yüzeyler, oksitlenmenin olmadığı koşullarda, ve kayan yüzler arasındaki kimyasal ve yapısal benzerlikler tarafından desteklenir. Adhezyon, hareket devam ederken boyutları artan pürüz uçları arasında gerçekleşir. Birleşme yerlerinin en zayıf noktasında, genellikle bir yüzeyden diğerine metal transferi ile sonuçlanan, kırılmalar olacaktır (Şekil 3.3).



Şekil 3.4 Çeliğin adhezyon aşınması sonucu transfer olan partikülün yaptığı aşınma  
(Eyre, 1976)

Pürüz ucu sertliği arttığında, temas alanı azalacağı için aşınma azalır. Eğer pürüz uçları kimyasal olarak temiz ise aşınma artar çünkü, yapışma ve kaynama olma ihtimali daha fazladır; ve eğer aşınan çift karşılıklı olarak çözünebilir ise aşınma artar. Taşınan parçacıklar ve aşınma partikülleri çalışma sertleşmesine bağlı olarak daha da sertleşebilirler ve, bazı durumlarda, faz sertleşmesi meydana gelir. Bu abrazyon tarafından ileri aşınmaya sebep olur.

Aşınma oranını bazı önemli faktörlere bağlı olarak formüle edilmiştir. Aşınma sabiti K sürtünen çiftin, aşınma mekanizmasının değişmediğini kabul ederek (örneğin: hafif yükten ağır yüke geçiş olmadığında) özelliklerini belirtir. K aşınma partikülü oluşma olasılığını gösterir ve çeşitli malzeme kombinasyonları ve aşınma koşulları için  $10^{-2}$  ile  $10^{-9}$  değerleri arasındadır.

$$\text{Aşınma Hacmi} = \frac{K \cdot S \cdot P}{P_m} \quad (3.2)$$

Burada K = aşınma sabiti, S = kayma mesafesi, P = uygulanan yük,  $P_m$  = aşınan yüzeyin akma gerilmesidir. Bu yüzden ki K'yı aşınma deneyleri ile hesaplamak ve aşınma mekanizmaları ile ilişkilendirmek önemlidir.

Saf metallerin adhezyonu, onların katı eriyik oluşturma kabiliyetlerine bağlanmıştır. Örneğin kurşun çok düşük çözünebilirliğe sahiptir bu yüzden krom, kobalt, nikel ve demir çok iyi bir yüzey uygunluğu meydana getirirler. Fakat bazı kısıtlamalar vardır, özellikle düşük dayanımından dolayı kurşunu alaşımlarda kullanmak veya ince bir kaplama olarak kullanmak gereklidir. En iyisi metal malzeme karşısında kayan malzeme olarak polimer veya seramik

malzeme seçmektir. Birçok yüzey difüzyon uygulamaları kimyasal bulaşma yolu ile yapışkanlık ve kaynak yapma karakteristiklerini düşürmeyi amaçlar. Çözünürlük kavramı pratikte uygulanması zor bir kavramdır; çünkü sadece saf metaller için gerekli bilgi mevcuttur.

Metal adhezyonu (yapışması) ve transferi sert pürüz uçlarının (çelik) yumuşak (bronz) pürüz uçları üzerinde yarıklar oluşturması ile de oluşabilir. Metal partikülleri çelik yüzeydeki yüzey yivleri içine gömülür ve orda kalırlar. Bu, aslında gerçek adhezyon değildir, çünkü parçacıklar en azından başlangıçta buraya gevşek bir biçimde tutunmuşlardır. Çeliğin artan sertlik ve yüzey pürüzlülüğü, kesme ve yüzey pürüzleri içinde mahsur kalması ile partikül oluşuma eğilimini artırır. Adhezyon ve transferin derecesi daha sert yüzeydeki yivlerin açısı ile değişir. Endüstriyel alanda kullanılan metal ve alaşımlarda nadiren adhezyon görülür (örneğin gri dökme demirde).

### 3.2.1 İçten Yanmalı Motorda Adhezyon Aşınması

Motor içerisinde, özellikle yüksek sıcaklık altında sınır yağlama şartlarının olduğu bölgelerde adhezyon aşınmasına karşı hassastırlar.

Adhezyon aşınması en temel aşınma tipidir. Bu aşınma, metal-metal arası pürüz uçlarının direkt teması ile oluşan mikro kaynamaların ve birleşmelerin kesilmesine bağlıdır. Kesilmiş küçük aşınma parçaları karşı sert yüzeyde sabit olarak kalabilirler yada aşınma partiküllerinin oluşumu sırasında ayrılıp uzaklaşabilirler. Bu partiküller çekiçleme yada oksidasyon ile sertleştirilmişlerdir.

Kazıma, çentik oluşumu vs. gibi durumlarla meydana gelen aşınmaların incelenmesinde, bunların adhezyon mu yoksa abrazyon kaynaklı mı olduğunu söylemek zordur. Ama yağlayıcının bulunmaması ile (ilk çalışmada, yağ filminin bozulması yada yağlayıcıyı besleme hatası gibi) metal-metal arası sürtünmelerden dolayı oluşan adhezyon aşınması, her zaman lokal bir ısınmayla birlikte oluşur.

Adhezyon aşınması ile oluşmuş hasarlar önem sırasına göre aşağıdakiler gibidir:

- a- **Çizgisel Aşınma:** Bazıları çizgisel aşınmanın, hareketlerin ani durmasına yol açmayan lokal bir hata olduğuna inanırken, diğerleri bunun sürtünen yüzeylerdeki bağlı

hareketin, kaynama yada harekete karşı oluşan çok güçlü bir direnç ile bölgesel olarak durduğuna inanmaktadırlar. Aslında özellikle yüksek sıcaklıklarda iki metal yüzeyin ani teması sonucu oluşan çizgisel aşınma, pürüzlü yüzeylerin kaynamasının mikroçizgisel aşınmasından, iki yüzeyin kaynamasına kadar olan bütün oluşumları içerir.

- b- Kazıma:** Kazıma, bölgesel bir erime olmaksızın kayan iki yüzey arasında kuru kaynama ile oluşan bölgesel bir hasardır. Bu yüzden kazıma, yağ oksit film yada bir metal yağlayıcı reaksiyon ürünü olan koruyucu filmin bozulmasıdır. Çevremizdeki atmosfer bu filmlerin oluşumunda rol oynar. Örneğin İngiltere’de, kazıma, bölgesel kuru fazda kaynama anlamına gelir. Buna karşın Amerika’da kazıma genellikle abrasif etkileri içerir.
- c- Çizilme:** Kayma yönünde oluşan küçük ve ince çizgilerin oluşumuna verilen addır. Çizilme, adhezif ve/veya abrasif etkileri içeren en küçük hasardır.

Bu terimlerin gerçek anlamları her zaman güç anlaşılmıştır ama bunların hepsi bir etkiden çok aşınmanın bir sebebidir. Sert pürüzlere sahip olan A metali ile daha yumuşak olan B metali arasındaki adhezif partikülleri aşağıda bahsedilen iki proses sonucu oluşabilir;

- a- Şiddetli aşınma sonucu,** metal transferi çok büyük ise yumuşak yüzeyden kopan aşınmış partiküller sert pürüzlerin önünde oluşum gösterir.
- b- Adhezif özellikteki birleşmelerde** meydana gelir. Sürtünme sonucu ani olarak kırılmak yerine, onları çevreleyen metalin plastik deformasyonunu takip eder. Daha sonra kayma hareketi, deforme olmuş birleşmelerin kayma yönüne bağlı olarak hafif eğimli bir yönde kesilme olmasına yol açar. Kesilen metal yüzeyden ayrılır ve yerinden çıkmış metal kama halini alır.

Bazı araştırmacılar adhezif aşınma oranını sürtünme esnasında oluşan değişik parametrelere bağlamaya çalışmışlardır. Bunu da aşağıdaki hacimsel adhezif aşınma oranı bağıntısı ile ifade etmişlerdir.

$$v = \frac{k}{3} \frac{P - x}{Hv} \quad (3.3)$$

Burada;

$k$  : Sürtünme Katsayısı

$P$  : Uygulanan Kuvvet

$x$  : Kayma Uzaklığı

$H_v$ : Yüzeylerin Sertliği

Adhezyon sonrası kopan partiküllerin ortalama çapı tahmini olarak hesaplanır. Yarım küre şeklindeki partiküller sadece elastik enerjinin ( $E_e$ ) adhezyon enerjisinden ( $E_a$ ) büyük olduğu durumlarda kopar.

$$E_e \geq E_a$$

$$E_e = \left( \frac{\nu^2 \sigma_y^2}{2E} \right) \left( \frac{\pi d^3}{12} \right) \quad (3.4)$$

$$E_a = W_{ab} \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) \quad (3.5)$$

$$d \geq \frac{6EW_{ab}}{\nu^2 \sigma_y^2} \quad (3.6)$$

$d$  : Aşınan Parçaların Çapı

$E$  : Young Modülü

$W_{ab}$ : Temas Eden Metalin İş

$\nu$  : Poisson Oranı

$\sigma_y$  : Metalin Eğilme Gerilimi

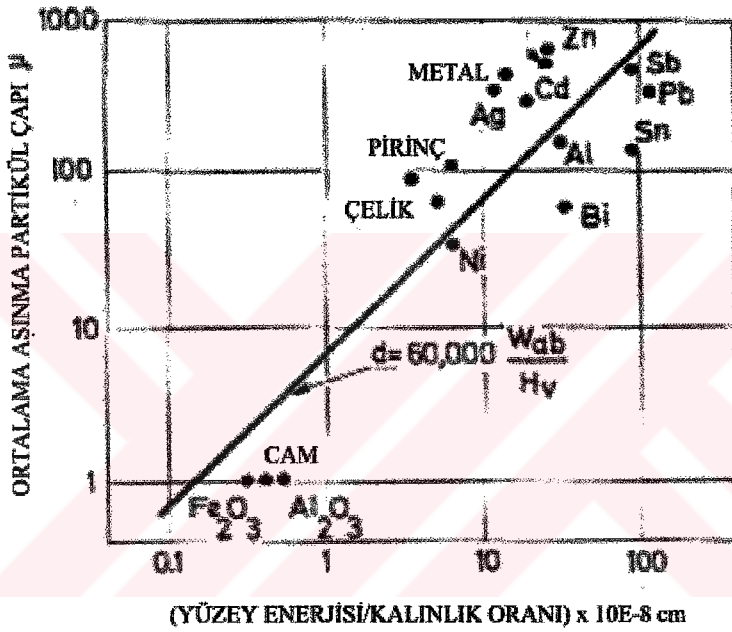
Birçok malzeme için  $\nu^2=0.1$ ;  $\sigma_y$ ,  $h_v$ 'nin  $\frac{1}{3}$ 'ü kadar ve  $\frac{\sigma_y}{E}$  oranı bütün malzemeler için sabit olup değeri  $3 \cdot 10^{-3}$  civarındadır. Serbest partiküller oluşumu için durum  $d \geq 60000 \frac{W_{ab}}{H_v}$  olur.

Bunun sonucunda adhezyon aşınması oluşan partiküllerin maksimum çapı adhezif iş ve sertlik arasındaki orana yaklaşık olarak eşit olmaktadır.

Aynı şekilde transfer olan partiküllerin yarıçapları, aşağıdaki denklemin kabulünden yola çıkılarak hesaplanmaktadır:

$$d \geq 24000 \frac{\gamma_a}{H_v} \quad (3.7)$$

$\gamma_a$ : Metalin yüzey enerjisi



Şekil 3.5 Partiküllerin ortalama çapları (Adhezif iş ve sertlik ile neredeyse orantılıdır)  
(Schilling, 1972)

Adhezyon aşınmasını engellemek için, formüllerden de anlaşılacağı gibi krom, çimento ve nitrat katılmış çelik ve oksitli seramikler gibi sert malzemelerin kullanılması karşımıza bir avantaj olarak çıkmaktadır.

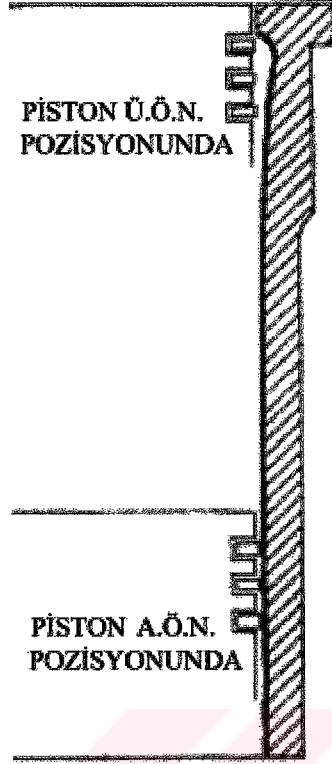
Birbirleriyle zayıf etkileşim gösteren malzeme çiftlerinin kullanılması da yararlı olmaktadır.

Yağlayıcı kullanırken, yağ filmi dayanıklılığı dikkate alınmalıdır. Bu yağlayıcılar akışkan yada yarı akışkan durumlarda kalın film oluşturacak yeterlilikte viskoz olmalı ve sınır yağlama şartlarında metal-metal arasındaki teması önlemek için yük taşıyıcı bazı katkıları içermelidirler.

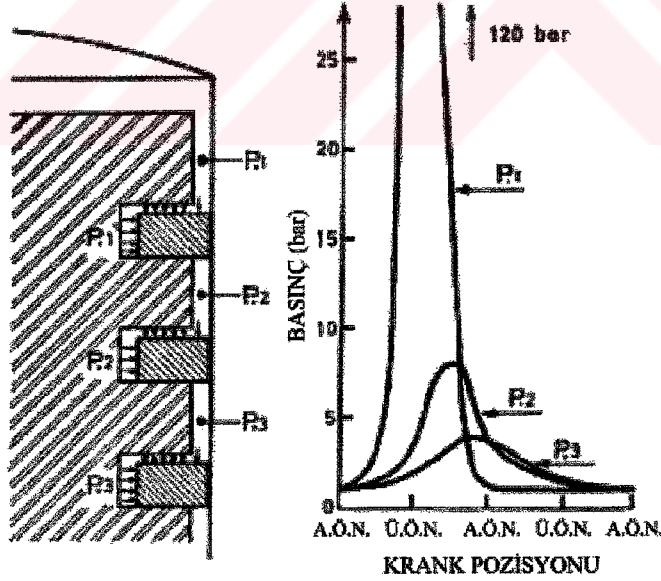
Adhezyon aşınması benzinli ve Dizel motorların her ikisi içinde geçerlidir ve birkaç küçük durum ile birbirlerinden ayrılırlar. Aşınma mekanizmaları her iki motor için de aynıdır. Adhezyon aşınması temel olarak yüksek sıcaklıkta çalışmada, yüksek hızlarda ve yüklerde ortaya çıkar. Bu tip aşınma; dayanımı sağlayan yağ filminin iki yüzeyi ayıramadığı durumlarda direkt metal-metal arasında temas sonucunda meydana gelmektedir. Segman-piston-silindir gömleği bölgesi, sürekli ve etkili bir yağlamanın en zor oluşturulabileceği bölgedir. Çünkü bağımsız yağlama sistemlerin sahip büyük Dizel motorlar hariç, yağlama, biyel başlarındaki yağ akıtma yerlerinden sıçratılan yağdan etkilenir. Ayrıca yağ miktarı segmanlar, özellikle de yağ segmanı ile sınırlandırılmıştır. Mükemmel hidrodinamik yağlama nadiren elde edilir. Bu yüzden adhezyon aşınmasının temel olarak üst ve alt ölü noktada gerçekleştiğini kabul etmek mantıklıdır, zaten silindir gömleğinde aşınma kesitleri özellikle bu noktalarda göze çarpmaktadır.

Korozyon ve abrazyon aşınmalarının yokluğunda, silindir gömleği aşınma kesitlerinin görünüşleri Şekil 3.6'da gösterildiği gibidir. Beklenmedik saban izine gibi çizgiler, üst segmanın üst ölü noktada olduğu durumda ortaya çıkar ve hızlı bir biçimde sık sık orjinal silindir gömleği kesitine benzeyen bir kesit şekli alır.

Aynı zamanda, en üstteki segmanın aşınması her zaman diğer segmanlardan daha fazladır. Eğer segmanlar aynı biçimde dizayn edilmişse aşınma diğer segmanlara göre 5 ila 10 kat daha fazla olur. Bu asimetrik aşınma (profil) kesiti, Üst Ölü Nokta ile Alt Ölü Nokta arasındaki sürtünme yüzeyi basıncı ve sıcaklık farkları ile açıklanır. Üst Ölü Noktada, üst segman sıkıştırma basıncının büyük bir kısmına daha sonra da yanma basıncına maruz kalır. Bu sırada ikinci segman birinci segmana oranla akış aşağı basıncının sadece küçük bir kısmına maruz kalır. Bu olay Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Adhezif silindir aşınmasının tipik şekli (Schilling, 1972)



Şekil 3.7 Dizel motorda piston segmanları üzerindeki basınç (Schilling, 1972)

Bunun yanında, yanma basıncının hızlı yükselmesinin dinamik etkileri üst segmanda şok etkisi yapıp onun şeklini bozabilir ve spesifik yükleri daha da artırır. Aynı zamanda, silindirin üst ve alt taraflarındaki sıcaklık farkları  $100^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar varır. Bu da şekil kesitini yağlama şartlarına,

yüzeylerin mekanik dayanımına ve silindir gömleği ve segmana zarar veren heterojen genişlemelere neden olan ısıl bozulmalara etki ederek kötüleştirir.

Çalışan bir motorda, aşınma mutlaka daha önce bahsettiğimiz aşınma tipleri ile sınıflandırılır ve bu yol şartlarının sağlandığı test ortamında da geçerlidir. Bu nedenle, aşınmaya etki eden değişik parametrelerin incelenmesi sadece adhezyon aşınması ile sınırlanmamıştır ayrıca abrazyon ve korozyon aşınmalarını da içermektedir.

Katmanlarına ayrılma prosesinde, birçok şart altında yapılan gözlemlerde levhasal partiküllerin, abrazyon (metal kıymıkları) karakteristiği veya adhezyon (boy kalınlık oranı 3/1 olan partiküller) karakteristiği göstermediği, fakat boyu çoğunlukla kalınlığını 10 kat geçen levhasal partiküller olduğu saptanmıştır (Suh, 1977). Silindir gömlekleri deformasyon ve kırılma ile bozulabilirler ve katmanlarına ayrılma aşınmasını açıkça karakterize eder. Bu tip aşınma motor aşınması bağlamında genellikle 'kazıma' olarak adlandırılır.

Şekil 3.8; çelik üzerinde, elmas bir ucun yarık oluşturmak sureti ile katmanlarına ayrılma (kazıma) aşınmasına sebep oluşunu göstermektedir. Partikül kalınlığına göre karşılaştırıldığında çok değişik oranlarda, düz ve halka şeklinde kıvrılmış artık partiküller ortaya çıkmıştır. Deformasyonun etkisi lokaldir ve bazen bu levhaların çelik üzerinde bulunduğunu görmek mümkündür.



Şekil 3.8 Katmanlarına ayrılma (adhezyon) aşınması (Eyre, 1976)

### 3.3 Titreşim (Fretting) Aşınması

Bu tip aşınma ufak bir genliğe sahip titreşimli bağıl hareket halindeki iki yüzey arasında meydana gelir. Titreşim aşınmasının başlıca karakteristiği, kırmızımsı kahverengi yüzey oluşumu ve 'cocoa' adı verilen aşınma partiküllerinin oluşumudur. Küçük genlikli titreşimli hareketten dolayı (130µm) yüzeyler devamlı temas halindedir ve bu yüzden bu aşınmadan dolayı oluşacak ürünlerin engellenmesi çok zordur. Partiküllerin yakalanması (tutulması), boş alanların dolması tıkanmanın oluşumu ve yağlamanın engellenmesi sonucu oluşur. Titreşim'e maruz kalan demir metallerde, yüzeylerde kırmızı/kahverengi benekler oluşur, ve sert demir oksit partiküllerinin dönerek parlatma kalitesine göre komşu alanlar parlatılmıştır.

Olay sırasında üç temel karakteristik meydana çıkar:

1. Mekanik hareket, büyük bir ihtimalle metali tutarak yüzeydeki oksit filminin bozulmasına yol açar. Bu da atmosferde tekrar aktif hale geçebilir ve bozulmadan sonraki yarı çevrim sırasında, yarı çevrim bitiminde tekrar bozulmak üzere, hızla tekrar oksitlenebilir.
2. Yüzeyde ince olarak bölünmüş metal partikülleri taşıma ile veya, temas noktalarındaki kaynak oluşumları sonradan orijinal ara yüzeyden farklı bir yüzeyde, kesme veya yerel yorulma ile temizlenirler. Atmosferin bu süreçte, yorulma sırasında korozyon yorulmasının bir elementinin işin içine girmesi dışında bir etkisi yoktur.
3. 1.'nin sonucunda oluşan oksit partikülleri veya 2.'nin sonucunda oluşan oksitlenmiş metal partikülleri yüzeye zarar vermeye devam eden aşındırıcı bir tozdur.

Titreşmenin tek bir çözümü yoktur fakat, titreşim aşınması titreşimin olduğu yerde meydana gelir ve problem titreşimin kaynağını ortandan kaldırarak çözülebilir. Temas alanını yağlayıcı ile kaplamak sürtünme katsayısını düşürür ve bu adhezyonu da düşürür. Aynı zamanda demir oksitlerin oluşumunu engelleyen oksijende yok edilebilir. Bir takım kaplamalar, özel titreşim problemlerine çözüm olmuşlardır. Bu kaplamalar genellikle adhezyonu düşürür ve önlerler.

### 3.4 Korozyon Aşınması

Büyük çaplı silindir gömleklerindeki aşınmaya kazıma, abrazyon ve korozyonun sebep olduğu gösterilmiştir. Korozyondan sonra oyuklu bir yüzey oluşma eğilimi vardır. Karbürün kırılmasını takip eden ferritin seçilebilir korozyonundan dolayı perlitin lamelli yapısı açıkça görülebilir (Şekil 3.9). İnşaatlarda en çok kullanılan malzeme olan gri dökme demirin korozyon dayanımı, silikon miktarını azaltıp krom, bakır, vanadyum ekleyerek artırılabilir.



Şekil 3.9 Gri dökme demir silindir gömleğinde yüzeydeki korozyon ve abrazyonun görünümü  
(Eyre, 1976)

1950'lerde yüksek sülfürlü yakıtların kullanılmaya başlanması ile dökme demir gömleklerindeki aşınma miktarında artış kaydedilmiştir. Bu aşınma sülfürik aside bağlanmıştır. Demire %0.2 oranında vanadyum katılması ile aşınma önemli ölçüde azalmıştır. Aynı zamanda asitlik problemlerini azaltan, serbest alkaliler içeren gelişmiş yağlayıcılar üretilmiştir. Genellikle modern motorlarda korozyon ciddi bir problem değildir ve uzun çalışma ömrü sonunda sadece gömleklere belli olur. Korozyon, ne üst ölü noktada ne de alt ölü noktada, en çok orta kısımda görülür.

Korozyondan dolayı oluşan aşınma miktarındaki artış, yağlayıcıların kirlendiği, özellikle deniz suyu ile kirlendiği bir çok durumda meydana gelebilir. Beyaz metal yataklarda korozyon sonucu kalay oksit oluşumu, yatağın dayanımı önemli ölçüde düşürebilir. Sert oksitlerin varlığı abrazyon aşınmasını artırabilir.

### 3.4.1 İçten Yanmalı Motorlarda Korozyon Aşınması

Bu tip aşınma, atmosferde bulunan bazı ürünlerin (hava, nem, CO<sub>2</sub>) veya yağlayıcı içinde oksidasyon, hal değişimi gibi nedenlerle oluşan ürünlerin kimyasal saldırısı sonucu oluşur. Dizel motorlarda yakıt içerisinde bulunan sülfürün yanması korozif sülfür türevleri meydana getirir (SO<sub>3</sub> ve sonra H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Benzinle çalışan motorlarda, benzin içerisinde tetraetil kurşunun bulunması, yanma sırasında belli bir miktarda korozif türev oluşturur.

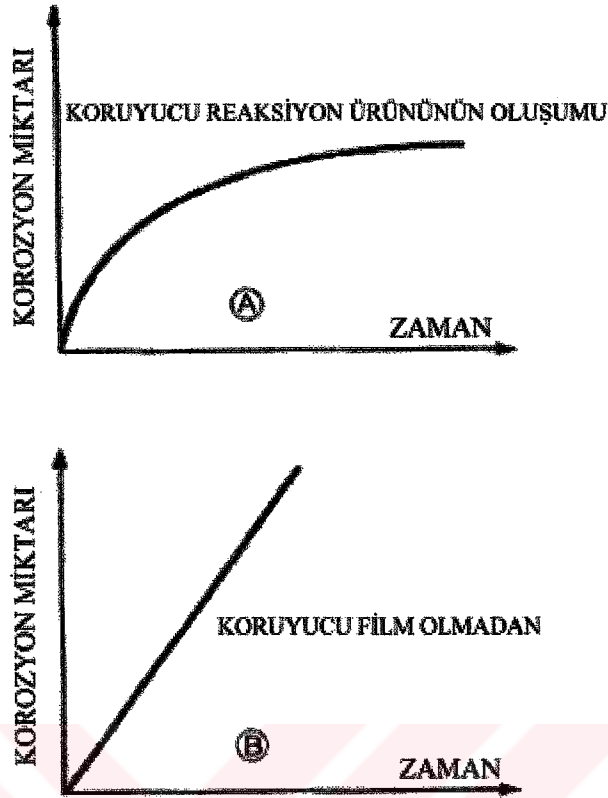
Bunlar motordaki korozyon aşınmasının nedenleridir. Fakat bu aşınmanın mekanizmasının analiz edilmesi oldukça zordur. İlk olarak yüzeyler korozif saldırıya uğrarlar. Bu korozyon saldırısı ilk etapta çok hızlı olurken daha sonra yüzeylerde koruyucu bir filmin oluşumu sonucu bu oran düşer. Bu koruyucu film metal oksit, organik tuzlar, sülfid ve klorid olabilir. Bazı metaller için, alüminyum gibi, koruyucu film tabakası belli bir kalınlığa eriştiği zaman korozyon aşınma reaksiyonu durur. Bu durum için reaksiyon oranı Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

Bazen kimyasal saldırılar, sabit reaksiyon hızını belirsiz bir süre için sürdürürler ve reaksiyon ürünleri sıvı, gaz yada kırılğan yapıya sahip, yapışkan olmayan esnek gözenekli katılardır.

Korozyon aşınmasındaki ikinci adım ise, reaksiyon ürünlerinin sürtünme sonucu yüzeylerden uzaklaşması ile meydana gelir. Bu hal şartında yüzeyler çıplak kalır ve yeni bir korozif reaksiyonla aşınma devam eder.

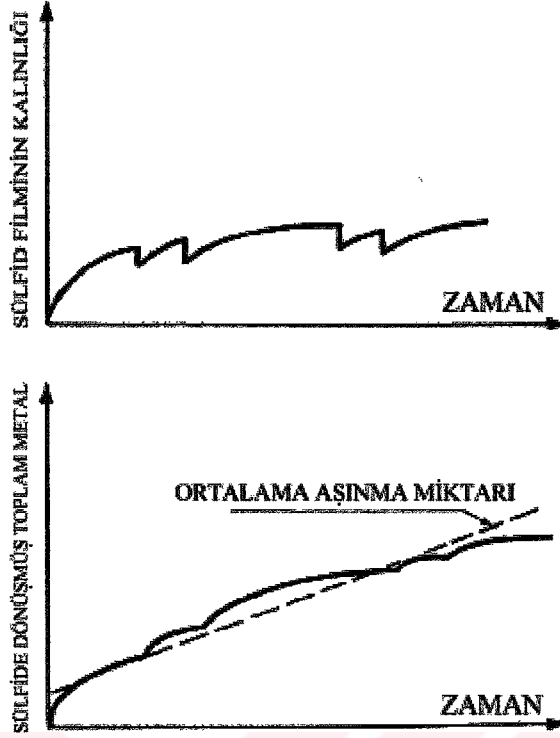
Bir çok durumda korozyon ürünleri ayrıldıkları yüzeylerden daha serttir ve oluşturdukları film tabakası incelinceye kadar aşınmaya karşı devamlılık gösterir. Kritik kalınlığa erişildiği takdirde sürtünme kuvvetinden dolayı yüzeyden ayırma işlemi devam eder ve proses tekrar edilir.

Bazı durumlarda ise korozyon ile oluşan film tabakası düşük kesme kuvveti olan yumuşak yapıdaki (metal klorid, sülfid ve fosfat) malzemeleri içerir. Bu ürünler sınır yağlama için uygun olup, düşük aşınma oranları gösterirler. Bu, yumuşak korozif aşınma tipi olup aşırı basınçlı katık kullanılan yağlamadan sonra gerçekleşmektedir.

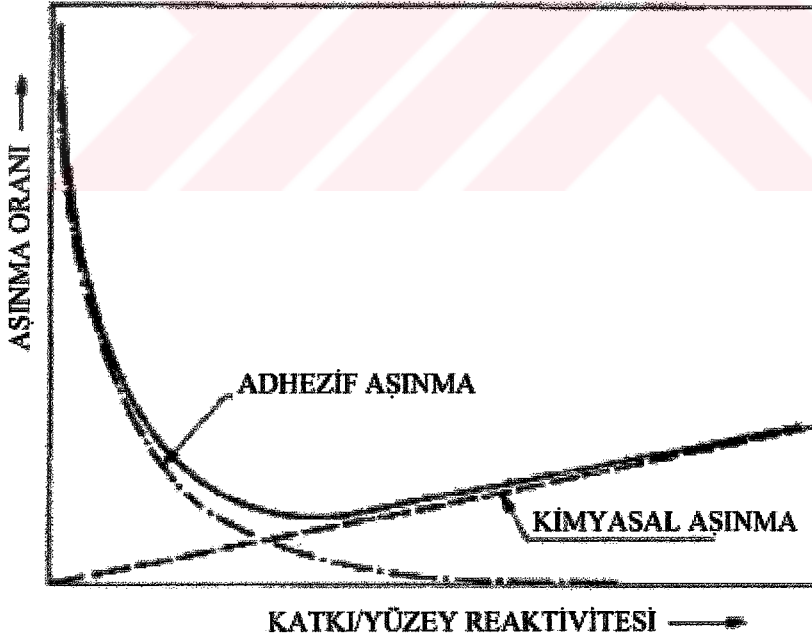


Şekil 3.10 Zamana bağlı korozyon aşınması tipleri (Schilling, 1972)

Reaksiyon ürünlerinin film kalınlıkları ve aşınma oranlarının zamana karşı değişimi Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Bu durumda, korozyon ve adhezyon aşınmaları arasında bir bağıntı vardır. Korozyon filmi ne kadar kalın olursa metal metal arası temas ve sonradan oluşacak adhezyon aşınması olasılığı düşük olur. Bununla birlikte, korozif filmin uzaklaştırılması korozyon aşınmasını teşvik eder. Şekil 3.12'de ise, adhezyon ve korozyon aşınmalarının yüksek basınç veya aşınma önleyici katkıları gibi korozif elemanların etkinliğine bağlı olarak değişimi verilmiştir.



Şekil 3.11 Yumuşak korozyon aşınması (Schilling, 1972)



Şekil 3.12 Adhezyon aşınması ile kimyasal aşınma arasındaki ideal denge diyagramı  
(Schilling, 1972)

Katkılar ve yüzeyler öyle seçilmelidir ki sürtünme, optimum aşınma sınırlarındaki durumlar içerisinde oluşsun.

Motorlar, düşük veya yüksek çalışma koşullarının, yakıt içerisindeki sülfür ve yağlama yağının oksidasyonu ile asit ürünlerinin oluşumunun bir sonucu olarak, korozyon aşınmasına karşı çok hassastırlar. Bu anlamda en kritik parçalar, yüksek sıcaklık dalgalanmaları altında çalışan parçalardır. Bunlar segmanlar, silindirler ve subaplardır. Yüzeyler, yataklarda kullanılan sürtünmeyi azaltıcı alaşımlar olan reaktif metallerle kaplanmıştır.

Genellikle yağlayıcı, yüzeyi korozyon aşınmasına karşı korumak ve bu tip bir aşınmayı yok etmek için bir arabolucu görevi görür. Asit ürünleri, bazik özellikteki deterjan katkıları tarafından nötralize edilir. Bunlara örnek olarak, alkalın ve organik katkıları gibi organo-tuz olan fenol tuzu ve sülfonatları verebiliriz. Aynı zamanda yağın oksidasyonu, kurşun ditiyosfat gibi antioksidan katkıları sayesinde azaltılır veya yok edilir.

### 3.5 Yorulma Aşınması

Bu tip aşınma yorulma limitinden yüksek gerilmelere tekrar tekrar maruz kalan yüzeylerde oluşur. Bu aşınma türü en çok bilyeli yataklarda, düz yataklarda ve dişlilerde meydana gelir. Hasar yüzeyde veya yüzeyin altında görülebilir fakat oyuklu bir yüzey oluşur. Malzemenin yüzeyindeki korozyon veya gövdesindeki kusurlar erken bozulmalara neden olabilir ve bunlar oldukça iyi belgelenmiştir. Yorulmanın kanıtı oldukça belirgindir ve ışık yansıyan yorulma çizgileri formundadırlar ve çıktıkları nokta yorulma başlangıcını gösterir (Şekil 3.13). Yorulma çizgileri, kırılma başladıktan sonra veya eğer korozyon ürünlerinden dolayı görülmeleri zorlaşıyorsa, birbirine sürtünmeye devam eden yüzeylerde yorulma çizgileri çok açık olmayabilir.



Şekil 3.13 Yorulmaya maruz kalan yatağın görünümü (Eyre, 1976)

Yataklarda malzemenin metalürjisi, özellikle yüzeyde ve yüzeye yakın yerlerde yorulmayı önlemek açısından can alıcı bir rol üstlenir. Yüzey işlemleri sertliği artırarak ve yüzeyi artık basma gerilmesi durumuna koyarak yorulma dayanımını artırır. Bu yüzey işlemleri dikkatle uygulanmalı ve maksimum alt-yüzey gerilmesi derinliğini geçecek kadar derin olmalıdır ki ara yüzeyde bozukluk olmasın.

### **3.5.1 İçten Yanmalı Motorlarda Yorulma Aşınması**

Yüzeyde kesiklerin meydana gelmesi bozulmaların başlangıcıdır. Daha sonra bu kesikler yüzeyde ilerleyerek kraterler oluştururlar. Bu kraterler pitting yani oyuk oluşumu olarak adlandırılır. Bu bozulmaların daha ileriki seviyelerinde, daha büyük parçalar yüzeyden ayrılır. Buna dökülme (spalling) yada ufalanma (flaking) adı verilir. Şekil 3.14'teki mikro fotoğrafta yüzey oyukları görülmektedir.

Yuvarlanma, yuvarlanma-kayma ve sadece kayma hareketleri altındaki, sıkıştırma ve kesilme dirençlerine göre daha düşük teğetsel dirence sahip gevrek malzemelerde çatlamlar teğetsel gerilimin maksimum olduğu noktada oluşur. Yüzey çatlamları kayma yönüne dik derin yarıklar şeklinde oluşur. Yorulma aşınmasının etki ettiği malzemeler seramikler, oksitli seramikler, karbürler, nitritler ve metalik oksitlerdir. Bu malzemeler motorlarda sıkça kullanılmaktadır. Örneğin silindirler ve segmanlarda kullanılan krom, subap yuvalarında kullanılan oksitli seramikler.



Şekil 3.14 Tipik yorulma çatlakları ve pitting oluşumu [x 150] (Schilling, 1972)

En temel yorulma aşınması olan yüzey çatlakları motorda en hassas noktalar olan kam ve sübaplarda meydana gelir. Bu olay aynı zamanda bilyalı yataklarda da meydana gelir. Bu mekanizmalar elastohidrodinamik yağlama ve Hertzian teması prensiplerine dayanarak çalışır. Pitting oluşumu ve dökülmeler sonucu ortaya çıkan yorulma dayanımı, düşük kesme dayanımına sahip ve aşırı yüklemeler altında çalışan yatak yüzeyleri için de hesaba katılmalıdır.

Yorulma aşınması sonucu oluşan parçaların boyutları adhezyon aşınması sonucu oluşan parçaların boyutlarından daha büyüktür. Bunların çapları 100 ila 1000 $\mu$  arasında değişmektedir. Dolayısı ile sürtünme yüzeyleri arasında abrazyon aşınmasına sebep olabilirler.

Bozulmaların önüne geçilmesi konusu, doğru yağ seçimi kadar yüzey metalürjisininde altında yatar. Yorulma dayanımına sahip malzemeler ve yüzeydeki ısıl işlemler, temas noktalarının dayanıklılığını karakterize eder. Ayrıca EHD (elastohidrodinamik) yağlama koşullarını iyileştirerek yağlamaya müdahale edilir. Aynı zamanda malzemenin elastikiyet sabitinin değerini düşürmekte mümkündür.

Çizelge 3.5 Yorulma ömrüne katkıların etkisi (Schilling, 1972)

Yağ Kompozisyonu	Bağıl Yorulma Ömrü
Temel yağ	2,18
Temel yağ + % 2.5 sülfürlenmiş yağ	2,05
Temel yağ + % 1 amin yağı	0,71
Temel yağ + % 2.5 klorlanmış parafin	0,30
Temel yağ + % 1 oleik asit	0,26
Temel yağ + % 1 dialkil fosfat	0,10
% 100 dialkil fosfat	0,11

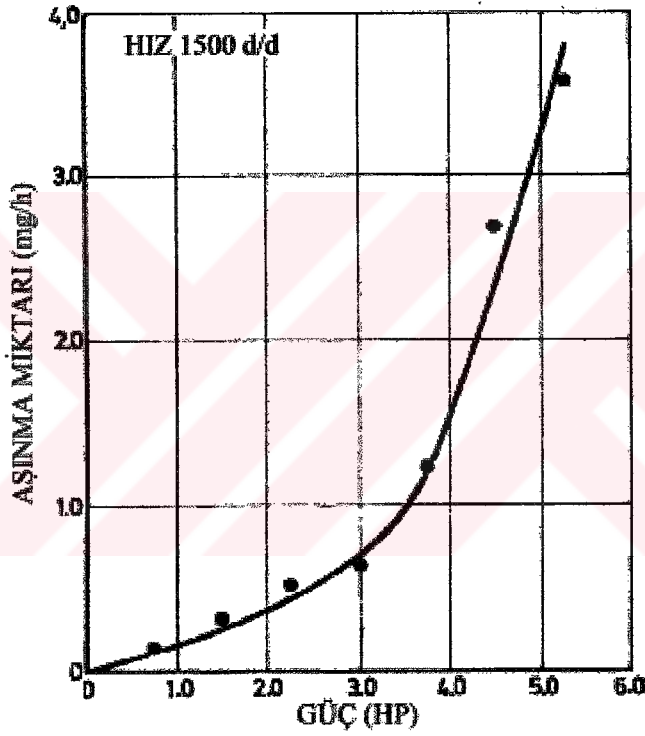
Katkıların yorulma aşınması üzerinde çeşitli etkileri vardır. Bazı koşullar altında molibden disülfür yararlıdır. Fakat Çizelge 3.5'te de gösterildiği gibi organik yağlar, yüksek basınç katkıları ve dialkil fosfat zararlıdır.



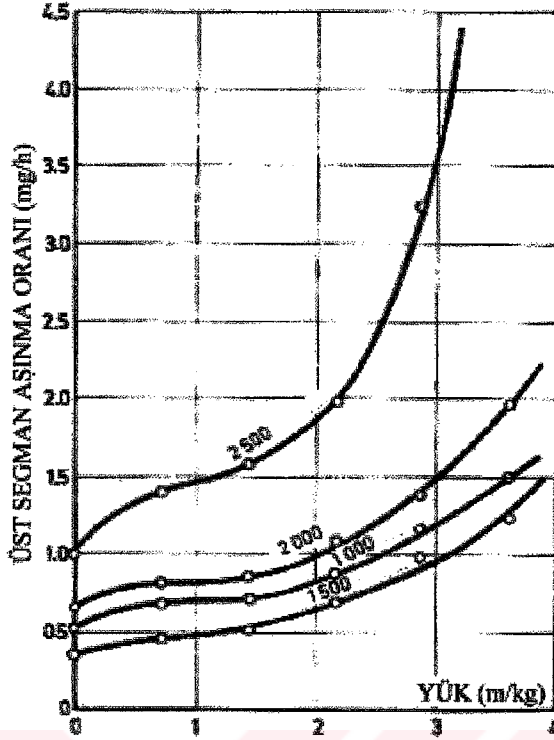
#### 4. MOTOR ÇALIŞMA KOŞULLARININ AŞINMAYA ETKİSİ

##### 4.1 Motor Gücü Ve Ortalama Efektif Basınç

Motor gücünün veya ortalama efektif basıncın artması sonucu ortaya çıkan daha fazla enerji, sıcaklıkların yükselmesine neden olur. Şekil 4.1'deki sabit hızda çalışan Petter AV 1 Dizel motorunda, Şekil 4.2'de ise değişik hızlarda çalışan benzinli tek silindirli Petter AV 1 motorunda yükün aşınmaya olan etkisi görülmektedir. Benzer yükler ve hızlarda aynı motor dizaynı ile birlikte maksimum yanma basınçlarını korumak şartıyla aşınma benzin motorunda Dizel'dekine oranla daha azdır.



Şekil 4.1 Petter AV 1 motorunda motor yüküne bağlı olarak segman aşınması  
(Schilling, 1972)

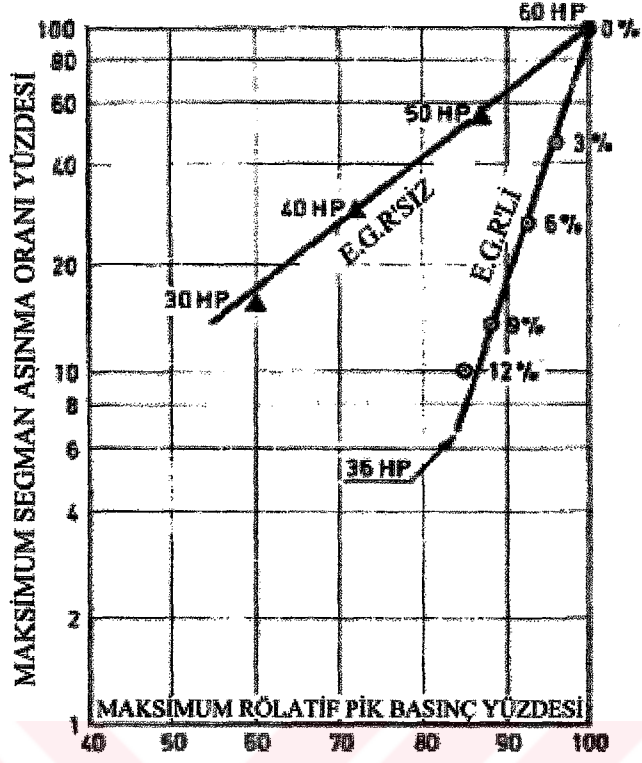


Şekil 4.2 Tek silindirli benzin motorunda motor yüküne bağlı olarak segman aşınması (Schilling, 1972)

#### 4.2 Anormal Yanma

Anormal yanma piston, segman silindir çeperlerinin olduğu kadar çevrimin de sıcaklığını yükseltir. Bu da ani basınç yükselmelerine neden olarak sınır yağlama şartlarını kötüleştirir ve adhezyon aşınmasını fazlalaştırır. Örnek olarak, benzinle çalışan bir motorda üst segmanın aşınma oranı hafif vuruntu için 3.6 mg/h'den orta dereceli vuruntu olan 17 mg/h'a hatta ağır vuruntu olan 98 mg/h'a çıkabilir.

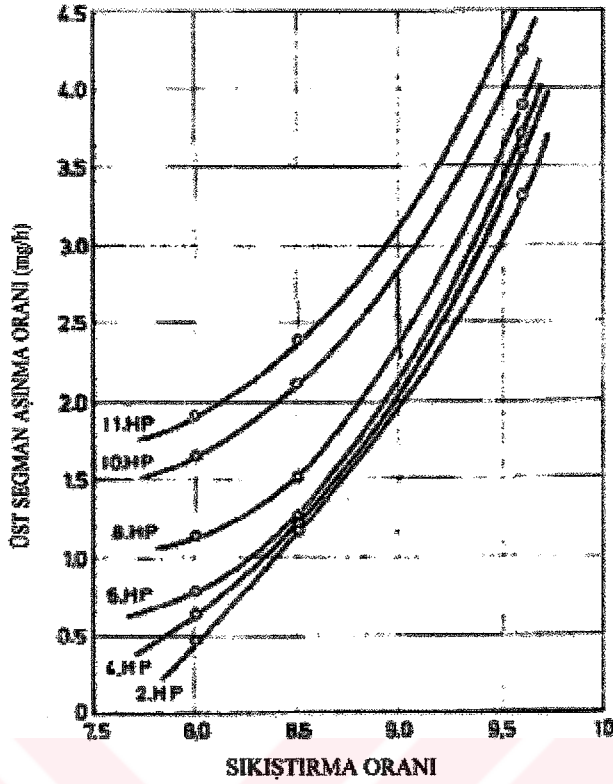
Benzer şekilde, normal benzin motoru yanma şartları altında çalışan üst segman 0.56 mg/h'luk bir aşınma oranına sahiptir. Bu aşınma oranı, emme havasındaki tortuların yayılması ile oluşan tıkrıtı (gürültü) ortaya çıktığı zaman 0.56'dan 36 mg/h'ya çıkar. Tıkrıtı ortadan kalktığı zaman aşınma eski değerine geri döner.



Şekil 4.3 Pik yanma basıncının fonksiyonu olarak segman aşınması (Schilling, 1972)

### 4.3 Sıkıştırma Oranı

Eğer soğutma sıvısı sıcaklığı, motorun korozyon aşınmasına yol açan şartlar altında çalışmadığı sıcaklıkta ise, sıkıştırma oranındaki herhangi bir artış, adhezyon aşınmasında benzer bir yükselmeye yol açacaktır. Yanma sonu basınçlarının sıkıştırma oranına bağlı olarak artar. Şekil 4.4 tek silindirli benzinli bir motordaki dökme demir üst segmanın aşınma oranındaki değişim ile sabit hızda değişik yüklemeler için sıkıştırma oranı değişimini göstermektedir.

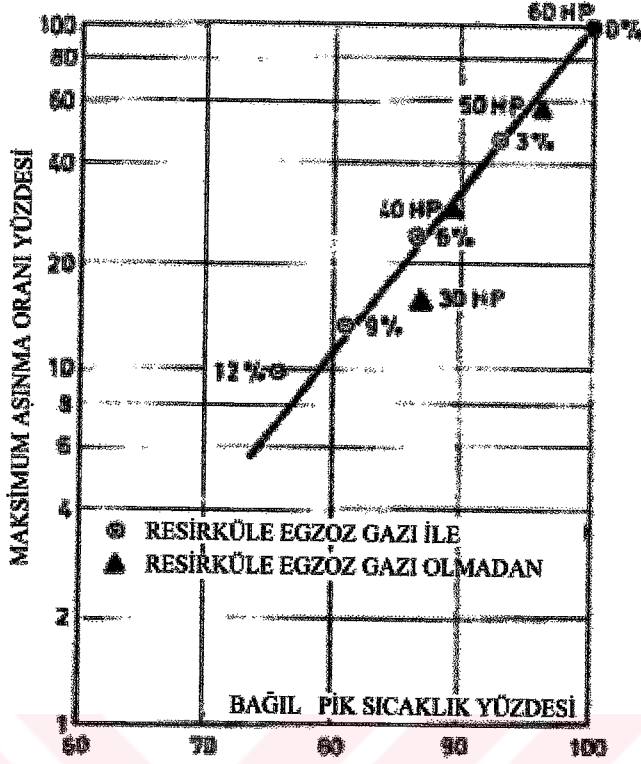


Şekil 4.4 Tek silindri motorunda sıkıştırma oranının üst segmana etkisi (Schilling, 1972)

#### 4.4 Sıcaklık

Sıcaklık faktörü aşınmada oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Sıcaklığın artması ile birlikte bilhassa üst segman bölgesinde yağlama yağı viskozitesinin düşmesi, yağ film kalınlığının incilmesi, metal yüzeylerinde gerek kesme kuvvetlerinin azalması ve gerekse sertlik değerlerinin düşmesi, dolayısı ile pürüzlerdeki kaynama kabiliyetinin artması özellikle kuru sürtünme şartında adhezyon aşınmasını hızlandırır. Sıcaklık artışı ayrıca temas yüzeylerinin yapışması, piston sıkışması ve hatta silindir ve pistonlar arasında genleşme farkının sonucu olarak boşlukların azalması ile birlikte yapışmaların olması gibi daha büyük tehlikelere de yol açar.

Şekil 4.5'te, benzinle çalışan V-8 bir motorda üst segmanın adhezyon aşınma oranının üstel fonksiyonuyla maksimum çevrim sıcaklığı gösterilmiştir. Bu olayda uç sıcaklık noktasındaki artış ya egzoz gazının geri dönüşümünü yapmadan motor yükünün artırılması yada sabit yükte geri dönüşüm oranının azaltılması ile oluşur. Aşınmanın ilerlemesi her iki durumda da aynıdır.

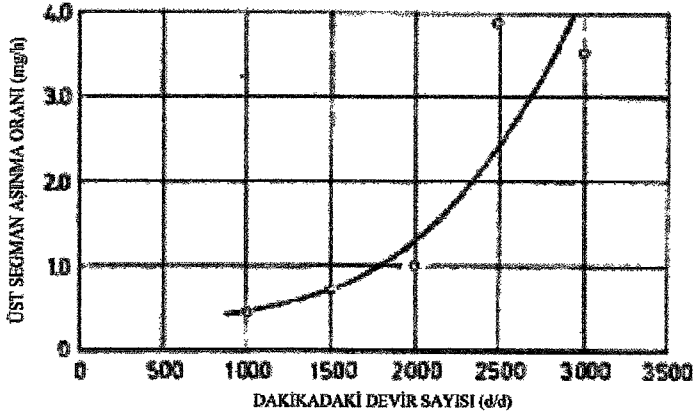


Şekil 4.5 Pik sıcaklığın fonksiyonu olarak motorda segman aşınması (Schilling, 1972)

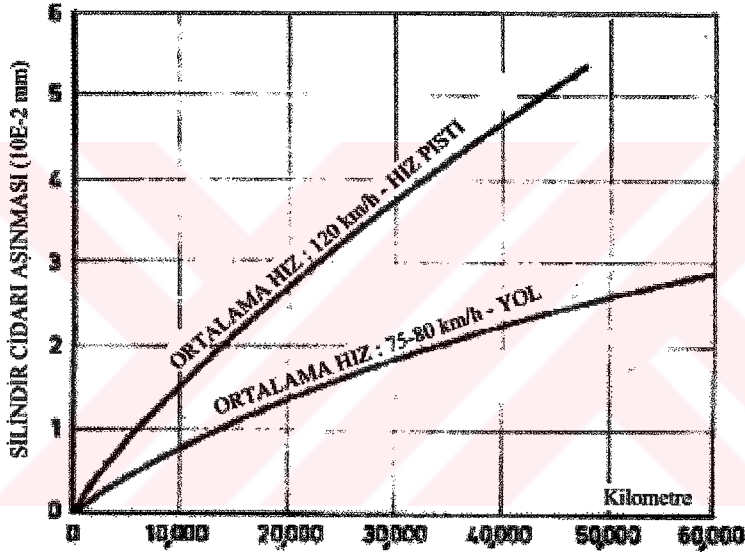
#### 4.5 Devir Sayısı

Devir sayısı veya piston hızının artışı hidrodinamik yağlamayı iyileştirmekte ancak motor sıcaklığını ve yanma basıncını da arttırmaktadır. Sıcaklık ve basınç değişiminin zararlı etkileri hidrodinamik yağlamaya göre daha fazla olup aşınmaları artış yönünde belirlemektedir. Şekil 4.6 benzinli bir motorda üst segmanın aşınma ilerlemesinin nasıl olduğu gösterilmiştir. Şekil 4.7'de başka bir benzinli motorda silindir cidarı aşınması iki farklı hız için gösterilmiştir ve bu olayda 120 km/h'daki aşınma 75-80 km/h'daki aşınmanın yaklaşık iki katıdır.

Piston hızı, özellikle ivmesi segman üzerine uygulanan dik atalet kuvvetlerinin şiddetini artırır ve bu kuvvetler segmanın oturma yuvalarında titreşime sebep olur. Bu, segman hareketinin zamanlamasını ve aynı zamanda yağ oranını etkiler ve kompresyon kaybına neden olur. Bununla birlikte, segmanları ve oyuk yüzeylerini oluşturan malzemelerin sertliğine bağlı olarak piston oyuklarının çekişmesi ile segman yüzeylerinde büyük bir aşınma meydana gelir. Sonradan kırılmalar meydana gelebilir. Bir başka deyişle, benzinli motorlarda atalet kuvvetleri segman geriliminin başlıca nedeni olup, orta hızlardaki dizel motorlarda başlıca nedenler basınç oranı ve ortalama efektif basıncın yükselmesine bağlıdır.



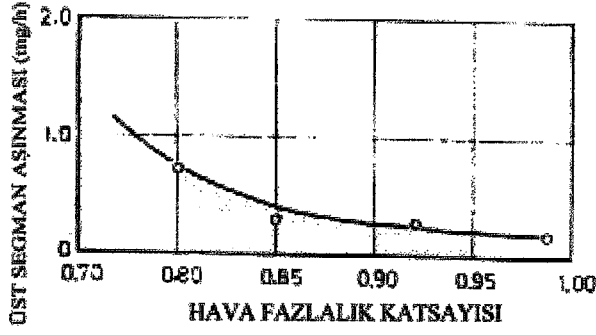
Şekil 4.6 Motor hızının segman aşınması üzerindeki etkisi (Schilling, 1972)



Şekil 4.7 Motor hızının silindir cidarı aşınmasına etkisi (Schilling, 1972)

#### 4.6 Hava Fazlalık Katsayısı

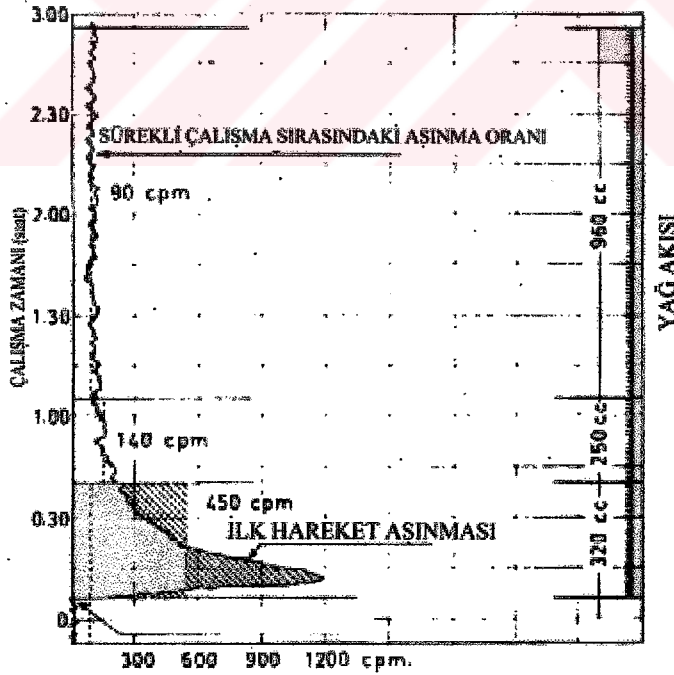
Zengin karışım, yağın geniş ölçüde geçici olarak seyrelmesine ve yağ viskozitesinde düşüşe neden olur bu da hidrodinamik yağlamanın etkisini azaltır. Örneğin jiklenin yanlış kullanımı, adhezyon aşınmasını artırır. Fakir karışım ise, özellikle dizel motorlarında aşırı oksijen oluşumuna neden olur. Bu da sıcak gazlarla temas eden parçalarda yüzey oksitlerinin oluşmasına neden olur ve korozyon aşınmasına neden olan asitli yanma ürünlerini meydana getirir. Şekil 4.8 Benzinli motorda fakir karışımın üst segman aşınmasına etkisini göstermektedir.



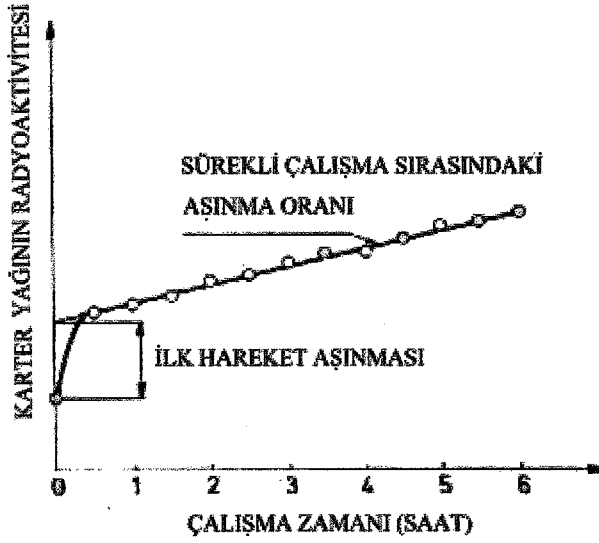
Şekil 4.8 Hava fazlalık katsayısının üst segman aşınmasına etkisi (Schilling, 1972)

#### 4.7 Motor İlk Hareketi

Motorun ilk hareketinde, yağ filminin görünür olarak var olmadığı Üst ve Alt Ölü Noktada hidrodinamik yağlama tam olarak gerçekleşmez. Yağ basıncının uygun seviyeye gelmesi ve yağın segman bölgesine ulaşması için kısa bir süre gereklidir. Bu süre içinde cidarlarda bulunan yağın kartere geri dönmesi nedeniyle geçen zamanda segman piston gömleğiyle kuru sürtünme yapar ve adhezyon aşınmasına neden olur. Bazen bu olay yüksek sıcaklıklarda çok fazla akışkan olan yağlarla yaşanan sıcak çalıştırma zorluklarının nedenidir. İlk hareket aşınması ile ilgili grafikler Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 İlk hareket aşınması (Schilling, 1972)

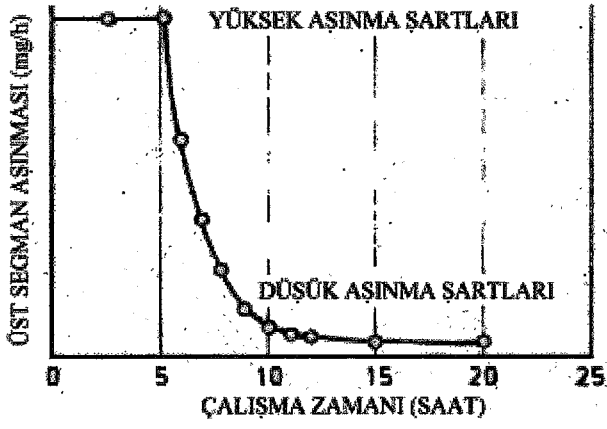


Şekil 4.10 Benzinli motorda radyoaktif yöntemle aşınma oranının belirlenmesi  
(Schilling, 1972)

Bu yüzden ilk hareket aşınması, rejim halindeki aşınmadan ayrı olarak düşünülmelidir. İlk hareket aşınması daha büyüktür ve korozyon aşınmasının temelini oluşturur. Adhezyon aşınması motorun durdurulması sırasında yağ filminin gömlekte iz bırakmasına, çalıştırdıktan sonra yağ filminin daha çok yada az hızda oluşmasına ve bununla birlikte yoğunlaşmış benzin veya gaz yağı tarafından soğuk cidarların yıkanmasına bağlıdır.

İlk hareket aşınmasını azaltmak için, motorun kısa süreli durdurulması, uzun süreli durdurulmasına göre tercih edilmelidir. Yoğun viskoziteli yağlar çalıştırma sırasında film kaynağı zarar görmediği sürece, düşük viskoziteli olanlara tercih edilir.

Durdurma sırasında motorun düşük sıcaklıkta olması, yüksek sıcaklıkta olmasına göre sürtünme aşınmasının daha az olmasını sağlar. Fakat korozif koşullar söz konusu ise bunun tam tersi gerçekleşir. İlk hareket aşınması, yüzey yapısında incelmeye neden olur buda normal rejim şartları oluşana kadar kısmi çalıştırmayı gerektirir. İlk hareket aşınmasının etkisi aşınmanın genişliğine göre bir ila birkaç saat arasında devam edebilir (Şekil 4.11).

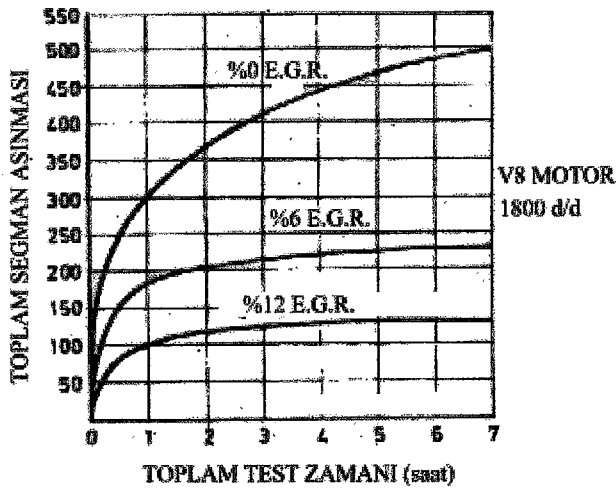


Şekil 4.11 Çalıştırma koşullarının değiştirilmesi durumunda meydana gelen aşınma oranındaki değişim (Schilling, 1972)

Şekilde çalışma şartlarından biri değiştirildiği zaman, şartlar sabitlenene kadar geçici bir aşınma tepesinin oluştuğu görülür. Bu nedenle adhezyon aşınması devirli çalışma koşullarında daha fazladır. Korozyon aşınması da aynı şekilde olduğundan kasaba şartlarında kullanılan motorlar, normal yollarda kullanılanlara göre daha çok aşınır.

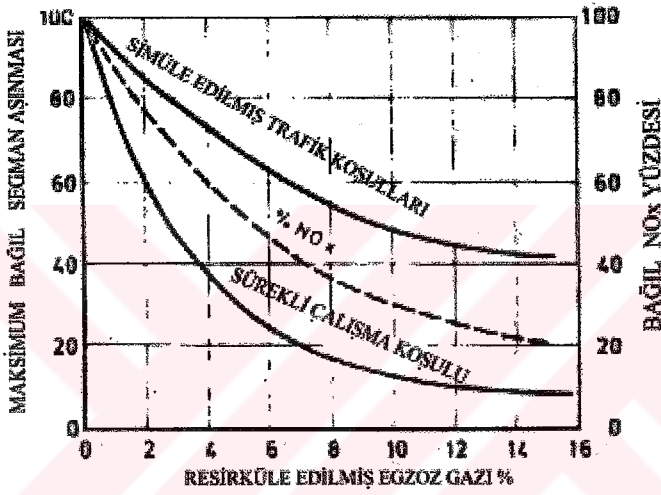
#### 4.8 Egzoz Gazlarının Resirkülasyonu

Benzinli motorda egzoz gazı resirkülasyonu yapmak, yanma sıcaklığının ve basıncının kontrol edilmesini böylece  $\text{NO}_x$  oluşumunun azalmasını sağlar. Ayrıca motor aşınması üzerinde de olumlu etkiye sahiptir. Örneğin; dökme demir üst segmana sahip bir V8 motorunda EGR oranı arttırıldığında, üst segmanların daha az aşınmaya maruz kaldığı görülmüştür. Bu kararlı ve devirli çalışma koşulları için de geçerlidir.



Şekil 4.12 EGR'nin segman aşınmasına etkisi (Schilling, 1972)

Geniş ölçekte bakıldığında, rejim koşullarındaki aşınma azalmasının devirli şartlara göre daha olumlu olduğu görülür. Şekil 4.13 değişken motor hızı ve yük durumlarında bağıl aşınmanın, resirküle edilen egzoz gazları oranına göre değişimini göstermektedir. Oluşan  $\text{NO}_x$  miktarlarını gösteren eğri, aşınma değişimlerini gösteren diğer eğrilerle aynı azalışa sahiptir. Bu yüzden üst segman aşınması ve oluşan  $\text{NO}_x$  miktarı arasında yakın bir ilişki vardır. Oluşan bu ürünlerin adhezyon ve korozyon aşınmaları üzerinde açık bir şekilde doğrudan veya dolaylı olarak etkileri vardır. Kirilenmeyi önlemek için yapılan her hareket aynı zamanda aşınmaya karşı yapılmaktadır. Ayrıca  $\text{NO}_x$ 'lerin yağ üzerindeki kimyasal etkileri de unutulmamalıdır (Asit Nitrik).



Şekil 4.13 Yapılan EGR %'sinin piston aşınmasına ve  $\text{NO}_x$  oluşumuna etkisi (Schilling, 1972)

## 5. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA KULLANILAN PİSTON, SEGMAN VE SİLİNDİR MALZEMELERİ

Çok önemli olan bu faktörler, kendi aralarında oluşturdukları kombinasyonlar nedeniyle çok fazla sayıda çözüm meydana getirirler. Bu yüzden aşağıda en önemli durumlar üzerinde durulacaktır.

### 5.1 Silindirler

Islak silindir gömleği, kuru silindir gömleği ve silindir bloğu arasında bir ayırım yapılmalıdır. Aşağıda temel özellikler açıklanmıştır ;

#### *Silindir Bloğu*

En eski yöntem ile dökme demir silindir bloğu kullanılmaktadır. Basit, etkili ve ucuzdur fakat dökümhane işlemlerinde birçok zorluklarla karşı karşıya kalınabilir. Dökme demir aşağıdaki üç temel özelliğe sahip olmalıdır;

- En zor parçaların bile dökülebilmesini sağlayacak yeterlilikte akışkan olması.
- Silindir aşınmasını mümkün olduğu kadar azaltacak şekilde, 220 ile 280 arasında Brinel sertliğinde olması.
- Üretim oranını arttırabilmek için kolay işlenebilir olması.

Sanayide kullanılan tipik dökme demir aşağıdaki yapıdadır:

C=%3.2      Si=%2      Mn=%0.7      S=%0.05      P=%0.02

Silindirlerin yüzeyinin çok düzgün yapıda pürüzsüz olması rodaja engel olur. Fakat yüzeyin çok pürüzlü olması da aşınmaya neden olur. Bu yüzden 0.5 ile 1 mikron arasındaki yüzey parlaması kabul edilebilir. Çapraz taranmış bir yüzey elde edebilmek için taşlama uygulanır. Rodaj sonucunda parlatma 0.12 ile 0.15 mikron mertebesinde azalır.

Motor blokları aşınma sonrasında rektifiye edilirken, genellikle kuru gömlekler ile alıştırılır. Ayrıca basınçlı döküm alüminyum alaşımlarda kullanılmaktadır. Toplam ağırlığı azaltmasının yanı sıra, alüminyumun diğer avantajı yüksek termal iletkenliğe sahip olmasıdır. Alüminyum

kullanılan motorlar nispeten daha düşük sıcaklıklarda çalışabilir. Bu özellikle yağ ve yatakların bakımı için iyidir. Genellikle ıslak olan sökülebilir gömlekler ile alıştırlırlar.

Gömleksiz alüminyum silindir bloklar hiçbir üretici tarafından kullanılmasa da dökme demir gömleklerle çalışabilmesi ve iyi sonuçlar vermesi için yöntemler vardır. Bu yöntemler, krom kaplama veya silindir çaplarına ve piston eteklerine metal püskürtülmesidir. Yakın gelecekte döküm gömlekler tamamen kullanımdan kalkmasa da, %17 silikon ve %4.5 bakır içeren hiperötektik alaşımlar ile dökme demire göre daha ucuz ve hafif olan alüminyum blokların üretilmesi mümkün olacaktır.

### *Islak Gömlek*

Silindir kafasının montajı ve sıkıştırılması sırasında oluşabilecek zorluklar karşısında gömleğin bükülmesini önlemek için dizaynın doğru yapılması çok önemlidir. Ayrıca gömlek ve blok arasında, mükemmel bir sızdırmazlık sağlanmalıdır, bu özellikle yağlamayı ilgilendirir. Genelde, sıkıştırılmadığı zaman kayan gömlekler, üst tarafta flanşın sıkıştırması ile altta da lastik segmanlar tarafından contalanırlar ve genişlemeye müsaittirler (Asma gömlek). Başka bir yolda, kayan gömleklerin üst kısmını bir omuzla desteklemektir (Sıkıştırma gömleği).

Piston gömlekleri, silindir dökme demirinden aşağıdaki kompozisyonla yapılır;

C=%3.1-3.5      Si=%1.8-2.2      Mn=%0.6-0.9

Dökme demirin sertliğinin arttırmak için değişik ilave ürünler kullanılır. Örneğin iyi kaliteli alaşımlı dökme demir aşağıdakileri içerir;

C=%3.6      Si=%2.1      Mn=%1.15      S=%0.045      P=%0.6      Ni=%0.18

Va=%0.10      Cr=%0.07      Ti=%0.06

Dökme demirin santrifüjlenmesi kalitesine katkıda bulunur. Yüzeyin sertleştirilmesi için, nitritleme, krom kaplama veya menevişleme uygulanır.

### *Kuru Gömlek*

Hala kullanılan eski bir yöntemdir. Daha sert blok kullanılmasına imkan verdiği için avantajlıdır. Silindir bloğunun Şekli önemlidir, çünkü gömlek çok ince olduğundan, bloktaki bozukluk gmleğe iletilecek ve son Őekline etki edecektir. Ayrıca bu tip gömlekler 1 ile 2 mm kalınlığında yumuşak çelikten yapılarak sert kromla kaplanabilir.

Üç tip kuru gömlek vardır;

- Yarı yüzey parlatılmış kuru gömlekler; presle birleŐtirilir ve rayba çekilerek deliğe sıkıŐtırılır.
- Parlatılmış gömlekler; sıkılaŐtırılarak alıştırılır.
- SıkılaŐtırılmadan alıŐtırılan, parlatılmış gömlekler.

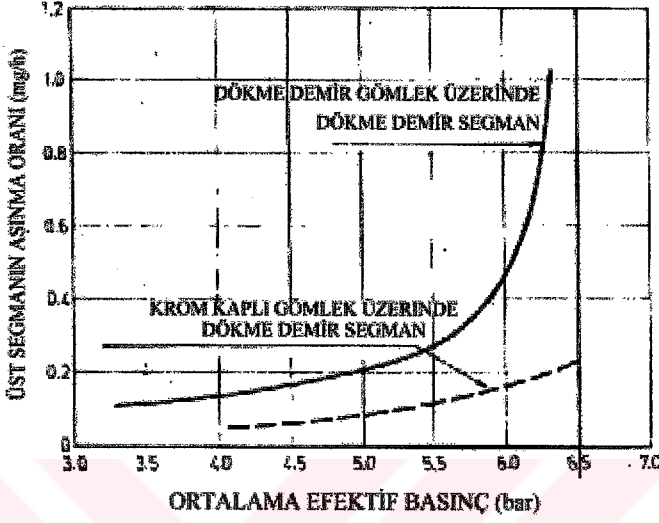
Üst l nokta çevresindeki alanda sınır yağlamanın etkili olduğu durumda, silindir aşınmasının ve kazıma aşınması eğilimlerini azaltabilmek için, kullanılan dökme demirin metalürjik bileşimi ve yapısı çok önemlidir.

Genelde aşınmaya dirençli dökme demirin yapısının grafitin ince lamelli yapıda dağıtıldığı perlit kalıp Şeklinde olması arzu edilir. Grafit kuru sürtünme sırasında sadece yağlayıcı görevi yapmaz, aynı zamanda aşınmanın gerçekleŐmesinden sonra ufak boşluklar bırakarak yağ kaynaklarının oluşumuna ve yağlamanın sürekliliğine yardımcı olur. Sınır koşulları altında, aşınma direnci fosfor içeriğindeki artışla birlikte artar. Ayrıca sülfürik, nitrik ve hidroklorik asitlerin oluşturduğu korozyonu %1 oranında azaltır. Fakat fosforun etkisi, kroma ve %3 ile %5 arasında bulunduğu zaman zararlı olan serbest ferrit gibi alaşım elementlerine bağlıdır. Dökme demirin kompozisyonu ve yapısıyla ilgili olan bu problem çok karmaŐıktır ve özel çalıŐmalarla incelenmesi gereklidir.

zerinde henüz çalıŐılmamıŐ bir konuda, krom kaplı segmanların mekanizmaları ve bunların kendi içerindeki dökme demir silindirlerindeki aşınmayı nasıl azalttıkları konusudur. Bunun için birçok nedenden bahsedilebilir:

Krom yüzey, segmanların abrazif partiküllerle yataklanma eğilimini azaltır. Segman aşınmasına engel olduğundan segman silindir çiftini aŐındıracak madde üretilmez. Metal teması oluŐtuđunda, aşırı derecede küçük miktarlarda metalik krom segman yüzeyinden silindir duvarlarına transfer edilir. Transfer edilen metal alt taraftaki yumuşak metali korur.

Metal transferi radyoaktif krom kullanılarak tespit edilir. Silindir çaplarının sert kromla kaplanması, kullanım ömrünü önemli ölçüde artırır. Şekil 5.1'de 2 stroklu dizel motorda dökme demir segmanlarda ve gömlelerdeki aşınma ile dökme demir segmanın krom kaplı gömlelerdeki aşınmaları karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.1 Değişik gömlek malzemeleri için aşınma oranları (Schilling, 1972)

Krom diğer malzemelerden daha serttir, ısı iletkenliği ve korozyona karşı direnci de daha iyidir. Yumuşak krom yüzeyler kolay ıslatılmadığından bu durum için uygun değildir. Bu yüzden gözenekliliğin yaratılması gereklidir. 0.04 ile 0.05 mm sert krom kaplamanın, ticari araç motorlarının ortalama ihtiyaçlarını karşılayabileceği kanıtlanmıştır. Bu kaplama derinliğiyle birlikte, elektrolitik olarak çöktürülen krom içinde artık gerilmelere bağlı olarak oluşan mikroskobik çatlaklar bulunur. Yeterli koruma sağlayabilmek için bu çatlaklar yağ ile doldurulur.

## 5.2 Pistonlar

İlk pistonlar, yüksek dayanıklılığa ve mükemmel aşınma direncine sahip dökme demirden yapılmaktaydı. Motor hızlarındaki artışla birlikte, modern içten yanmalı motorların pistonlarında alüminyum alaşımlar gibi hafif malzemeler yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Birçoğu sürekli döküm kalıbıyla ve basınçlı dökümle üretilir. Dizel motor performansını artırabilmek için piston araştırmalarına özel önem verilmektedir.

Piston üretilen enerjinin, kullanılabilir güce çevrilebilmesi için en önemli elemandır. Yanma odasının sıcaklığının etkisindedir. Soğutucu silindir duvarlarıyla temas ettirilerek ve karterden püskürtülen ve sıçrayan yenilenmiş yağlama yağı filmi ile soğutulması gereklidir.

Çok yüksek efektif basınca (BMEP) sahip yeni motorların geliştirilmesi, piston ve segman sıcaklıklarındaki yükselişe bağlı olan limitlerle sınırlanmıştır. Alüminyum alaşımlar üç ana grupta toplanır:

- Al-Cu alaşımlar.
- Al-Cu-Ni veya Al-Cu-Fe alaşımlar, örneğin çok iyi bilinen Y alaşımı (ticari adıyla 142 veya SAE 39).
- Al-Si alaşımlar, %11-13 bazen de %25 silisyum içerir, en çok bilinenleri, F 132 veya SAE 332'dir. Bileşimi: Si=%8.5-10.5, Fe=%1.0, Cu=%2.0-4.0, Mn=%0.5, Mg=%0.6-1.5, Ni=%0.5, Zn=%1.0, Ti=%0.25, diğer elementler %0.50.

Alüminyum alaşımlar, hafiflikleri, iletkenlikleri, sürtünme dirençleri ve işlenebilirlikleri nedeniyle avantajlıdır. Ancak dökme demir pistonlarda olmayan üç probleme sahiptirler:

1-Yüksek genişleme oranı, piston ve silindir arasındaki boşluk açısından önemlidir. Yaygın olarak kullanılan %12 silikon alüminyum alaşımının termal genişleme katsayısı  $19 \cdot 10^{-6}$ 'dır ve silikon içeriğindeki artışa bağlı olarak az miktarda azalır. Örneğin silikon içeriği %17-19'a çıkarıldığı zaman katsayı  $17 \cdot 10^{-6}$  olur. Bu boşluğu azaltır ve aşınma direncini artırır, genel olarak aşınmayı azaltır.

2- Daha düşük sertlik sonucunda daha yüksek aşınma oranı.

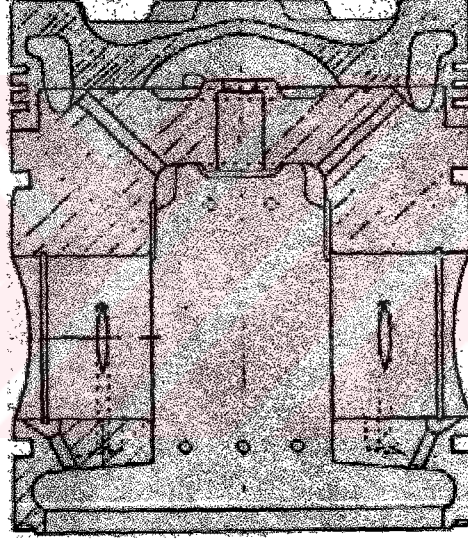
3- Yüksek sıcaklıklarda daha az mekanik direnç.

Aşağıdakiler alüminyum pistonlardaki temel aşınma bölgeleridir.

- Piston başı
- Segman yuvaları ve boşlukları
- Piston pimi ve piston içindeki yuvası
- Piston eteği

Piston başının bozulması, dizayna ve pistonun yüksek sıcaklıklar ve yanma basınçlarına karşı direnci gibi özelliklerine bağlıdır. Bu yüzden bu bozulmanın sürtünme ile ilişkisi yoktur. Yıldız şeklindeki çatlaklar veya benzinli motorda piston yanması şeklinde ortaya çıkar. Bu olay hatalı yanmadan kaynaklanır ve yağlama yağlarının yüksek sülfatlı kül ile birlikte yanmasıyla oluşan atık maddeler sonucu oluşur. Yüksek verimli dizel motorlarda, piston başları termal çatlamaya karşı çeşitli yollarla korunur.

- 1-İçten zorlamalı yağ sirkülasyonu ile pistonun soğutulması,
- 2-Şekil 5.2’de gösterildiği gibi ısıya dayanıklı çelikten yapılmış sökülebilir piston başlarında yağ ile soğutmaya imkan veren ince bölgeler bulunması.
- 3-Ateşleme basıncının değişken piston sıkıştırma oranları ile sınırlanması.



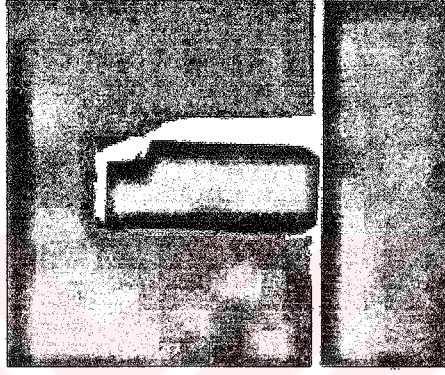
Şekil 5.2 Alüminyum gövdeli, çelik başlı pistonun yapısı (Schilling, 1972)

Üst segman yuvası, aşağı kısımdaki yuvalardan ayrı olarak ele alınmalıdır. Üst segman yuvasındaki, geniş boşluklar kalın bir karbon tabakasının oluşmasına ve bir yalıtıcı olarak görev yapmasına imkan verir bu da sıcaklığı yükselterek piston metalini yumuşatır. Oluşan tortular sıcaktan katılaşıp sert karbonik maddelere dönüşür ve pistonlarla silindirleri kırıp çizebilir. Ayrıca bu tortuların abrazyonları ile birlikte dizel motorlarda yakıt bileşimi ve kalitesinin, yağlama yağına göre daha etkili olmasına neden olurlar.

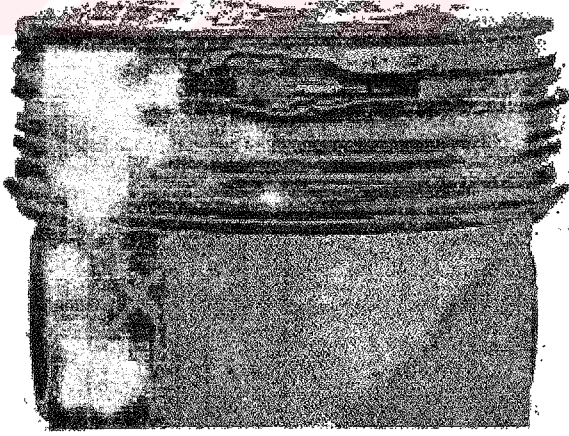
Bu olayın tam tersine piston segman boşluğunun minimuma indirilmesi, daha iyi ısı akışına imkan vererek sıcaklıkta düşmeye ve karbon tortularının oluşumunda azalmaya neden olur. Bu özellikle segmanlardan geçen yağın miktarı kontrol edildiğinde gerçekleşir. Alt piston segman

yuvaları için, büyüklük termal dizayndan daha çok mekanik dizaynla ilgilidir. Bu durumda tortu oluşumu yağ kompozisyonundan etkilenir çünkü daha büyük miktardadır ve düşük sıcaklıklara maruz kalırlar böylece yağın rolü kendi kompozisyonuna bağlı olur.

Piston segman yuvası aşınması, özellikle alüminyum alaşımlarda görülür. Genel belirtiler, kompresyon kaybında ve yağ tüketiminde artış, güç kaybı, sıkıştırmadaki kayıptan dolayı zayıf çalıştırma şeklindedir. Segman yuvası bozulması, dövme etkisine bağlı olarak kenarlardaki aşınmaya doğru yuva boşluğunun genişlemesi ile sonuçlanır. Segmanların ve piston yuvalarının bozulması olasıdır.



Şekil 5.3 Aşırı derecede aşınmış segman ve segman yuvası (Schilling, 1972)



Şekil 5.4 Aşınmış üst oluğun neden olduğu kırık segman ve zarar görmüş piston  
(Schilling, 1972)

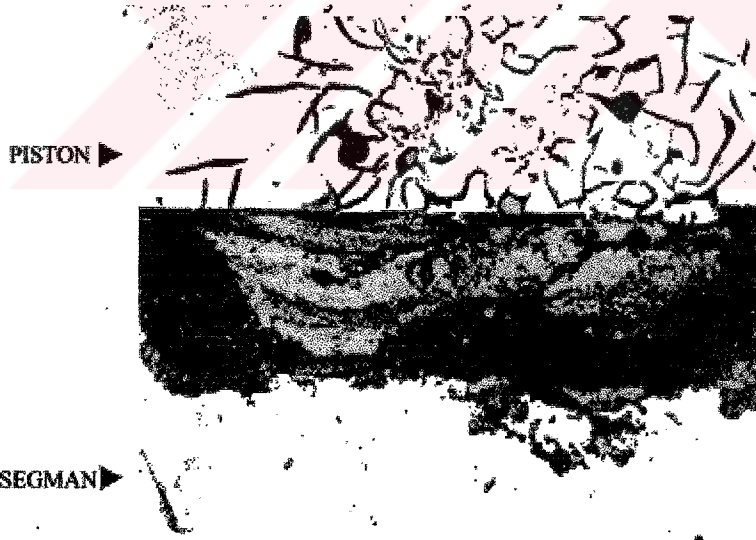
Segman aşınmasına birçok şey neden olur. Genellikle; abrazyon, korozyon, adhezyon, segman hareketi ve yüksek sıcaklıklar nedeniyle alüminyum alaşımın aşırı yumuşaması gibi nedenlerin birleşimidir. Bunlara ilave olarak, dizel motorlarda yakıt enjektörleri, yağlama

yağının kalitesi ve segmanların ayarlarının da etkisi vardır. Abrazyon aşağıdaki koşullarda oluşur;

- 1-Uygun hava filtrasyonu kullanılmadığında silindire giren ve segman yuvasının aşınmasına neden olan tozların sonucunda,
- 2-Motorun aşınması sonucunda oluşan metal atıklar, (uygun yağ filtresi çok önemlidir)
- 3-Yakıtın ve yağların yanması sonucu oluşan sert tortular.

Bu durumdaki korozyonu, abrazyondan ayırt etmek zordur. Hem segmanlarda, hem de silindirlerde, motor çalıştırma sıcaklıkları düşük olduğunda veya yüksek derecede sülfür içeren dizel yakıt kullanıldığında ortaya çıkar. Gerçekte, silindir ve segmanlardaki korozif aşınma ürünleri segman ve segman yuvası yüzleri arasında tutulabilir böylece ileride segman yuvası yüzeyi abrazyonundan oluşabilecek aşınmayı engeller.

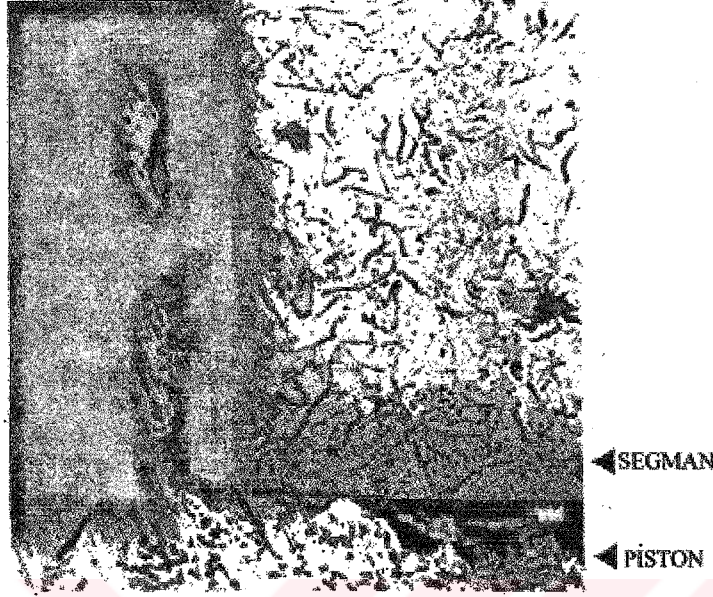
Şekil 5.5 hafif alaşımdan, segmanın dökme demirine olan metal transferini göstermektedir. Benzer şekilde segman yuvasının en altında, en içteki kenarı yukarıda tarif edilen şekilde davranış gösterir.



Şekil 5.5 Metal transferi (Schilling, 1972)

Bir torna makinası gibi davranarak Şekil 5.6'da gösterildiği gibi hafif alaşımdan yumuşak bir parça kesip çıkarır. Aşınmanın adhezyondan ve ters tornalamadan kaynaklanan bu partiküler proses, genişleyerek segman yuvası dövülmesi ile aynı etkileri oluşturabilir. Bu etki, segman yapışması ve segman yuvalarının tortular tarafından tıkanarak, segmanın arkasından yağ

sirkülasyonunun engellenmesine ve ısı akışının yavaşlamasına böylece metallerin teması sonucu adhezyon aşınmasının oluşumu için uygun ortam yaratılmasıyla takip edilir.



Şekil 5.6 Alaşım piston oluşunun dökme demir segman kenarı tarafından kesilmesi  
(Schilling, 1972)

segman yuvalarının aşınmasına neden olan etkenlerden biri, segman boşluklarındaki alüminyum alaşımın yüksek sıcaklık nedeniyle yumuşamasıdır. Yüksek sıcaklık iki etkiye sahiptir. Birincisi, segman ve segman yuvası arasındaki yağ filmini yakma eğilimi. İkincisi, metalin aşırı yumuşamasına neden olabilmesidir. Örneğin 288°C civarında bir sıcaklık altında, segman 2000 saat çalışırsa özel alüminyum alaşımı 115'ten 37 Brinel'e kadar sertliğini kaybeder. Alüminyum alaşım pistonlarda segman yuvası aşınmasını azaltmanın genel yollarından biri, bazı yüksek verimli dizel motorlarda, piston gövdesinin üst bölgesi içine ilave yapılarak üst segmanın desteklenmesidir.

Piston oluşunun içine ilave edilen katman, pistonun içine dökülür ve yüksek alaşımli östenitli dökme demirden yapılmıştır. Yüksek termal genişleme katsayısına ( $19,3 \cdot 10^{-6}$ , 20 ile 100°C arasında), yüksek aşınma ve sıcaklık direncine sahiptir. Segman yan yüzlerinin krom kaplanmasıyla segman yuvası aşınması azaltılabilir.

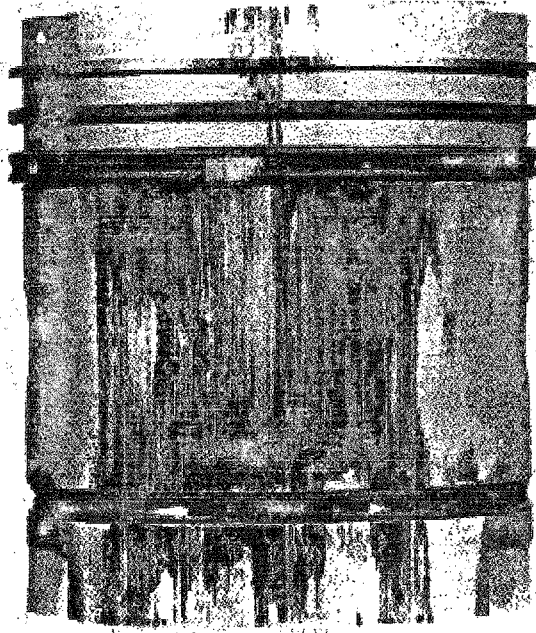
Segmanların yuva içine birleştirilmesi koşulları birçok açıdan ele alınmaktadır. Hem segmanın hem de oluşun yüzey parlatılması yüksek kalitede olmalıdır, aynı zamanda segman

yuvalarının düzlüğü ve düzgün köşeli olması da önemlidir. Ayrıca kenar boşluğu da az olmalıdır.

Günümüzde kullanılan alüminyum silikon piston alaşımları daha iyi yataklama malzemeleri oluşturmaktadır. Yatak boşlukları çok önemlidir. Çok küçük olursa kazıma veya yatak sarması meydana gelir, fakat aşırı büyük olursa sakıncalı bir piston gürültüsü oluşur. Piston piminin çapında ve şeklinde yüksek derecede hassasiyet gereklidir.

Yüzey bükülmesiyle birlikte veya ayrı olarak silindirde piston eteğinin yatak sarması hafif alaşım pistonun dezavantajıdır. Silindir çapı hiçbir zaman mükemmel daire şeklinde değildir ve şekli silindir başından farklı olabilir. Benzer şekilde pistonda tam yuvarlak değildir. Piston eteğinin profili, uzunluğu ve şekli piston dengesine, gürültü ve dayanıklılığa etki eden dizayn faktörleridir. Benzinli motorda gürültü, dizel motora göre daha çok problem yaratır ve eteğin ana basınç yüzü önemlidir, çünkü bu yüz vurutuya neden olur. Pistonun değişik bölümlerinde sıcaklıktaki artışla beraber boşluklar azalırken, modern motorda piston eteği profili genellikle konik değil, eliptik veya kovan biçimindedir.

Teknolojik detaylara girmeden şundan söz etmek gerekir ki, çok sıkı yerleştirilmiş bir piston sadece sürtünmeyi değil, etek aşınmasını ve çapta yapışma olasılığını da artırır.



Şekil 5.7 Yetersiz boşluk sonucunda pistonun çizilmesi (Schilling, 1972)

Piston eteğinin parlatılması üreticiye göre değişir. Piston sarması, piston silindir grubunun aşırı ısınmasıyla bağlantılıdır. Normal çalışma sıcaklıklarında çap, pistondan daha soğuktur fakat pistonun yatak sarma nedenini ve bunda yağlama yağının sorumluluğunu tespit etmek zordur. Piston dizaynının (üç tip dizayn vardır; açık, kapalı, yuvasız kapalı) etkisine ek olarak, anormal yanma sonucunda (ön ateşleme) metallerin temasına neden olan şiddetli ısı gradyeninin oluşması, soğutucu devrenin bozulması, devamlı tam yükte kullanım, yüksek hızlar, ani sıcak çalıştırma, çok düşük viskoziteye bağlı olarak hatalı yağlama veya sirkülasyondaki bozulma gibi nedenlerdir. Yüksek yağ tüketiminin olması, silindir çapı, segmanlar ve piston eteği arasında her zaman yeterli bir yağ filmi olduğunu kanıtlamaz. Yatak sarması problemine yönelik iki teknolojik yaklaşım vardır; birincisi eteğin daha esnek yapılarak, basınç altında yapışmadan yol alması sağlanır, ikincisi termal bariyerler ile direk ısı akışından korunmasıdır. Aynı zamanda piston, eteğiyle birlikte bir bütün olarak, kazıma aşınmasına maruz kalabilir. Bu durum özellikle motorun ilk zamanlarında gerçekleşir. Buna engel olabilmek için birçok yol vardır. En iyi bilinen yol, özellikle etek kısmı olmak üzere pistonun çok ince (0.0007 ile 0.0025 mm arasında) bir kalay film ile kaplanmasıdır. Başlangıç çalıştırması sırasında veya yağ filminin yeterli olmadığı zamanlarda, yerel sıcak noktalar meydana gelirse yumuşak metal bir yağlayıcı gibi akar.

Diğer yol, pistonun dış tarafının fosfat ile kaplanmasıdır, böylece yüzey, yağı daha iyi abzorbe edebilir ve her yerel yüksek basınç noktasında yağlayıcı film oluşmasını sağlar. Bunların dışında kurşun, grafit gibi değişik kaplayıcılarda kullanılmıştır. Bir diğer olay soğutucunun piston eteğinde korozyona neden olmasıdır, bu olay çukurlaşmış benekli grimsi bir görünümle sonuçlandığından belirlenmesi kolaydır.

### 5.3 Segmanlar

Motor gücünde, hızda ve efektif basınçtaki sabit artış, motor ağırlığındaki azalma ve diğer ekonomik ihtiyaçlarla birleştiğinde üreticilerin aşınmayı önlemek için daha iyi malzemeler üretmelerinin nedenleri ortaya çıkar. Birçok durumda segmanlar hala gri dökme demirden yapılmaktadır. Örnek olarak %3 ila %4 arasında karbon ve Si, P, Mn, Cr, Mo, V, Cu gibi ilave elementler içeren lamel grafitli perlitik dökme demir verilebilir. Ayrıca ufak ve orta büyüklükteki çaplar için sinterlenmiş dökme demir segmanlar kullanılarak yağlayıcının yapışma kapasitesi ve kazıma direnci artırılır.

Diğer üreticiler avantajlı çekme dirençleri nedeniyle küresel grafitli sünek dökme demir segmanları geliştirmişlerdir. Bu malzeme kazımaya karşı lamel grafit dökme demirlere göre daha az direnç gösterir. Krom kaplama ilave edildiğinde bu dezavantaj ikinci plana düşer. 40'lı yılların ortalarından beri benzinli ve dizel motorlara üst segman ve bir veya iki tane krom kaplamalı sıkıştırma segmanları eklenme işlemi yapılmaktadır. Bu çok parçalı kontrol segmanlarının yatak yüzleri için de geçerlidir. Sert veya gözenekli krom kaplama, bir elektrolitik tortu tarafından üretilir. Kalınlığı kullanıma göre 0.10 ile 0.30 mm arasında değişir. Bu kaplama adhezyon aşınmasını azaltmasıyla birlikte az miktarda da olsa, piston çapının aşınması gibi korozyon ve abrazyon aşınmalarını da azaltır.

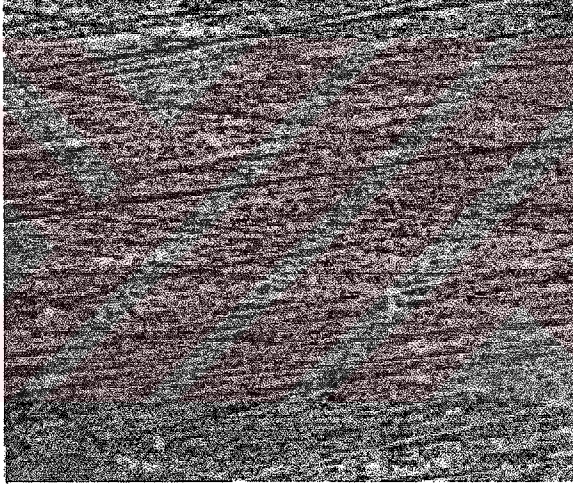
Aşınmaya karşı kaplama yapılmasının birçok nedeni vardır. Sert kromun füzyon noktası 1980 °C'dir, dökme demirin ise yaklaşık 1100 °C'dir. Sert krom ayrıca 900 ile 1000 arasında Vickers sertliğine sahiptir ve genişleme katsayısı 20°C ile 300°C arasında  $9 \cdot 10^{-6}$ 'dır. Termal iletkenlik katsayısı 0.165 kal/cm/sn/°C 'dir. Elektro kimyasal yollarla çöktürülmüş krom, sürtünme nedeniyle yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, pirometalurjik kromun özelliklerine benzeme eğilimine girer. Krom adhezyon aşınmasına karşı hassastır ve abrazyon aşınmasına dirençlidir. Sert kazıma koşullarında zarar görür. Korozif etkenlere karşı dayanabilen okside edilemeyen bir maddedir. Dökme demirle kıyaslandığında nispeten daha düşük adhezyon enerjisine sahiptir. Bu iki metal arasında katı faz kaynağının oluşması çok zordur. Fakat sert krom kazımaya maruz kalır. Örneğin; krom kaplamalı segmanların, krom katkılı ve dökme demir gömleklere sürtmesine izin verilmesi tavsiye edilmez. Krom zayıf yüzey enerjisine bağlı olarak, çok düşük ıslatılabilirliğe sahiptir fakat bu özellik, çatlaklar ve tane sınırı mikro aktiviteleri ile kısmen kompanse edilir. Bu olay Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.8 Krom kaplı piston segmanlarının yüzeyi; (a) Üst segman [x 100] ,  
(b) Orta segman [x 100] , (c) Alt segman [x 200] (Eyre, 1990)

Bu gözenekler sert kromun katmanlarında bile her zaman mevcuttur. Bazen bu mikro aktiviteler özel uygulamalarla genişletilir, fakat zayıflayacağı noktaya kadar getirilmez. Kromun kazıma aşınmasına karşı direncini artırıcı değişik yöntemler vardır. Krom kaplama dişli yüzeyli piston segman yüzleri üzerine uygulanmalıdır. Dişli parlatılmış yüzeyi kazımaya karşı maksimum dirençli kesintili bir yüzey oluşturur.

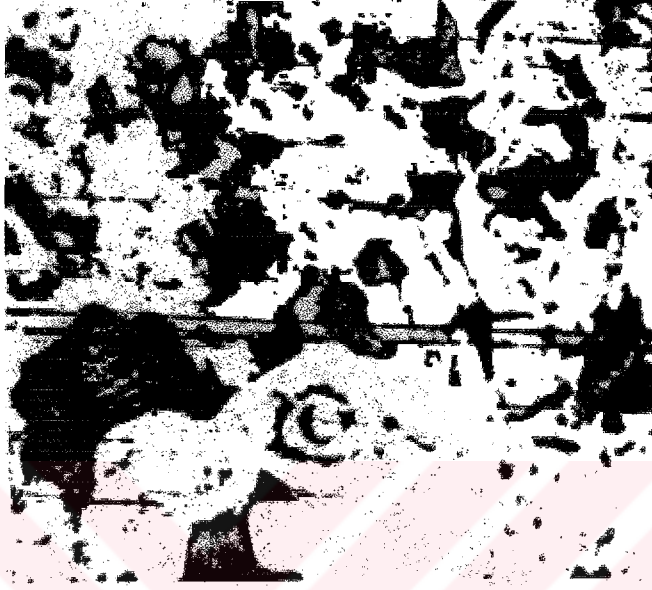
Kaba dişli krom yüzey, kalay kaplama, alevlenmiş kalay veya gözenekli krom ile doldurula bilinir. Krom kaplı segmanların alıştırmaları, doğru şekilde yapılmalıdır. Üstteki ve alttaki dış köşeler veya kaplamanın çevresi, segmanın oluşu içinde uygun olmayan bir pozisyon almasını engellemek için, oluklu şekilde yapılır. Böylece gömlekte koromdan kaynaklanan bir abrazyon aşınması olmaz. Fakat bu oluk kompresyon kaybını azaltmak için küçük olmalıdır. Ayrıca segmanlar, kullanımdan önce taşlanmalıdır. Performansları silindir çapının pürüzsüzlüğüne bağlıdır. Benzinli motorda, krom kaplamalı üst segman genellikle çok parçalı yağ kontrol segmanı ile birleşmiştir.

Krom kaplamalı olanın rodajı, dökme demir segmanlarından daha zordur. Fakat uygun yağlama yağı veya piston segman kaplaması uygulanarak yapılabilir. Piston segman kaplamaları iki çeşitte olabilir; birincisi başlangıç kazıma aşınmasına karşı koruma için nispeten daha incedir, diğeri daha kalın, aşınmaya karşı dirençli sert kaplamadır. Günümüzde iki tip sert kaplama kullanılmaktadır, bunlar elektro kaplamalı krom ve metalize molibdendir. Molibden ilk defa 1961 yılında piston segman kaplama malzemesi olarak kullanılan ateşe dayanıklı bir malzemedir. Ark plazma spreyi veya yanma sprej cihazı ile uygulanır. Bu metalin bazı özellikleri şöyledir:

- Yüksek bir füzyon sıcaklığına (2620 °C) sahiptir, (dökme demirin 1100 °C, kromun 1980 °C) bu metaller birbirleriyle temas ettiğinde birbirlerine kaynamalarını erteler.
- Genleşme katsayısı, normal segman sıcaklık aralığında  $5,4 \cdot 10^{-6}$ 'dır.
- Mükemmel ısı iletimine sahiptir (0.34 kal/cm/sn/ °C). Bu değer krom için 0.165'dir. Bu çok önemlidir çünkü kazıma aşınmasına karşı direnç, segmanın yüzey ısısını dağıtabilme kabiliyetiyle ilişkilidir.
- Yüksek Young Modülüne sahiptir.

Molibden, kazımaya karşı yüksek dirençli olması, aşırı derecede sert çizilme koşullarında bile kötü sarmaya maruz kalmaması nedeniyle adhezyon aşınmasına karşı iyi performans gösterir. Bu molibdenin sertliğine ve 530°C'de hava ile teması sonucunda okside olarak MoO<sub>3</sub> oluşturmasına bağlıdır. MoO<sub>3</sub> daha yumuşaktır, daha düşük sürtünme katsayısına ve kazıma aşınmasına karşı daha iyi özelliklere sahiptir. Diğer taraftan yaklaşık 370°C'de kroma göre daha büyük miktarda abrazyon aşınması meydana gelebilir.

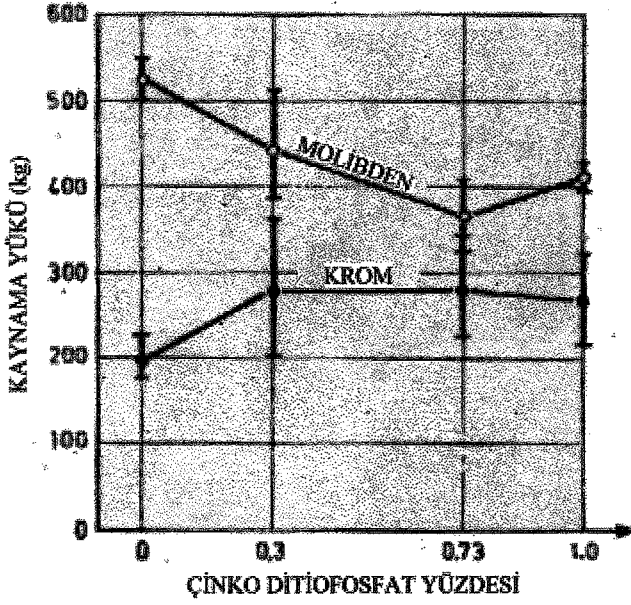
Bu olay, bu tip segmanların dizel motorlarda yaygın olarak kullanılmamasının nedenidir. Şekil 5.9'da gösterilen molibdenin gözenekli yapısı, çabuk çalıştırmalar sırasında segman için uygun yağlamanın yapılabilmesi için olumlu bir özelliktir. Molibden kaplamalı, sıkıştırma segmanlarının ortalama kaplama kalınlığı yaklaşık 0,5 mikro metre'dir.



Şekil 5.9 Molibden kaplı pistonun yüzey porozitesini gösteren mikro fotoğraf  
(Schilling, 1972)

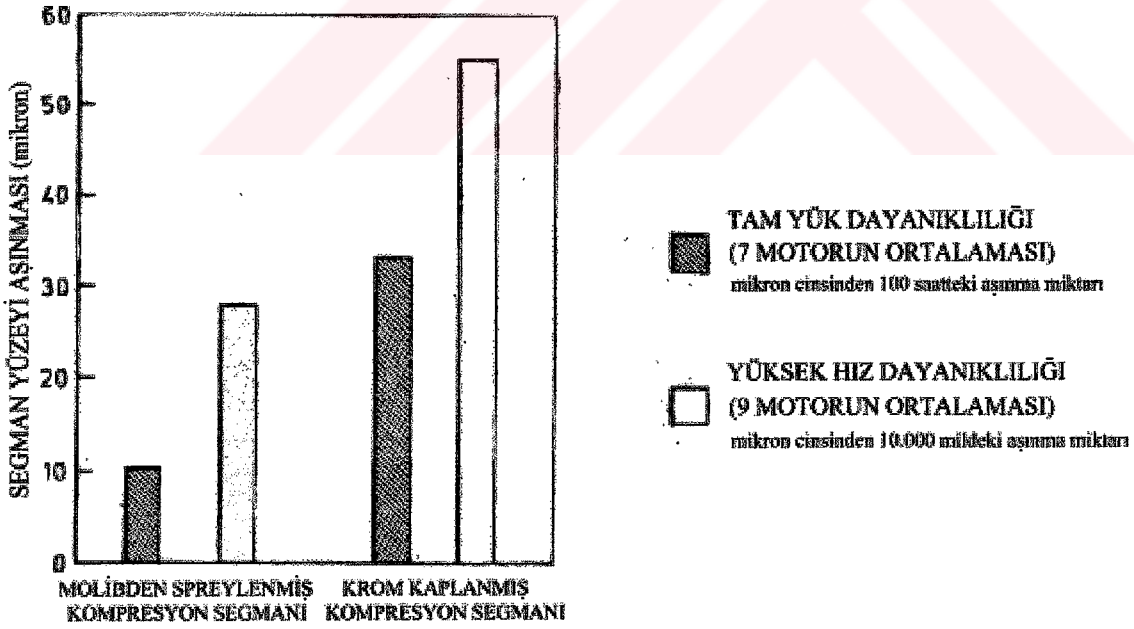
Molibden kaplamalı segman kullanılmasının sonuçları aşağıdaki gibidir;

1-Sürtünme aşınması testi makinelerinde yapılan testler, molibden kaplamanın yatak sarmasına krom kaplamalıya ve çinko ditiofosfat içeren yağa göre daha iyi karşı koyduğunu göstermiştir. Krom çinko ditiofosfat içeriğinden bağımsız olan bir kaynama yükü üretir, fakat molibden için kazıma önleyici özellikle birleşen kaynama yükü, çinko ditiofosfat içeriği arttıkça azalır.



Şekil 5.10 Çinko ditiofosfatın kaynama yüküne etkisi (Schilling, 1972)

2-Şekil 5.11 test düzeneğindeki yol şartlarında, tam yükte ve yüksek hızda, benzinli motorun sıkıştırma segmanının kromla kaplanmasının, üstün nitelikte direnç gösteren molibden kaplamayla karşılaştırılmasını gösterir.



Şekil 5.11 Piston segman kaplama malzemelerinin aşınmaya etkisi (Schilling, 1972)

Molibden ve krom kaplamalı segmanları karşılaştırmak için yapılan endüstriyel deneyler ilginçtir, fakat çelişkili ve tam olarak açıklanamayan sonuçlar gösterir. Molibdenin kazıma aşınmasına karşı dirençli olduğu görülmektedir. Fakat aşınmaya karşı aynı özelliğe sahip

değildir. Üreticiler yüksek güçteki motorlar için yeni tip segman kaplamaları geliştirmek için çalışmalar yapmaktadır. Bunlar karbür, seramik oksitler ve ateşe dayanıklı alaşımlardır. Ayrıca çok katlı kaplamaların yapılması da mümkündür.



Şekil 5.12 Kazınmış segman örnekleri a) üstteki hafif kazıma b) alttaki ağır kazıma  
(Schilling, 1972)

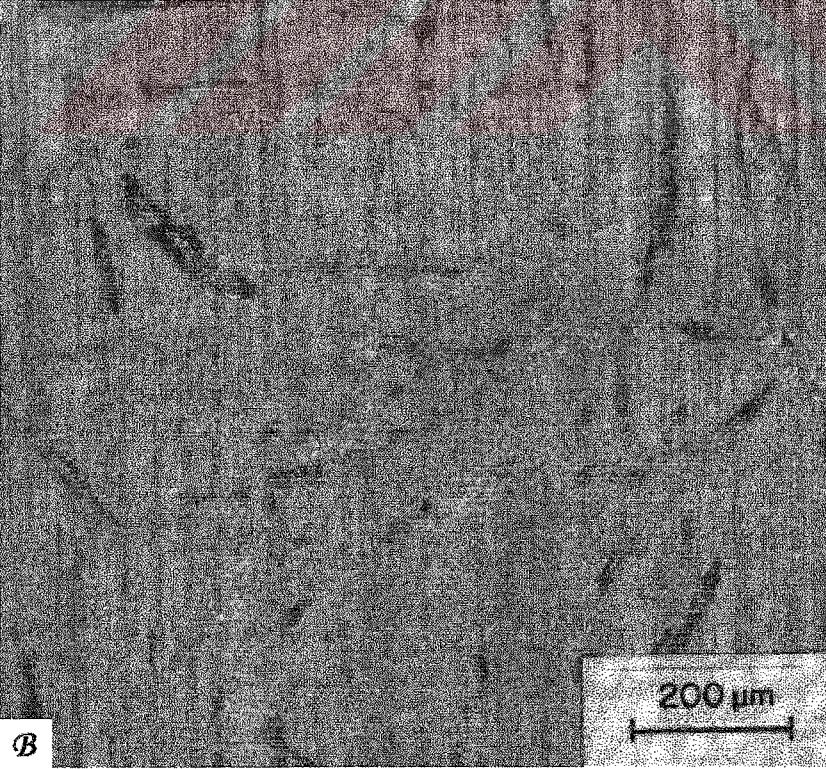
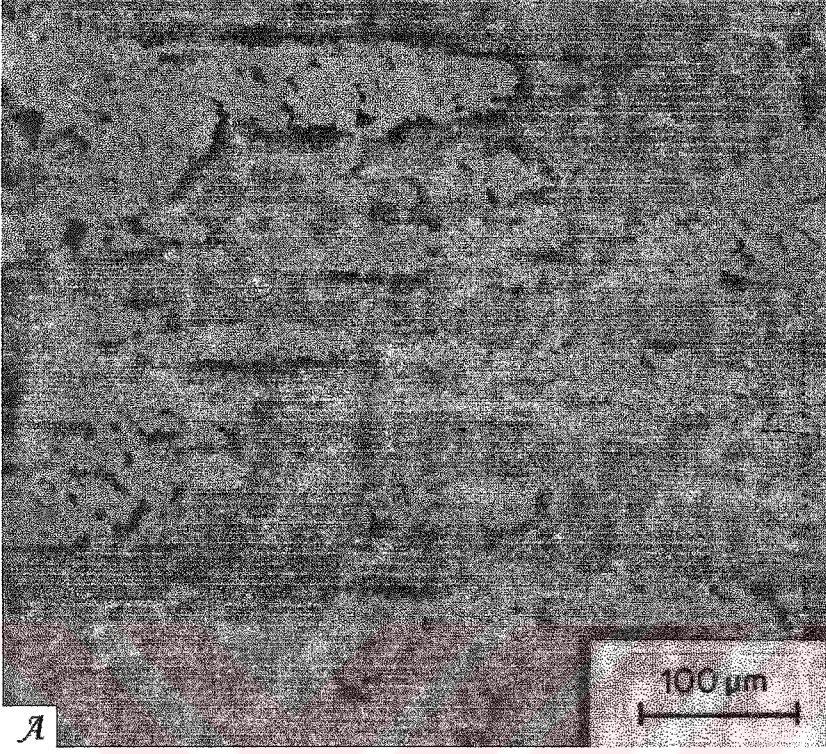
Segmanlar ve yağlayıcılar, özel makinelerde veya test düzeneklerinde yapılan laboratuvar sürtünme testleriyle geliştirilebilirler. En iyi bilinen testler şunlardır;

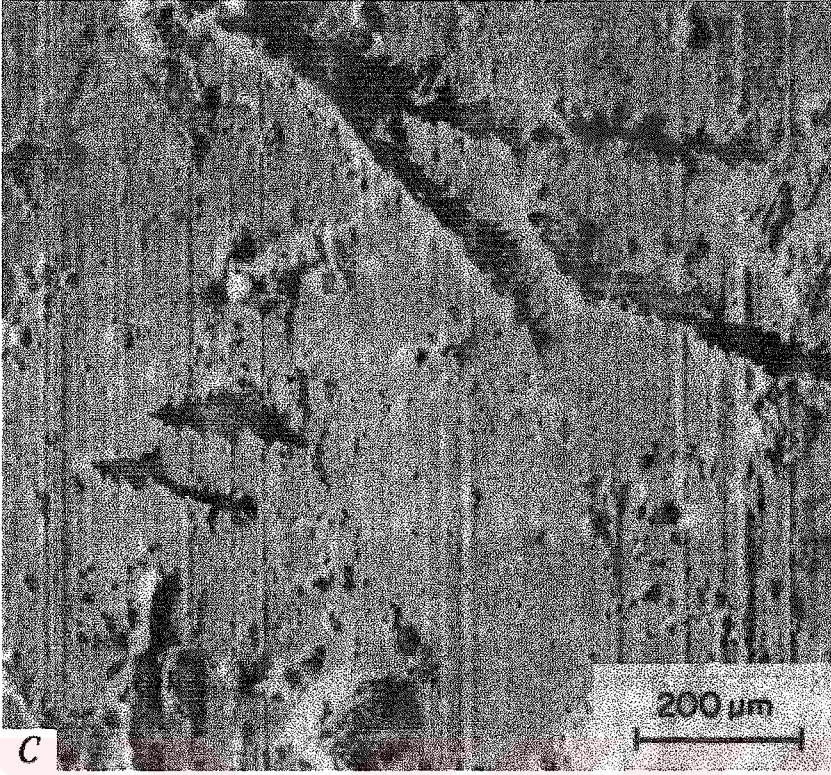
- Basit sürtünme aşınması test makinesi
- Sınır yağlama koşullarında, metallerin birbirleriyle olan aşınmalarını ve abrazyon aşınmalarını test eden aşınma test cihazı.
- Sürtünme ve kazıma aşınmalarını test eden Hohman test cihazı.
- Amsler disk makinası, I.F.P. tarafından sürtünme aşınması ve sarma yükü testleri için modifiye edilmiştir.
- Pim ve disk aşınma makineleri, kazıma testleri için kullanılır.
- Fren pabucu tipli aşınma test makineleri.
- Piston gömleğinden ve iki segmandan oluşan test cihazı, segmanlar biyel-krank mili sistemi tarafından kullanılan esnek bir piston monte edilmiştir. Segman çifti ve piston gömleği arasındaki sürtünme, her gömleğin üstünde bulunan gerilim ölçerler ile ölçülür. Segman teması da bir elektrik devresi ile ölçülür.

Motor testleri (dinamometre, yol ve filo) çok önemlidir. Ne yazık ki, kazıma aşınması testlerinin yapılabirliği ve tekrarlanabilirliği tatmin edici değildir. İlk olarak test motoru kazımaya karşı dirençli olmalıdır ve seçimi kolay değildir. Çok silindirli motorlar ile aşınmaların ve kazıma eğilimlerinin karşılaştırılması için yapılan ayırıcı testinde, üst segmanların yarısı kaplama malzemeli, diğer yarısı da kromdur. Ayrıca tüm deneysel segmanların kullanıldığı bir test uygulanmıştır. Motor kazıma meydana gelene kadar çok zorlu koşullar altında çalıştırılabilir, ve kazıma yaklaşık %30 kompresyon kaybıyla anlaşılır. Veya motor belirli bir süre için, genellikle 100 saat çalıştırılır. Aynı zamanda ayırıcı test olan yol testleri, uzun süreli dayanıklılığın ölçülmesi ve diğer kaplama malzemeleri kullanıldığı durumlarla karşılaştırılması için uygulanır.

Ufak bir 4 stroklu, tek silindirli, hava soğutmalı dizel motor ve değişken faktör olarak yağlama yağının bileşimi kullanıldığında, verilen sabit çalışma koşulları için, soğutma havasındaki azalma, silindir ve piston sıcaklıklarının artmasına bağlı olarak, kazıma aşınması görölme olasılığını artırır. Kazımanın miktarı ve büyüklüğü segmanın durumuna bağlıdır.

Spesifik verim ve hızdaki artış ile birlikte, segman gömlek kazınması, dizel mühendisleri tarafından çok kullanılan bir terim olmuştur.

**6. AŞINMA MEKANİZMALARININ MİKROSKOBİK OLARAK İNCELENMESİ**



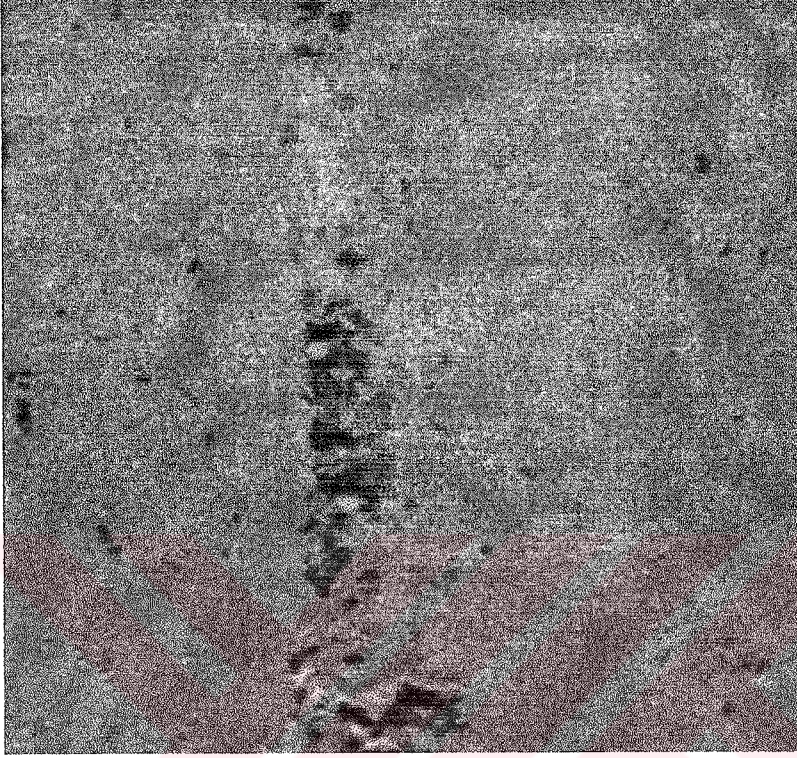
Şekil 6.1 A)Adhezyon aşınması B)Abrazyon aşınması C)Korozyon aşınması  
(Eyre, 1990)

Şekil 6.1, A'da adhezyon aşınmasına maruz kalmış bir motor parçası görülmektedir. Burada, bir yüzeyden diğer yüzeye metal transferi ile mikro pürüz uçlarının kırılması ve kaynama meydana gelmiştir. Bu olay, ancak bağlı olarak temiz koşullarda ve benzer malzemelerin birbirleri ile kaymaları esnasında meydana gelebilir.

Şekil 6.1, B'de ki motorda, segman ve silindir cidarında en çok meydana gelen aşınma mekanizması olan abrazyon örneği gösterilmiştir. Bunun oluşum sebebi ise yağ filmindeki sert partiküllerdir. Silindir cidarındaki üst ölü nokta ve segman en fazla abrazyona maruz kalan yerlerdir. Şekildeki aşınma, örnek motorun segmanında meydana gelmiştir.

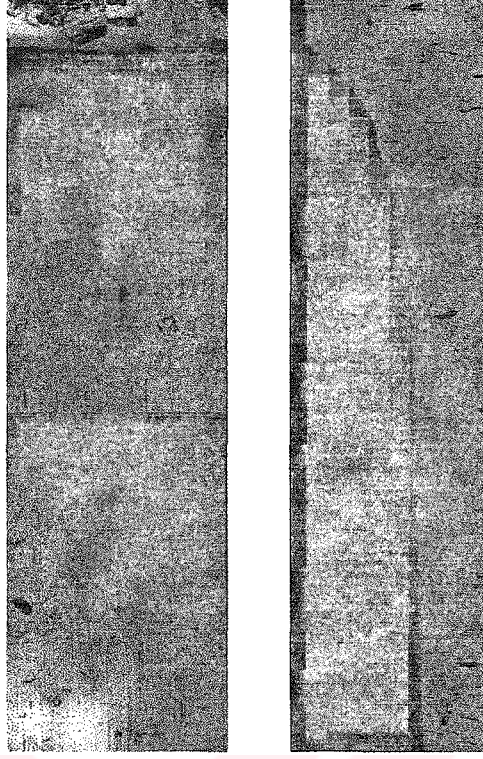
Şekil 6.1, C'de bir gemi dizel motorunun silindir cidarında meydana gelmiş olan korozyon aşınması görülmektedir. Buna sebep olarak yanma ürünleri arasında meydana gelen reaksiyon sonucu oluşan sülfürik asidi gösterebiliriz. Korozyon genişledikçe, korozyona uğrayan alanların mekanik olarak güçsüzlüşmelerinden dolayı, cidar yüzeyi daha fazla oyuklu hale gelmektedir. Korozyon daha çok cidarın ortasında, en azda alt tarafında meydana gelmiştir. Ayrıca motorun segman yüzeyinde de çok az gözlemlenmiştir. Bunun sebebi abrazyon

prosesinin daha baskın olmasıdır. Silindir strokunun ortasında korozyonun fazla olmasının sebebi, cidar ve segmanın hidrodinamik ayrımından dolayı daha az abrazyonun meydana gelmesidir.



Şekil 6.2 9-59K Deltic motorunun segmanı (Neale, 1981)

Şekil 6.2’de 9-59K Deltic donanma motorlarındaki (gemi dizeli) segman gösterilmiştir (X 100). Segman üzerinde, kazıma aşınması söz konusudur. Buradaki problem, segman ve silindir cidarının kazınmasıyla başlayıp kazıma sonrasında meydana gelen büyük bir çoğunluğunu krom partiküllerinin oluşturduğu parçacıkların gitgide büyüyen bir hasara sebebiyet vermesidir. Hasarın büyüklüğü bu parçacıkların ne kadarının piston-silindir arasındaki boşluktan diğer bölgelere yayıldığına bağlıdır.



Şekil 6.3 Valenta motorundaki silindir gömleği (Waterman, 1979)

Şekil 6.3'te İngiliz yüksek hızlı trenlerinde kullanılan Valenta motorundaki silindir gömleği aşınmış bölgesinin önden ve kesit görünüşleri gösterilmiştir (X 200). Yapılan inceleme sonucunda kullanılmış silindir gömleklere ve piston yağ numunelerinde aşınma prosesinde korozyonun rol oynadığına dair bir kanıt elde edilememiştir. Burada kopan krom partiküllerinin sebep olduğu abrazyon aşınması söz konusudur.

## 7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Testlerde optik mikroskop, x-ray ve SEM (Scanning Electron Microscope) cihazları kullanılmıştır. Örnek motorlar olarak Renault 9 Broadway ve Iveco Diesel seçilmiş ve bunların silindir gömleği, pistonu ve segmanında oluşan aşınma mekanizmaları incelenmiştir. Bunlara ek olarak Iveco Diesel motor elemanlarının yüzeyindeki metallerin haritası 'x-ray mapping' yöntemi ile çıkartılmıştır. Silindir gömleği, piston ve segman parçaları cihazlara girmeden önce Hekzan (kimyasal formülü :  $C_6H_4$ ) ile temizlenmiştir.

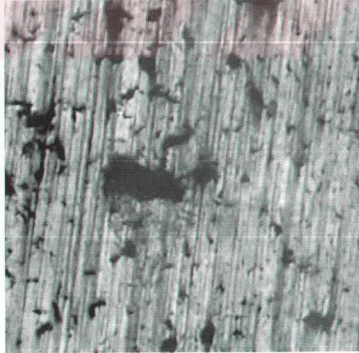
### 7.1 Örnek Motor 1 (Iveco Diesel)

Aşağıdaki çizelgede incelenen 1. motorun özellikleri belirtilmiştir:

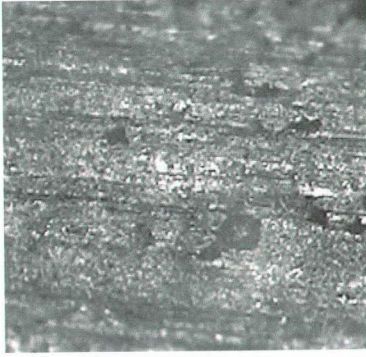
Çizelge 7.1 Örnek motor 1'in özellikleri

	Örnek Motor 1
Markası-Modeli	Iveco Diesel
Üretim Yılı	1998
Motor Hacmi	3300 cc
Yaptığı Yol	170.000 km
Motor Rektifiyesinin Sebebi	Yağ Yakması

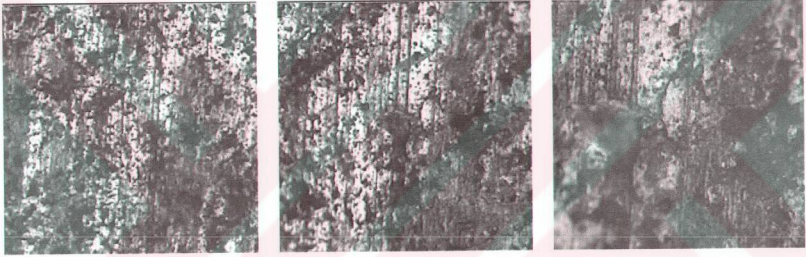
*Optik Mikroskop İncelemeleri:*



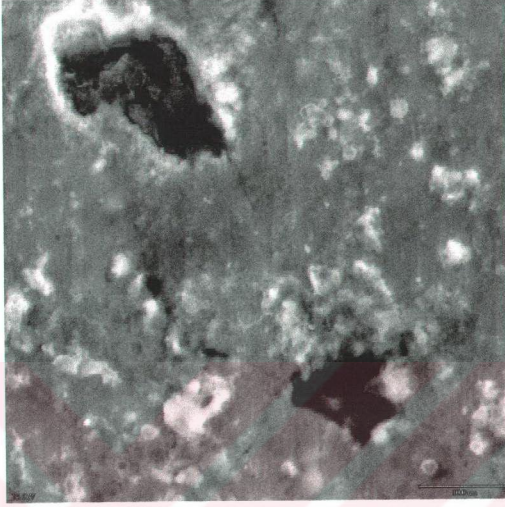
Şekil 7.1 Iveco silindir gömleği (X 100)



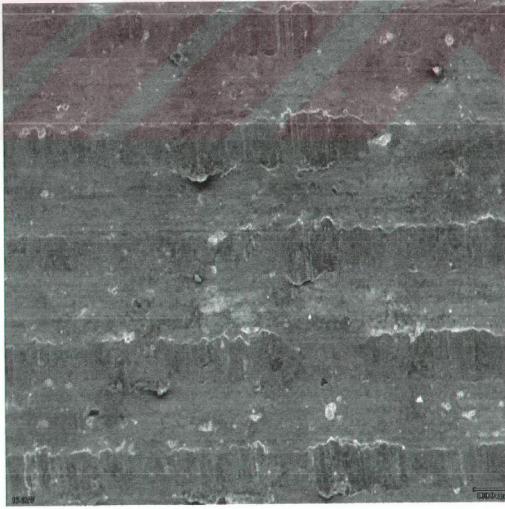
Şekil 7.2 Iveco piston (X 100)



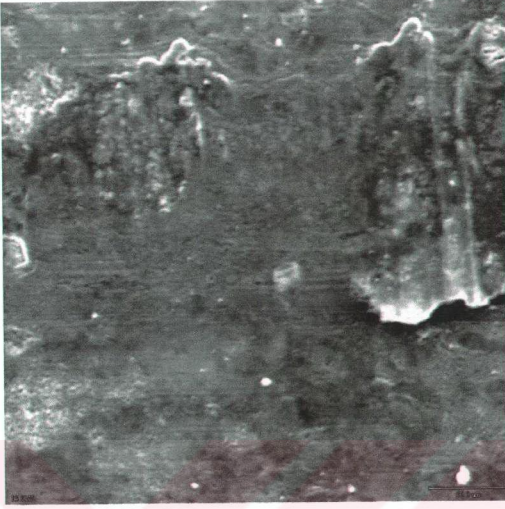
Şekil 7.3 Iveco segman a.(X 50), b.(X 100), c.(X 200)

*Elektron Mikroskobu İncelemeleri:*

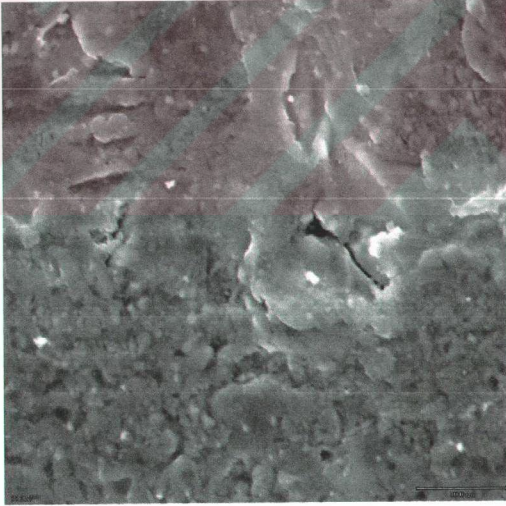
Şekil 7.4 Iveco silindir gömleği (X 2000)



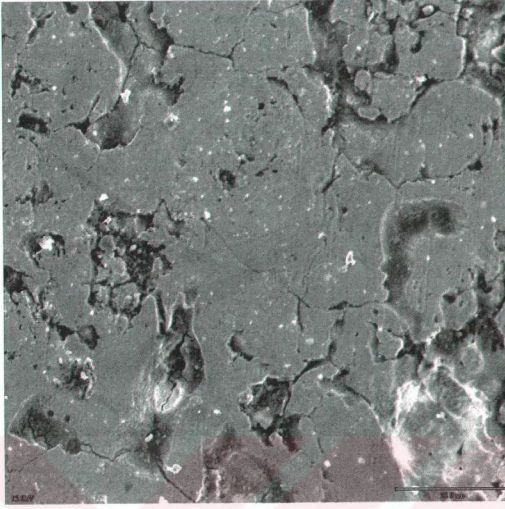
Şekil 7.5 Iveco piston (X 100)



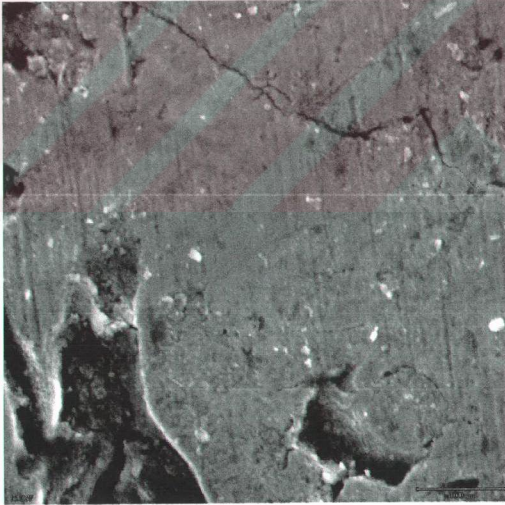
Şekil 7.6 Iveco piston (X 350)



Şekil 7.7 Iveco piston (X 2000)

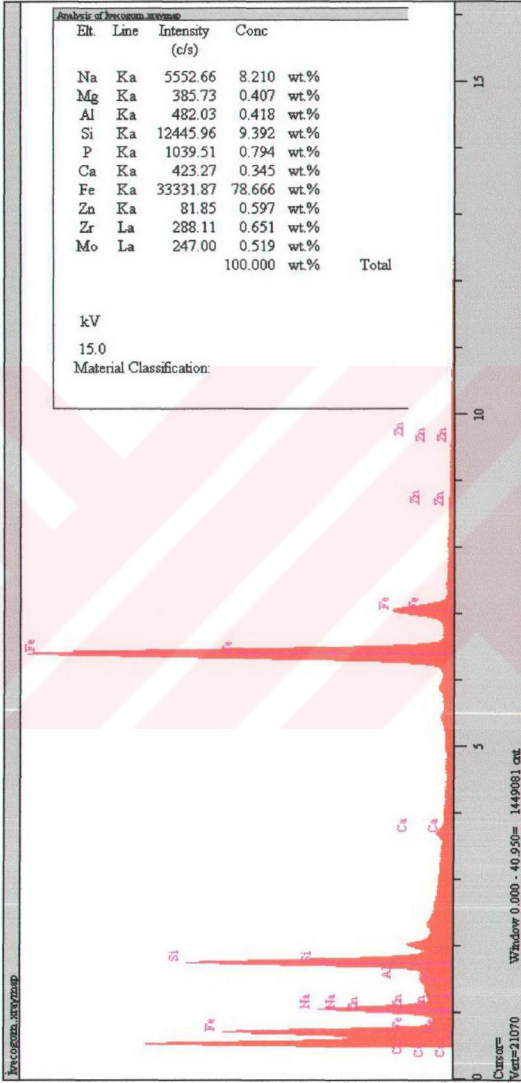


Şekil 7.8 Iveco segment (X 500)

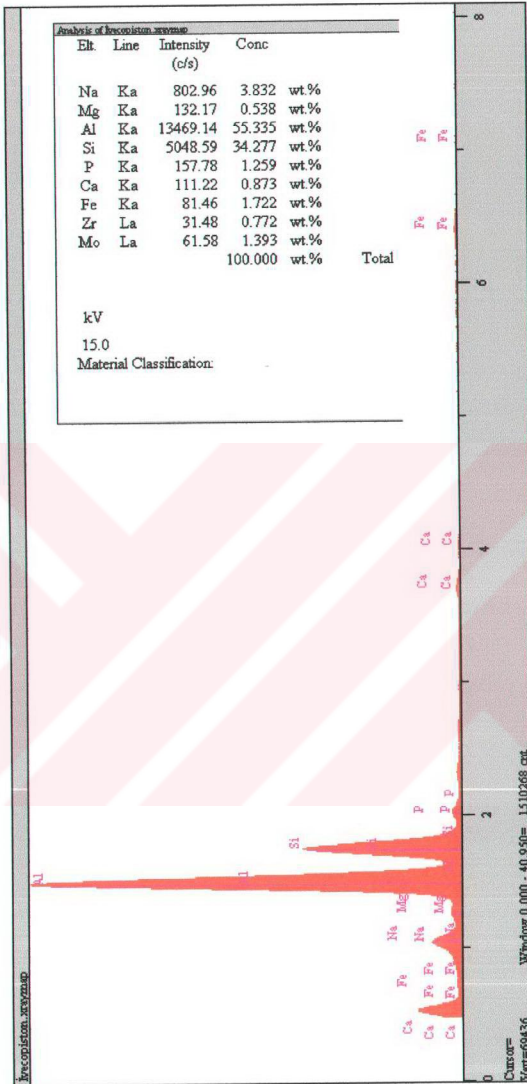


Şekil 7.9 Iveco segment (X 2000)

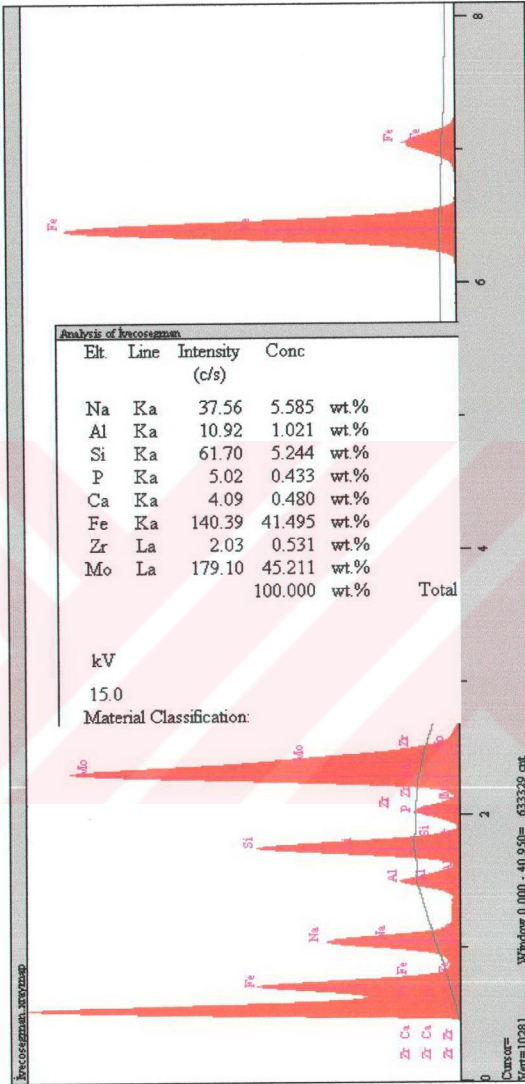
## 'X-ray Mapping' ile Yüzey Haritalamasının Çıkarılması:



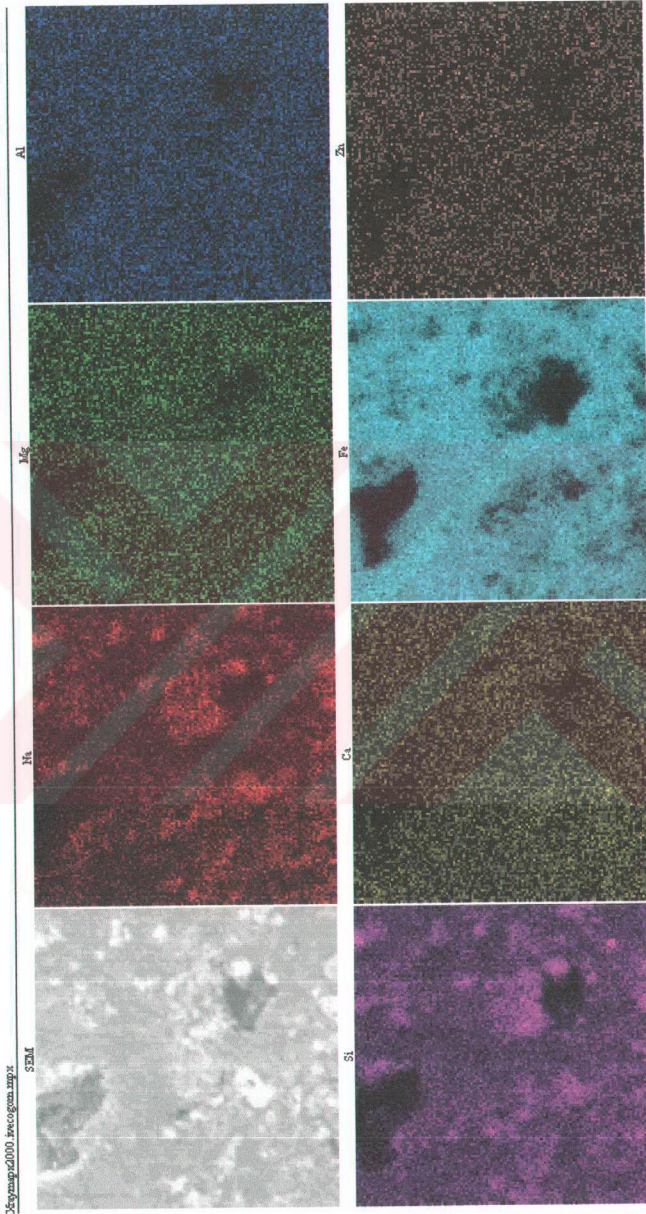
Şekil 7.10 Iveco silindir gömleğinin yüzeyinde bulunan metaller



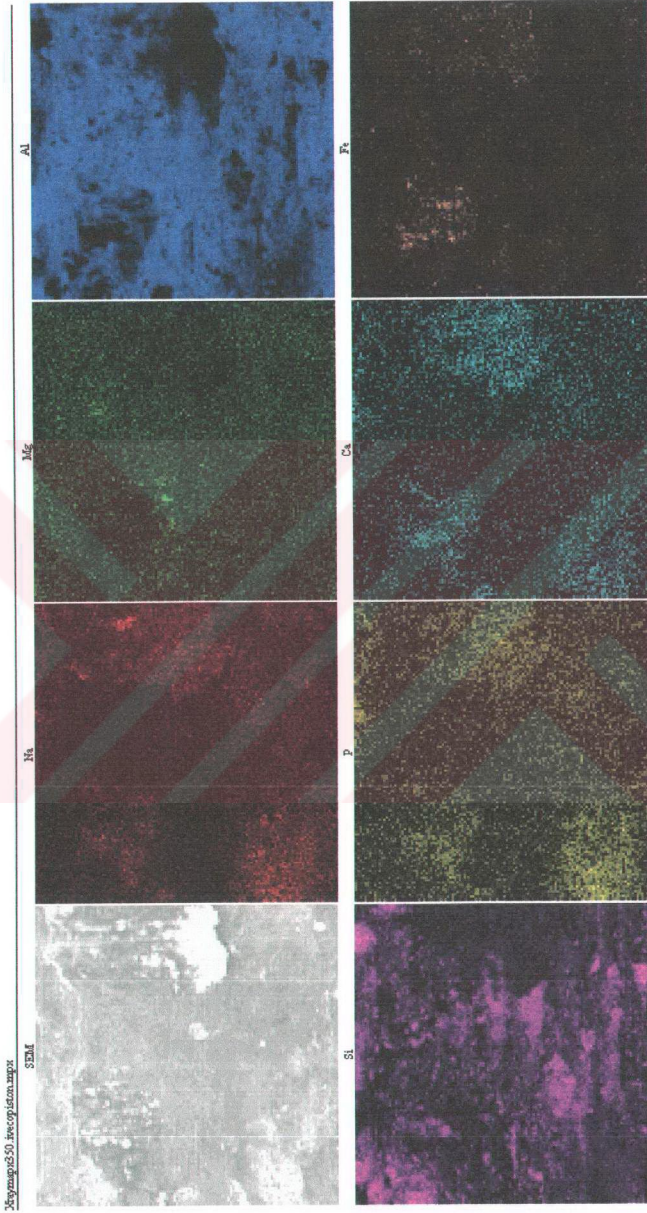
Şekil 7.11 Iveco piston yüzeyinde bulunan metaller



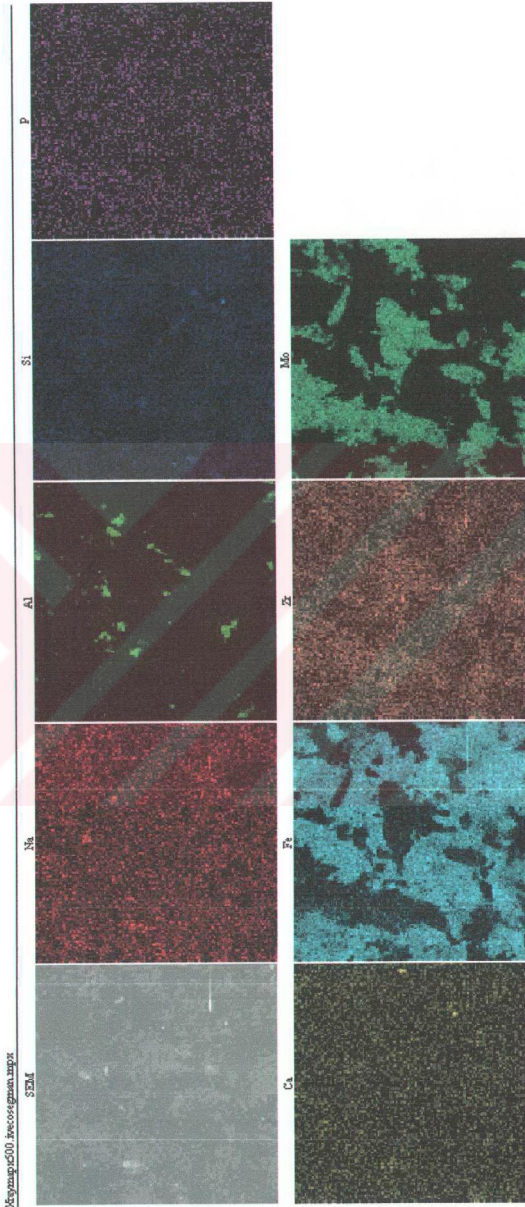
Şekil 7.12 Iveco segman yüzeyinde bulunan metaller



Şekil 7.13 Iveco silindir gömleği yüzeyinde bulunan metallerin X-Ray haritası



Şekil 7.14 Iveco piston yüzeyinde bulunan metallerin X-Ray haritası



Şekil 7.15 Iveco segman yüzeyinde bulunan metallerin X-Ray haritası

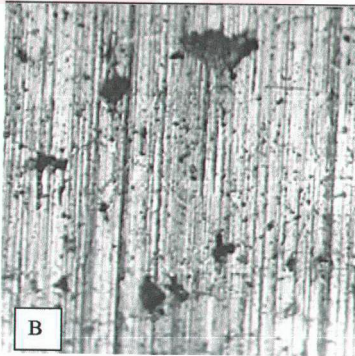
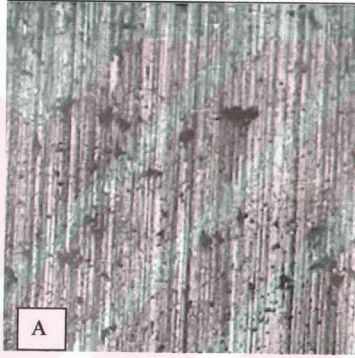
## 7.2 Örnek Motor 2 (Renault 9 Broadway)

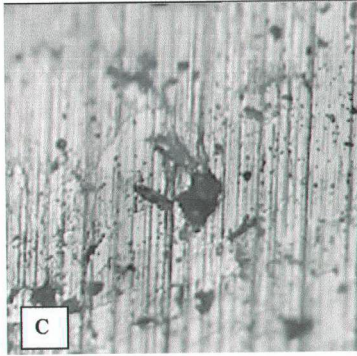
Aşağıdaki çizelgede incelenen 2. motorun özellikleri belirtilmiştir:

Çizelge 7.2 Örnek motor 2'nin özellikleri

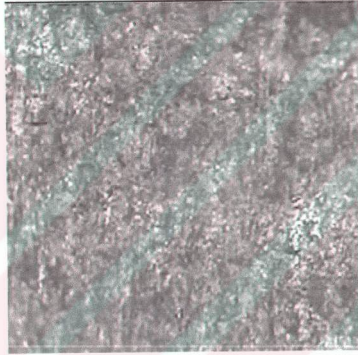
	Örnek Motor 2
Markası-Modeli	Renault 9 Broadway
Üretim Yılı	1992
Motor Hacmi	1400 cc
Yaptığı Yol	167.000 km
Motor Rektifiyesinin Sebebi	Yağ Yakması

*Optik Mikroskop İncelemeleri:*

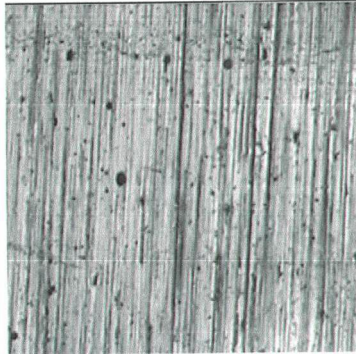




Şekil 7.16 Renault silindir gömleği, A.(X 50), B.(X 100), C.(X 200)



Şekil 7.17 Renault pistonu (X 100)



Şekil 7.18 Renault segmanı (X 50)

## 8. SONUÇLAR

Örnek motor 1 (Iveco Diesel)'in silindir gömleğini incelediğimizde ilk olarak yüzeyde abrazyon aşınması gözükmektedir. Ayrıca adhezyon aşınması, korozyon aşınması ve yorulmaya bağlı olarak pitting meydana gelmiştir. Pistonunda adhezyon aşınması, segmanında ise abrazyon aşınması, yüzey çatlakları ve pitting oluşmuştur.

X-Ray haritaları incelendiğinde, silindir gömleğinde en fazla orana sahip olan metal demirdir. Ayrıca bir miktar silisyum ve alüminyuma da rastlanması pistondaki adhezyon aşınmasına işaret etmektedir. Pistonda en fazla orana sahip metaller silisyum ve alüminyumdur. Çok az miktardaki demir silindir gömleğinden adhezyon aşınması sonucu meydana gelmiştir. Segmandaki en fazla orana sahip olan metaller molibden ve demirdir. Segmanın, aşınmaya karşı direncinden dolayı molibden ile kaplandığı görülmüştür. Yine az miktarda alüminyum ve silisyuma rastlanması adhezyon aşınmasının bir sonucudur. Tüm parçalardaki eser miktardaki çinko, kalsiyum, fosfor, magnezyum, v.s. muhtemelen yağdaki katkı maddelerinden gelmektedir.

Örnek motor 2 (Renault 9 Broadway)'in silindir gömleğini incelediğimizde örnek motor 1 gibi ilk olarak yüzeyde abrazyon aşınması gözükmektedir. Ayrıca adhezyon aşınması, yorulmaya bağlı olarak pitting meydana gelmiştir. Segmanında ise abrazyon aşınması oluşmuştur.

Sonuç olarak, bütün motor parçaları incelendiğinde, aşınma mekanizmalarının literatür ile bağdaştığı görülmektedir. Günümüzde, aşınma mekanizmaları çoğunlukla tarayıcı elektron mikroskobu (SEM – Scanning Electron Microscope) tekniklerinin kullanımı ile elde edilen gözlemler sayesinde açıklandığından, aynı yöntem ile bu sonuca varılmıştır.

**KAYNAKLAR**

- Czichos, H. (1978), Tribology, Elsevier Scientific Publishing Company, Newyork.
- Eyre, T. S. (1976), Wear Characteristics of Metals, Tribology International, England.
- Eyre, T. S. (1980), Wear Diagnosis, Theory and Application, Brunel University, England.
- Eyre, T. S., Dutta, K. K. ve Davis, F. A. (1990), Characterization and simulation of wear occurring in the cylinder bore of the internal combustion engine, Tribology International, England.
- Kaleli, H. (1995), Motorların Değişik İşletme Şartlarında, Yağların Yapısal Değişimlerinin Aşınmalara Etkilerinin İncelenmesi Ve Optimum Yağ Değiştirme Süreçlerinin Araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul.
- Neale, M. (1985), İçten Yanmalı Motorlardaki Silindir Gömleklerinin Yüzey Malzemeleri İçin Potansiyel Yeni Malzemelerin Araştırılması, Michael N. Associates, Surrey, England.
- Neale, M. (1981), 9-59K Deltic Donanma Motorlarındaki (Gemi Dizeli) Piston Aşınmaları Sebeplerinin Araştırılması, Michael N. Associates, Surrey, England.
- Schilling, A. (1972), Automobile Engine Lubrication – Engine Wear, Scientific Publications, England.
- Shell Research Limited (1970), Symposium on Wear in the Gasoline Engine.
- Suh, N.P. (1977), Wear, Russia.
- Taylor, C.M. (1993), Yağlama Rejimleri Ve İçten Yanmalı Motor, Elsevier Science Publishers, Leeds, England.
- Taylor, C.M. (1998), Otomobil Motor Tribolojisi - Verim Ve Dayanıklılık İçin Dizayn Hususları, Elsevier Science Publishers, Netherlands.
- Waterman, N. A. (1979), İngiliz Yüksek Hızlı Trenlerinde Kullanılan Valenta Motorlarındaki Silindir Gömleği Aşınması Üzerine Araştırma, Michael N. Associates, Surrey, England.

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	15.07.1977	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1992-1995	Özel Bilge Kağan Lisesi
Lisans	1995-2000	Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2001-Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Müh. Anabilim Dalı, Enerji Makineleri Programı

**Çalıştığı Kurumlar**

2001-Devam ediyor Telasis Tekstil Ürünleri San. ve Tic. A.Ş.