

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI YAKIT KARIŞIMLARININ SEGMAN-  
SİLİNDİR ÇİFTİ ARASINDAKİ SÜRTÜNME VE  
AŞINMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İdris CESUR**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA EĞİTİMİ**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Adnan PARLAK**

**Temmuz 2008**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

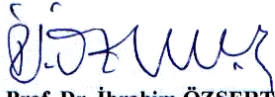
**FARKLI YAKIT KARIŞIMLARININ SEGMAN-  
SİLİNDİR ÇİFTİ ARASINDAKİ SÜRTÜNME VE  
AŞINMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**


**YÜKSEK LİSANS TEZİ**


**İdris CESUR**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA EĞİTİMİ**

**Bu tez 08/ 07 /2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.**

  
**Prof. Dr. İbrahim ÖZSERT**  
**Jüri Başkanı**

  
**Doç. Dr. Adnan PARLAK**  
**Üye**

  
**Yrd. Doç. Dr. Yavuz SOYDAN**  
**Üye**

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmanın hazırlanması sırasında çalıőmalarımı teővik eden, her tŒrlŒ yardımlarını esirgemeyen danıőmanım Doç. Dr. Adnan PARLAK'a minnet borçluyum. Aşınma cihazının tasarım ve imalat aőamasındaki yardımlarından dolayı Arő. GŒr. Murat KAPSIZ'a deneyler sırasında yardımcı olan Arő. GŒr. Vezir AYHAN ve Hasan GŒREL'e őŒkranlarımı sunarım. Aşınma cihazının imalatı aşamasında yardımlarını esirgemeyen tornacı Rahim KALUNSA'ya őŒkranlarımı sunarım. Tez yazım aşamasında bana yardımcı olan aileme ve tŒm arkadaőlarıma teőekkŒrlerimi sunarım.

Temmuz 2008

İdris CESUR

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
SUMMARY.....	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
YAĞLAMA VE YAĞLAMA REJİMLERİ .....	6
2.1. Yağlama Rejimleri.....	9
2.1.1. Hidrodinamik yağlama.....	10
2.1.2. Elastohidrodinamik yağlama.....	13
2.1.3. Karışık yağlama.....	13
2.1.4. Sınır yağlama.....	14
2.2. Viskozite.....	15
BÖLÜM 3.	
SÜRTÜNME VE AŞINMA MEKANİZMALARI .....	16
3.1. Sürtünme Mekanizmaları.....	16
3.1.1. Kayma ve yuvarlanma hareketleri.....	17
3.1.2. Kuru ve yağlanmış yüzey kavramları.....	18
3.1.3. Sınır sürtünme.....	18

3.1.4. Film sürtünmesi.....	21
3.1.5. Kuru sürtünme teorileri.....	22
3.2.Aşınma Mekanizmaları.....	25
3.2.1.Aşınmanın temel unsurları.....	27
3.2.2. Aşınma zaman ilişkisi.....	31
3.2.3. Abrazif aşınması.....	32
3.2.3.1. İçten yanmalı motorlarda abrazif aşınması.....	35
3.2.4. Adhezif aşınması.....	36
3.2.4.1. İçten yanmalı motorda adhezif aşınması.....	39
3.2.5. Titreşim (Fretting) Aşınması.....	44
3.2.6. Korozyon aşınması.....	45
3.2.6.1. İçten yanmalı motorlarda korozyon aşınması.....	47
3.2.7. Yorulma aşınması.....	49
3.2.7.1. İçten yanmalı motorlarda yorulma aşınması.....	49
3.2.8. Motor çalışma koşullarının aşınmaya etkisi.....	51
3.2.8.1. Motor gücü ve ortalama efektif basınç.....	51
3.2.8.2. Anormal yanma.....	51
3.2.8.3. Sıkıştırma oranı.....	52
3.2.8.4. Sıcaklık.....	53
3.2.8.5. Devir sayısı.....	54
3.2.8.6. Hava fazlalık katsayısı.....	55
3.2.8.7. Motor ilk hareketi.....	56
3.2.8.8. Egzoz gazlarının resirkülasyonu.....	57
3.2.9. Aşınma Ölçüm Yöntemleri.....	59
3.2.9.1. Ağırlık farkı yoluyla ölçme.....	59
3.2.9.2. Kalınlık ölçme yöntemi.....	60
3.2.9.3. İz değişiminin ölçülmesi yöntemi.....	60
3.2.9.4. Radyoizotoplarla ölçme yöntemi.....	60
MATERYAL METOD.....	61
4.1. Yağlayıcılar.....	61
4.2. Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi.....	63
4.3. Aşınmanın Ölçülmesi.....	66

4.4. Tasarım ve İmalat.....	66
BÖLÜM 5.	
DENEY SONUÇLARI.....	73
5.1. Sürtünme Deneyleri.....	73
5.2. Aşınma Deneyleri.....	80
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	90
KAYNAKLAR.....	92
ÖZGEÇMİŞ.....	96

## SİMGELER VE KISALTMALAR

$Al_2O_3$	: Alüminyum Oksit
$A_{em}$	: Aşınma sınırı
$B_4C$	: Baryum karbür
$CO_2$	: Karbondioksit
$d$	: Aşınan parçaların çapı
$E$	: Young modülü
$E$	: Bağlı aşınma dayanımı
$F_s$	: Sürtünme Kuvveti
$F_n$	: Normal Kuvvet
$F_{ad}$	: Adeziv kesme direnci
$F_{kd}$	: Yağ filminin kayma direnci
$F_{yağ}$	: Filmde oluşan basınç
$H_y$	: Yüzey sertliği
$H_{ort}$	: Ortalama efektif yağ filmi
$K$	: Aşınma sabiti
$N$	: Newton
$NO_x$	: Azot oksit
$P$	: Uygulanan yük
$P_a$	: Aşınan yüzeyin akma gerilmesi
$R_{t1}, R_{t2}$	: Yüzey pürüzlülüğü
$SiC$	: Silisyum karbür
$S$	: Kayma mesafesi
$\sigma_{kf}$	: Kayma mukavemeti
$TiC$	: Titanyum karbür
$U$	: Kayma hızı
$X$	: Kayma uzaklığı

$\nu$	: Poission oranı
V	: Hız
$W_{ab}$	: Temas eden metalin işi
$\mu$	: Sürtünme Katsayısı
$\eta$	: Viskozite
$\sigma_{kf}$	: Kopma mukavemeti
$\sigma_y$	:Metalin Eğilme Gerilimi
AYME	: Ayçiçek yağı metil esteri
EHD	: Elastohidrodinamik yağlama
EGR	: Egzoz Gazı Resirkülasyonu
KMA	: Krank Mili Açısı
SEM	: Scanning Electron Microscopy
TTYME	: Tütün tohumu metil esteri
ÜÖN	: Üst Ölü Nokta
AÖN	: Alt Ölü Nokta



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.	İçten yanmalı bir motorun enerji dağılımı.....	3
Şekil 2.1.	Spesifik yağlanmış motor parçaları ile ilişkilendirilmiş, geleneksel yağlama rejimlerini gösteren Stribeck diyagramı.....	11
Şekil 2.2.	Stribeck diyagramı.....	12
Şekil 3.1.	Sürtünme Çeşitleri.....	17
Şekil 3.2.	Tribolojik sistemlerin kinematığı.....	17
Şekil 3.3	Sınır Sürtünmesi.....	20
Şekil 3.4	Film Sürtünmesi.....	21
Şekil 3.5.	Sürtünme Katsayısının Tanımlanması.....	23
Şekil3.6.	Aşınma Zaman İlişkisi.....	32
Şekil 3.7.	a) İki elemanlı abrazif aşınma b) Üç elemanlı abrazif aşınması...	33
Şekil 3.8.	Adhezif aşınması.....	37
Şekil 3.9.	Adhezif silindir aşınmasının tipik şekli.....	43
Şekil 3.10.	Dizel motorlarda piston segmanları üzerindeki basınç.....	43
Şekil 3.11.	Zamana bağlı korozyon aşınma tipleri.....	47
Şekil 3.12.	Yumuşak korozyon aşınması .....	49
Şekil 3.13.	Petter AV1 motorunda yüküne bağlı olarak segman aşınması.....	51
Şekil 3.14.	Tek silindirli benzin motorunda motor yüküne bağlı olarak segman aşınması.....	52
Şekil 3.15.	Tek silindirli motorda sıkıştırma oranının üst segmana etkisi.....	53
Şekil 3.16.	Motor hızının segman aşınması üzerinde etkisi .....	54
Şekil 3.17.	Motor hızının silindir cidarı aşınmasının etkisi.....	54
Şekil 3.18.	Hava fazlalık katsayısının üst segman aşınmasına etkisi.....	55
Şekil 3.19.	Benzinli motorda radyoaktif yöntemle aşınma oranının belirlenmesi.....	56

Şekil 3.20.	Çalışma koşullarının değiştirilmesi durumunda meydana gelen aşınma oranındaki değişim.....	57
Şekil 3.21.	EGR'nin segman aşınmasına etkisi.....	58
Şekil 3.22.	EGR yüzdesinin piston aşınmasına ve NO <sub>x</sub> oluşumuna etkisi	59
Şekil 4.1.	Yağlayıcıların Sıcaklığa Bağlı Olarak Dinamik Viskozite Değişimi.....	62
Şekil 4.2.	Normal kuvvetin belirlenmesi.....	63
Şekil 4.3.	Programın bilgisayara tanıtılması.....	64
Şekil 4.4.	Programın ayarlanması.....	65
Şekil 4.5.	Programın başlatılması.....	65
Şekil 4.6.	Hassas Terazî.....	66
Şekil 4.7.	Segman-gömlek numunesinin şematik görünümü.....	67
Şekil 4.8.	Tasarlanan aşınma cihazının katı modeli.....	67
Şekil 4.9.	Gömlek numunesinin bağlanması.....	68
Şekil 4.10.	Bilyalı yatakların ve diğer parçaların montajı.....	68
Şekil 4.11.	Termostat.....	69
Şekil 4.12.	Sürücü.....	70
Şekil 4.13.	Segman tutucu.....	70
Şekil 4.14.	Yük hücresi ve segman tutucunun bağlantısı.....	71
Şekil 4.15.	Gömlek aşınma izi.....	71
Şekil 4.16.	Aşınma cihazının görünüşü.....	72
Şekil 5.1.	Krank Mili Açısına Bağlı Olarak Piston Hızı Değişimi.....	74
Şekil 5.2.	%100 Yağ'ın Devir ve Yüke Bağlı Olarak Sürtünme Katsayısı Değişimi.....	75
Şekil 5.3.	%100 Yağ'ın %50 Yağ + %50 Dizele Göre Sürtünme Katsayısının Karşılaştırılması.....	76
Şekil 5.4.	%100 Yağın %100 Dizel'e Göre Sürtünme Katsayısının Karşılaştırılması.....	77
Şekil 5.5.	%100 Yağ'ın %AYME'ne Göre Sürtünme Katsayısının Karşılaştırılması .....	78
Şekil 5.6.	%100 TTYME'nin %AYME'ne Göre Sürtünme Katsayısının Karşılaştırılması .....	79

Şekil 5.7.	%100 TTYME'nin %Dizel'e Göre Sürtünme Katsayısının Karşılaştırılması.....	79
Şekil 5.8.	%100 Yağın %50Yağ+%50Dizele Göre Gömlek Aşınma Miktarının Karşılaştırılması.....	81
Şekil 5.9.	%100 Yağın %50Yağ+%50Dizele Göre Segman Aşınma Miktarının Karşılaştırılması.....	81
Şekil 5.10.	100 N 60 d/d' da a) orijinal gömlek ve b) %100 yağlama durumunda SEM ile çekilmiş görünümü.....	82
Şekil 5.11.	100 N 60 d/d' da a) orijinal gömlek ve b) %50Yağ + %50 Dizel ile yağlama durumunda SEM ile çekilmiş görünümü.....	82
Şekil 5.12.	%100 TTYME'nin %100 AYME'ne Göre Gömlek Aşınma Miktarının Karşılaştırılması.....	83
Şekil 5.13.	%100 TTYME'nin %100 AYME'ne Göre Segman Aşınma Miktarının Karşılaştırılması.....	84
Şekil 5.14.	100 N 60 d/d' da a) orijinal gömlek, b) %100 AYME ile yağlama, c) %100 TTYME ile yağlama durumunda SEM ile çekilmiş gömlek görünümü.....	85
Şekil 5.15.	%100 Yağın %100 Dizel'e Göre Gömlek Aşınma Miktarının Karşılaştırılması.....	86
Şekil 5.16.	%100 Yağın %100 Dizel'e Göre Segman Aşınma Miktarının Karşılaştırılması.....	86
Şekil 5.17.	100 N 60 d/d' da a) orijinal gömlek ve b) %100 Dizel ile yağlama durumunda SEM ile çekilmiş görünümü.....	87
Şekil 5.18.	%100 TTYME'nin %100 Dizel'e Göre Gömlek Aşınma Miktarının Karşılaştırılması.....	87
Şekil 5.19.	%100 TTYME'nin %100 Dizel'e Göre Segman Aşınma Miktarının Karşılaştırılması.....	88
Şekil 5.20.	100N Yük Altında Gömlek Aşınma Miktarının Farklı Yağlayıcılara Göre Değişimi.....	88
Şekil 5.21.	100N Yük Altında Segman Aşınma Miktarının Farklı Yağlayıcılara Göre Değişimi.....	89

## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1.	Bazı metal çiftlerinin sürtünme katsayıları ve aşınma oranları.....	27
Tablo 3.2.	Aşınma çeşitleri.....	28
Tablo 3.3.	İçten yanmalı motorlarda meydana gelen aşınma türleri .....	29
Tablo 3.4.	Rejim halindeki motor sıcaklık değerleri.....	30
Tablo 3.5.	Abrazif aşınmaya karşı metal dayanımları.....	36
Tablo 3.6.	Yorulma ömrüne katkıların etkisi.....	50
Tablo 4.1.	Deneylerde kullanılan yağlayıcıların özellikleri.....	61

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Motorlar, sürtünme, aşınma, yağlama, alternatif yakıtlar

Birbiri ile temas halinde hareket eden makine parçaları arasında sürtünme ve aşınma meydana gelmektedir. Aşınarak deforme olan parçaların dayanımı azalmakta ve kopma, kırılma ve yağsız ortamlarda birbirine yapışma gibi istenmeyen arızalara sebebiyet vermektedir. Aşınmanın en aza indirilmesi, birbiri ile uyumlu malzeme seçiminin yanında çalışma şartları da önemlidir. Bu yüzden aşınmayı önlemek için yağlayıcı ve yağlama sistemleri kullanılmalıdır.

İçten yanmalı motorlarda gücün bir bölümünün sürtünme kayıplarında harcanması, aracın performans ve yakıt ekonomisinin belirlenmesinde önemli faktörlerden birisidir. Yakıtın yanması ile ortaya çıkan ısı segman gurubu tarafından silindir gömleğine iletilir ve gömleğin aşınma direncini azaltır. Ayrıca yağın oksidasyonuna ve buharlaşmasına sebep olur. Su buharı, asidik yanma ürünleri, karbon birikintileri ve yanmadan dolayı oluşan parçacıklar, silindir gömleği ve segmanların aşınmasına katkıda bulunur. Yanma ürünleri ve aşınmadan dolayı oluşan parçacıklar yağa karıştığında yağın özelliğini bozarak istenen yağlama şartlarının oluşmasını engeller. Böylece motorlardaki sürtünme ve aşınma miktarlarının artmasına yol açarak güç kayıplarının artmasına sebep olur.

Bu çalışmada, segman-silindir çifti arasındaki sürtünme ve aşınmayı incelemek amacıyla bir aşınma cihazının tasarım ve imalatı yapılmıştır. Daha sonra aşınma cihazında yağlayıcı olarak % 100 yağ, % 100 dizel, % 50 dizel + % 50 yağ, % 100 TTYME (tütün tohumu metil esteri) ve % 100 AYME' nin (ayçiçeği yağı metil esteri) kullanılmasının segman-silindir çifti arasındaki, yük ve devir değişimlerine bağlı olarak sürtünme ve aşınmaya olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

# **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE DIFFERENT FUEL MIXTURES ON THE PROPERTIES OF FRICTION AND WEAR BETWEEN CYLINDER LINER SURFACE - PISTON RING**

## **SUMMARY**

Key Words: Engine, friction, wear, lubrication and alternative fuels

Friction and wear between mechanical parts that are continuously moving together have become. Resistance of the wearing parts are reduced which causes undesirable troubles such as breaking, fractures or sticking in the without oiled environment. To minimize wearing effect, it is important to choose compatible materials and also working parameters. For this propose to minimize the wearing of the moving materials appropriate lubricant and lubricating system must be used.

Using a portion of the power for the friction loss in an internal combustion engine is one of the most important factors as determining the fuel economy and performance of the vehicle. The heat produced in the combustion of the fuel is conducted to the cylinder liner surface by the piston ring and also reduces wear resistance of the cylinder surface. Also, it causes oxidation and evaporation of the lubricant oil on the upper cylinder walls. Water vapor, acidic combustion products, carbon deposits and particles originating from the combustion process make a contribution to the wear of the piston, rings and cylinder liner. When the combustion products and wear particles from the piston ring area are mixed into the lubricating oil on the piston rings, an oil composition with poor lubricating properties is formed on the piston rings. Thus, friction and wear in engine increases. And this increase in friction causes to increase of power loss.

In this study, a wear device is designed and manufactured for the purpose of examining friction and wear between piston ring-cylinder liner. The effect of using 100% oil, 100% diesel, 50% oil + 50% diesel, 100% TTYME, and 100% AYME as a lubricant on the friction and wear is examined experimentally, depending on the load and revolution(cycle) between piston ring-cylinder liner.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Bilim ve teknolojinin hızla ilerlediği günümüz teknolojisi, endüstriyel alanda makine ve donanımların yüksek mekanik özelliklere sahip, uzun ömürlü ve kaliteli mamullerin kullanılmasını gerektirmektedir. Özellikle endüstri alanında, malzeme kayıplarının azaltılması açısından aşınmaya neden olan mekanizmaların iyi bilinmesi önemlidir.

Aşınma yüzeylerinde oluşan malzeme kaybı, çalışma esnasında malzemelerin ömrünü ve çalışma performansını etkileyeceğinden ekonomik ve emniyet açısından çok önemlidir [1].

İçten yanmalı motorlarda sürtünme, toplam güç kaybının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Silindir içerisindeki yakıt-hava karışımını yanması sonucu oluşan basınç, piston-biyel-krank mekanizmasıyla işe dönüştürülerek çıkış miline aktarılır. Bu aktarım esnasında, işin bir kısmı sürtünmeleri yenmek için harcanır. Bu işe sürtünme işi denir. Bu kaybın büyük bir kısmı, segman-silindir ve piston eteği-silindir arasındaki sürtünmeden kaynaklanmaktadır.

Motordan elde edilen gücün bir kısmı da, motor ve motor aksesuarlarından çeşitli şekilde kaybedilmektedir. Sürtünme kayıpları, maksimum momenti ve özgül yakıt sarfiyatını direkt olarak etkilemektedirler.

Sürtünme neticesinde açığa çıkan ısı, soğutma sistemine ve yağlama yağına transfer edilmektedir. Bu nedenle sürtünme kayıpları soğutma sisteminin boyutlarının büyümesine de etki etmektedir.

Motorlarda sürtünmeye neden olan faktörler üç ana başlık altında incelenmektedir:

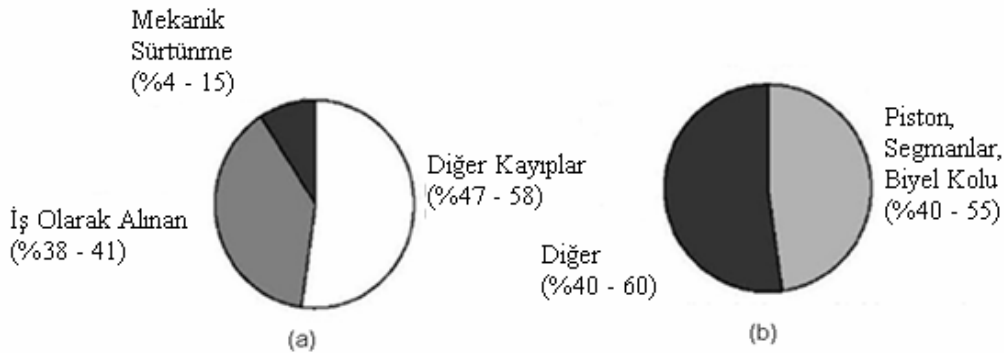
1. Taze dolgunun emme sistemi vasıtasıyla (hava filtresi, emme manifoldu, benzinli motorlarda gaz kelebeği ve supaplar) silindire alınması ve yanmış gazların silindirden ve egzoz sisteminden dışarı atılması esnasında harcanan iş. Bu işe, pompalama işi denir. Şehir içi çalışma koşullarında, gaz kelebeği kısmi açık olduğundan benzinli motorlarda önemlidir.

2. Motorda birbirlerine göre bağıl hareket yapan parçalar arasındaki sürtünmelerin yenilmesi için harcanan iştir. Bu iş direk sürtünme işi olarak adlandırılır. Motorda bağıl hareket yaparak sürtünme kaybına neden olan parçalar: Silindir-piston segmanları, piston eteği-silindir gömleği, piston-piston pimi, krank ve kam mili yatakları; supap mekanizmaları, dişli, kasnak ve kayışlardır. Dizel motorlarında sürtünme kayıpları içerisinde en büyük kaybı direk sürtünme kayıpları oluşturur.

3. Motor milinden hareket alan ve aksesuarlara harcanan kayıplardır. Parazitik kayıplar olarak da adlandırılır. Motordan hareket alan parçalar: Fan, devir daim pompası, yağ pompası, direksiyon hidrolik pompası ve klima [2].

Şekil 1.a' da, tipik dizel motorunun veya buji ateşlemeli motorunun toplam enerjisinin dağılımını göstermektedir. Bu şekil, toplam enerjinin % 4–15' inin mekanik sürtünme kaybı olduğunu göstermektedir. Toplam mekanik kayıpların % 40–55' i pistonlar, segmanlar ve biyeler tarafından oluşturulmuştur. Bu Şekil 1.b' de gösterilmiştir. Richardson sürtünmenin, % 18–33' ünün biyel kollarından, % 28–45' inin segmanlardan ve % 25–47' sinin pistonlardan kaynaklandığını belirtmiştir. Düşük sürtünme için motorların iyi bir şekilde dizayn, uygun malzeme seçilmesi, yağlama yağı kullanılması ve yağlama sistemlerinin iyi yapılması gerekir [3].





Şekil 1. İçten yanmalı bir motorun enerji dağılımı [3]

İçten yanmalı motorlarda sürtünme ve aşınmayı iyileştirmek için, yağlama ve malzeme özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir. Bu nedenle kullanılan yağlayıcılara katkı maddeleri katılarak yağlama özellikleri iyileştirilmektedir [3].

Aşınma; uygun malzeme seçimi (malzemenin kristal yapısı, malzeme sertliği, elastisite modülü, deformasyon davranışı ve yüzey pürüzlülüğünün iyi olan bir malzeme), hareket halinde olan malzemeler arasında ortamın (sıcaklık, nem ve atmosfer) iyi belirlenmesi, uygun yağ ve yağlama rejimi, sürtünme, yüzeye uygulanan yük ve kayma mesafesinin azaltılması ile aşınma miktarı azaltılmaktadır[4].

Segman-silindir çifti arasında meydana gelen sürtünme-aşınmayı araştırmak ve azaltmak amacıyla birçok çalışma yapılmıştır.

Taylor [5], yağlama rejimleri ile ilişkili fiziksel ve kimyasal hareketleri tanımlamıştır. Bu tanımlar hidrodinamik, elastohidrodinamik, karışık ve sınır yağlama şartıdır. Motorlarda bu yağlama rejimlerinin tamamına rastlanmaktadır. Motorlardan elde edilen toplam enerjinin % 4 -15' ni mekanik kayıplarla sürtünmelere harcadığını belirlemişlerdir.

Tung ve ark. [6], bir aşınma cihazında yağlayıcı olarak etanol-kurşunsuz benzin (E85) ve molibden kükürtlü karbon (MODTC) içerikli yağlama yağı kullanarak,

farklı malzemelerin (nitrit ve krom kaplamalı paslanmaz çelik segmanlar ile dökme demir gömlek) sürtünme ve aşınma davranışlarını araştırmışlardır. Deney aşamasında, yağ ile etanol-benzin (E85) karışımını kullanıp farklı çalışma sıcaklıklarında (yakıt-yağ karışımında 60 °C’de, sadece yağ ile ise 125° C’ de) ve farklı yükler altında segman-silindir çiftinin sürtünme ve aşınmasını araştırmışlardır. Yakıt akış oranı 25 ml/h, yağ akış oranı ise 0,5 ml/h’ dir. 10 saat yakıt-yağ karışımını, 20 saat boyunca ise sadece yağ ile olan sürtünme ve aşınma davranışını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada aşınma cihazında nitrit kaplamalı segmanda molibden içerikli yağlama yağı kullanıldığında, organik yağlayıcıya göre sürtünme katsayısı daha düşük değerler vermiştir. Fakat krom kaplı segmanlarda, organik yağlayıcı kullanıldığında daha düşük sürtünme katsayısı değerleri elde etmişlerdir.

Sung ve ark. [7], segman-silindir çifti arasındaki sürtünmeyi yağlama rejimlerine göre araştırmışlardır. Sürtünme katsayısını piston segmanın ölü noktalarda ve orta strokta ölçmüşlerdir. Sınır yağlama şartında sürtünme katsayısını 0.14, karma ve hidrodinamik yağlama şartlarında ise minimum sürtünme katsayısı 0.03 olarak belirlemişlerdir. Sürekli çalışma durumlarında hidrodinamik yağlama rejiminde, minimum aşınma miktarı ve sürtünme gücü kaybını belirlemişlerdir.

RYK ve ark. [8], segmandaki sürtünmeyi azaltmak için lazer kaplama yöntemini (LST) kullanmışlardır. Deneyleri, kaplamalı ve kaplamsız (STD) segmanı kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Kaplamalı segman kullanıldığında sürtünmenin, standart segmana göre % 25 azaldığını tespit etmişlerdir.

Guizhen ve ark. [9], düşük sıcaklıklarda katı yağlama ile yüzey karakteristiklerini ve tribolojik özellikleri araştırmışlardır. 1045 çeliğinden imal edilmiş silindir gömleğine çift kaplı molibdene iyon ve proton kaplayarak deneyler yapılmıştır. Deneyler bir dizel motorunda katı yağlama yapılarak sürtünme ve aşınma karakteristikleri incelemiştir. Deney sonuçlarına göre, çift kaplı molibdene iyon ve proton ile kaplayarak daha az sürtünme ve daha sınırlı aşınma elde etmişlerdir.

Truhan ve ark. [10], segman-silindir çifti arasındaki sürtünme ve aşınmayı bir aşınma cihazında incelemiştir. Gömlek malzemesi gri dökme demir, segman ise 200 µm

kalındığında plazma kaplamalı kromdur. Bu çalışmada, Jet A hava yakıtı, mineral yağ, yeni ve kullanılmış 15W40 motor yağı kullanılarak, farklı yağlama rejimlerinde ve sıcaklıklarda yüke bağlı olarak segman malzemesinin sürtünme davranışını araştırmışlardır. Aynı şartlar altında farklı yağlayıcılar kullanarak yaptıkları deneylerde, sürtünme katsayısının maksimum Jet A yakıtında, minimum ise kullanılmış 15W40 yağda olduğunu tespit etmişlerdir. Aşınma miktarının değişimi sürtünme katsayısında olduğu gibi en az aşınma kullanılmış 15W40 yağ ile olduğunu saptamışlardır.

Bu çalışmanın amacı, segman-silindir çifti arasındaki sürtünme ve aşınmanın değişik yağlayıcılara bağlı olarak belirlenmesidir. Bu amaçla, segman-silindir arasındaki sürtünme ve aşınmayı belirlemek için bir aşınma cihazının tasarım ve imalatı yapılmıştır. Daha sonra aşınma cihazında yağlayıcı olarak % 100 yağ, % 100 dizel, % 50 dizel + % 50 yağ, % 100 TTYME (tütün tohumu metil esteri) ve % 100 AYME' nin (ayçiçeği yağı metil esteri) kullanmak suretiyle segman-silindir çifti arasında kaynaklanan sürtünme ve aşınmanın, yük ve devir sayılarına bağlı değişimi araştırılmıştır.

## BÖLÜM 2. YAĞLAMA VE YAĞLAMA REJİMLERİ

Yağlama, birbirine göre bağıl hareket eden iki yüzeyi, yüzeye zarar vermeden kolayca yüzeyden kopabilen bir sıvı filmi yardımı ile ayırmaktır. Temasta ve birbirine göre izafi harekette olan iki elemanın temas yüzeyleri arasında sürtünme ve buna bağlı olarak aşınma, sıcaklık artışı ve enerji kaybı meydana gelmektedir. Bu olayların etkisini azaltmak için, alınması gereken tedbirlerin başında yağlama gelir.

Sürtünme, aşınma ve yağlama konularını ve bu olayları inceleyen bilim dalına triboloji denir. Triboloji, birbirine sürtünen cisimlerin karşılıklı etkileşimini inceleyen bir bilim dalıdır. Triboloji kapsamına giren konuların başında, sürtünmenin en aza indirilmesi gelmektedir. Çünkü sürtünme, önemli oranda enerji kaybına yol açmaktadır. Tribolojik katkının başarılı olması için yağlama teknolojileri sıklıkla kullanılmakta, fakat bu çok sayıda çevresel probleme neden olabilmektedir [11].

Yağlamanın ana amacı sürtünmeleri azaltıp, parçaların ömrünü uzatarak motordan en fazla güç elde edilmesini sağlamaktır. Hareketi kolaylaştırmak daha fazla verim almak ve çalışan parçaların ömrünü uzatmak için, parçaların birbiriyle doğrudan doğruya sürtünmelerini önlemek gerekir. Dünya çapında yapılmış olan istatistiklere göre makine elemanlarının yaklaşık % 70' inin işe yaramaz hale gelmesinin nedeni aşınmadır. Yağlama ile sistemin verimi çok az artırılsa bile, tasarruf edilen paranın tutarı milyarları geçmektedir. Ayrıca meydana gelen malzeme kayıpları ve onarım için harcanan zaman göz önüne alınırsa yağlamanın önemi daha iyi anlaşılır [14].

Yağların temel özellikleri koruyucu ve kaydırıcı olmalarıdır. Fakat belirli süre kullanılan yağların bu özellikleri bozularak motor parçaları üzerinde aşınmalar meydana gelmekte, motorun bakım ve revizyona girme periyodu kısalmaktadır [15]. Parça deformasyonuna bağlı olarak motor karakteristikleri de değişmektedir. Yağ ömrü tüm araçlar için genel bir süre ile belirtilmekte ve o süre sonunda değiştirilmesi

tavsiye edilmektedir. Halbuki yağ ömrüne etki eden parametreler taşıta göre değişim göstermektedir. Bunlar aracın markası, modeli, çalışma koşulları, iklim şartları vb. olarak sayılabilir. Dolayısıyla farklı çalışma koşullarına sahip olan araçların yağ değişim periyotları da değişmektedir. Yağlardan optimum seviyede faydalanılması ve yağ tüketiminin azaltılması için yağın analiz edilerek değiştirilmesinde fayda görülmekte ve kullanılmış yağların analizinden motorun durumu hakkında genel bilgi edinilebilmektedir. Son yıllarda motorlarda kullanılan yağlar geliştirilerek değiştirilme süreleri uzatılmakta, yağ viskoziteleri ve sürtünme kuvveti azaltılarak egzoz emisyonları iyileştirilmekte ve yakıt ekonomisinde de iyileşme sağlanmaktadır.

Düşük viskoziteli sentetik ve yarı sentetik yağların daha az uçucu olmaları nedeniyle, kullanımları sırasında yağ tüketimleri azalmaktadır. Bu tür yağlarda, sürtünmeyi azaltıcı katkı maddeleri kullanılarak bilhassa sınır sürtünme şartlarında kaydırıcılık artırılarak metal yüzeyler korunmaktadır [16].

Yağlayıcılar 5000 yıl önce, Asurlar ve Mısırlar tarafından büyük heykelleri 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 yönlendirilmiştir. Bu dönemden önce, bilimsel ilgi "saf" sıvı mekaniği teorileri üretmek üzerine yoğunlaşmıştır. Hidrodinamik üzerine 1900 yılına kadar yapılan araştırmalarda, asıl ilgi sıvıların iç sürtünmesini ihmal eden matematik problemlerini çözmek üzerine yoğunlaşmıştır [17].

Yağlanmış makine 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.

$$F_F = \frac{\eta \cdot v}{h_{ort}} A_{ıslak} \quad (2.1)$$

Burada;  $\eta$  dinamik viskozite (mPa.s),  $v$  mil hızı (1/s),  $A_{\text{Islak}}$  ( $m^2$ ) ve  $h_{\text{ort}}$  ortalama efektif yağ filmi kalınlığıdır (mm). Bu ifade yağlamanın tam akışkan tipi için üretilmiş olan ilk ifadesidir.

Hidrodinamik yağlama teorisinin matematiksel temelleri 1886 yılında Reynolds tarafından kendi adıyla anılan ve aynı zamanda sonraki yağlama teorilerinin de temelini oluşturan denklemden 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 yatakların sürtünme ve yağlama üzerine etkilerini detaylı olarak incelemiştir. 1920 yılında Biel, Stribeck tarafından ölçülen sürtünme tipi eğrisinin – (genelleştirilmiş Stribeck eğrisi) yağlanmış yüzeylerin genel davranışını yağlayıcı, viskozite, kayma hızı ve yüke bağlı olarak tanımlayan bir fonksiyon olduğunu ilk belirten kişi olmuştur. Hidrodinamik olarak yağlanmış yatakların dizayn kriterleri, yağlama teorisinin bu esaslarına dayanılarak geliştirilmiştir [18].

Hidrodinamik yağlama teorisi tarafından ele alınmayan bir problem ise "tam sıvı yağlamanın" sınırlarıdır. Örneğin, eğer yük çok fazla ve bağıl hız 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 davranışlarının yağlayıcının viskozitesinden çok kimyasal yapısına bağlı olduğu, "sınır" yağlama rejimini detaylı olarak ilk ele alan kişidir.

II. dünya savaşından sonra, makine mühendisliğinde genel eğilim; daha yüksek hızlar, yükler ve çalışma sıcaklıkları ile hareket eden makine aksamının ağırlıklarının azaltma girişimleri yönünde olmuştur. O zamandan beri sürtünme, aşınma ve yağlama problemlerine olan ilgide devamlı bir artış olmuştur [18].

Motorlarda kullanılan yağlama yağlarının başlıca görevleri; birbiri üzerinde hareket eden motor parçalarının, doğrudan doğruya temas etmesini önleyerek, parçaların aşınmasını ve güç kaybını azaltmak ve ısınan motor parçalarının soğutulmasına

yardım etmektedir. Bunun yanında yağlama yağının diğer görevleri, parçalar arasında oluşan pislikleri temizlemek, silindir cidarı ile piston-segman arasındaki boşlukları doldurarak sızdırmazlık sağlamak, yataklarda ve diğer hareketli motor parçalarındaki vuruntuyu yok ederek gürültü ve sesleri azaltmak ve motor parçalarının ömrünü arttırmaktır [19].

Parçalar yağsız çalışacak olursa, meydana gelecek sürtünmeler nedeniyle çok kısa zamanda görevini yapamaz duruma gelirler. Sürtünme nedeni ile meydana gelen ısı, motor parçalarının mekaniksel dayanımlarını tehlikeye düşürür. Yatak malzemelerinin eriyip akmasına, parçaların kırılmasına neden olur. Piston, segman ve silindirler çabuk aşınırlar. Amaca uygun şekilde çalışan yağ ve yağlama donanımı, bütün hareketli parçaların yeterince yağlanmasını sağlayıp, parçalar arasında sıvı sürtünmeyi sağlamalıdır [20].

## 2.1.Yağlama Rejimleri

Otomobil motorlarının güç yoğunluğundaki artış ( $\text{kW/m}^3$ ) motorların daha küçük hacimde imali, parça tasarımcılarına da dikkate değer bir yük getirmektedir. Gelişmiş motor özellikleri, motor parça tasarımlarında daha fazla güçlükler ve komplike yönler meydana getirir. Bu motorun ana sürtünen parçaları olan yataklar, supap mekanizması ve piston-segman grubu için kesinlikle doğrudur. Yük, hız veya sıcaklığın çok daha fazla olduğu çalışma koşullarında yapılan herhangi bir değişiklik sistemdeki parçaların dayanıklılığını olumsuz etkileyecektir. İçten yanmalı motorlarda, belirli tribolojik parçalarında daha iyi bir tasarım elde etmek için, fiziksel ve kimyasal mekanizmaların iyi bilinmesi gerekir [10].

Yağlayıcının fiziksel ve kimyasal özellikleri ile katkı malzemelerindeki küçük bir değişiklik, yağlama şartlarını da değiştireceğinden bu değişiklik sistemlerde kritik değişimlerin yapılmasını gerektirmektedir. Yataklar, supap mekanizması ve piston-segman grubunu yağlamak için tek bir çeşit yağ kullanılmış, daha sonra değişik özellikteki yağ ile her birinin performansının optimize edilmesi ile belirlenmiştir. Bu, yağlayıcı seçimi ile malzeme seçimi arasındaki ilişkisinin önemini gösterilmektedir.

Piston segmanlarının yağlanması söz konusu olduğunda, segman ve silindir gömleği arasındaki rölatif kayma hızı strokun ortasında maksimum ve ölü noktalarda sıfırdır. Bu rölatif hız, hareketli parçalar arasında yağ filminin oluşmasını sağlar. Böylece orta strokta, kompresyon segmanları ve silindir gömleği arasında hidrodinamik yağlama koşulları ile çok tatminkâr bir yağ filmi kalınlığı oluşacaktır. Fakat ölü noktalarda ise, yağ ile temas sıfır hızında olmakta, buda uygun yağ filmi kalınlığının olmamasına ve elastohidrodinamik (karışık) ve sınır yağlama rejimini oluşmasına yol açmaktadır. Böylece ölü noktalardaki sürtünme ve aşınma miktarı önemli derecede artış göstermektedir [21].

İçten yanmalı motorlarda ÜÖN' da yanma boyunca minimum yağ kalınlığı ( $\approx 1\mu\text{m}$ ) oluşmaktadır. Segman üzerindeki gaz basıncı artışı ile birlikte yağ filmi kalınlığını azaltmakta ve genişleme zamanında ise artan piston hızı ile birlikte yağ filmi kalınlığı artmaktadır. Motorun daha yüksek yüklerde çalışma koşullarında gaz basıncı artarak ve segmana gelen yükler artmaktadır. Ayrıca basınç artışı yağ sıcaklığını artırmakta ve yağın viskozitesini düşürmektedir. Bu sebeple emme, sıkıştırma ve eksoz zamanları boyunca yağ filmi kalınlığı azalmaktadır. Motorun bir çevrimi esnasındaki film kalınlığındaki değişim sınır yağlama rejiminden çok ince hidrodinamik yağlama rejimine kadar değişik sürtünme rejimlerinin oluşmasına yol açmaktadır. Yağ filmi  $1\mu\text{m}$  altına indiği zaman yüzey pürüzleri teması başlayarak sürtünme katsayısı artmaktadır [2].

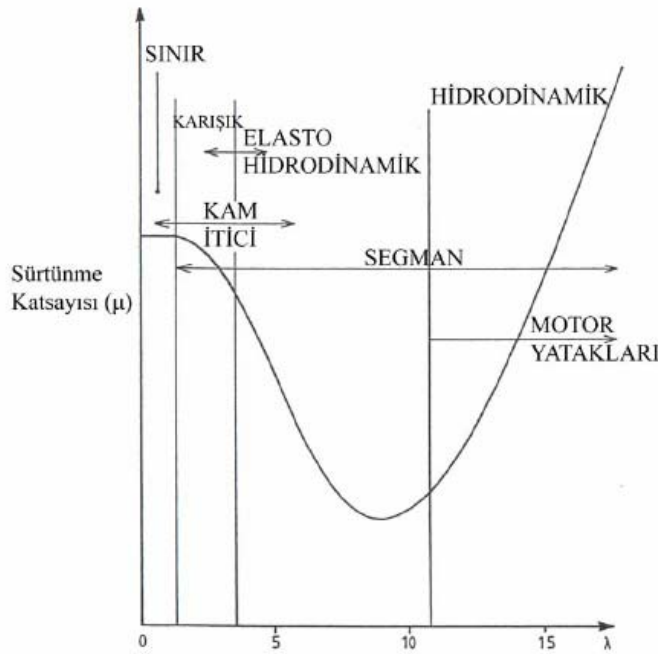
### **2.1.1.Hidrodinamik yağlama**

Hidrodinamik yağlama rejiminde oluşan yağ film kalınlığının yüzey pürüzlülüğüne oranı iki yüzeyi birbirinden ayıracak düzeydedir. Bu durumda, sürtünme viskoz akışkan içindeki kesme kuvvetlerinden kaynaklanır. Bu yağlama rejiminde yüzeylerin tamamı, yağ filmi tarafından birbirinden ayrılmış olup ve yükü taşımak için filmdeki basınçların oluşumu klasik hidrodinamik hareket ile sağlanmaktadır. Hidrodinamik yağlama rejiminde yağın dinamik viskozitesi, başlıca yağ karakteristiğidir [11].



Hidrokinamik yağlama rejimi, motor yatakları, piston eteği-silindir gömleği ve silindir-seğman arasında yüksek kayma hızlarında oluşmaktadır [2]. Düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip silindir yüzeyleri kullanılarak, hidrokinamik yağlama rejiminde çalışma mümkün olmakta ve dolayısıyla sürtünme ve aşınma önemli ölçüde düşürülebilmektedir [13].

Hidrokinamik sürtünme, birbirine göre bağıl olarak hareket eden veya kayan iki yüzey arasında yeterli sıvı filminin ve basıncın oluştuğu sürtünme şeklidir. Harekete karşı direnç yağlayıcının viskozitesi ile oluşmaktadır. Hidrokinamik yağlamada, sürtünme katsayısı çok düşüktür ( $f = 0.001$  ila  $0.005$ ) ve aşınma teorik olarak sıfırdır. Hidrokinamik yağlama şartları altında düşük viskoziteli yağlar daha az direnç göstererek iç sürtünmelerin azalmasına sebep olmakta ve bu sayede yakıt ekonomisi sağlamaktadır. Ancak düşük viskoziteli yağların kullanılmasını yağ tüketimini artırırken yağ filmi kalınlığının azalmasına hatta yağ filminin yırtılmasına neden olabilmektedir [11].

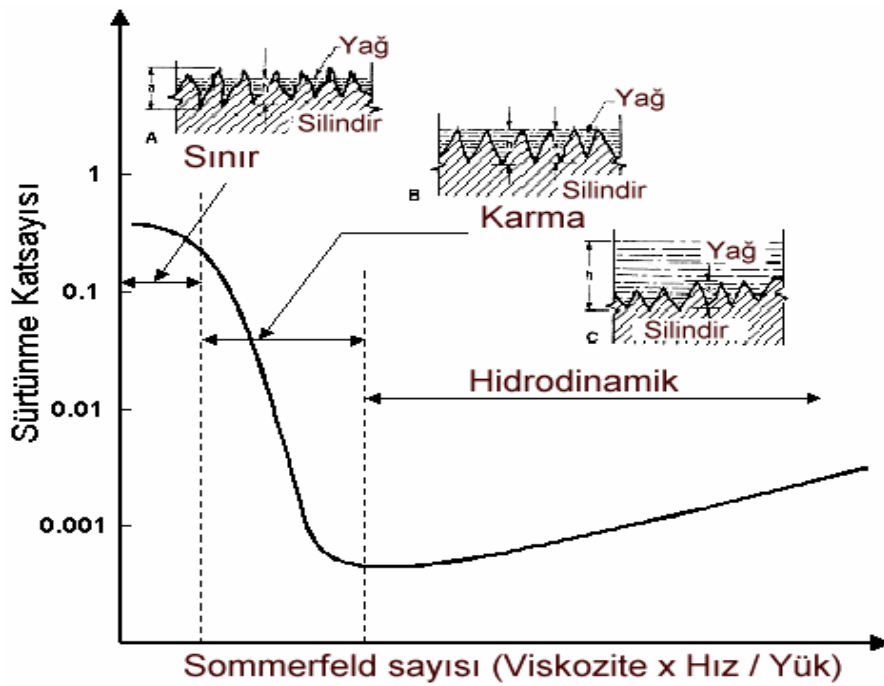


Şekil 2.1. Spesifik yağlanmış motor parçaları ile ilişkilendirilmiş, geleneksel yağlama rejimlerini gösteren Stribeck diyagramı[1]

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

Hidrodinamik yağlamada, sistemlerin tribolojik davranışı için mekanik enerjinin dağılımında aşağıdaki görüşler önemlidir[11].

- a- Operasyon değişkenleri hız, sıcaklık, basınç ve film kalınlığı yağ filmini oluşturur.
- b- a ile sistem geometrisi arasındaki ilişki, malzemeler ve yağlayıcı parametrelerine bağlıdır.
- c- Yayılan mekanik enerji ve sürtünme katsayısı değeri, a ve b'ye bağlıdır.
- d- Hidrodinamik yağlama, a, b ve c ile ilgilidir.



Şekil 2.2. Stribeck diyagramı [12]

Stribeck diyagramı sürtünme katsayısı ve Sommerfeld sayısı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Sommerfeld sayısı hız ve viskozitenin çarpımının temas yükü ya da temas basıncına oranı olarak ifade edilebilir.

Hidrodinamik yağlama rejiminde sürtünme katsayısı, hız ve viskozitenin artması ya da yükün azalması ile artmaktadır [13].

### 2.1.2. Elastohidrodinamik yağlama

Burada yüzeyler yine hidrodinamik yağlamadaki (yüzeyler yağ filmi tarafından tamamı ile birbirinden ayrılmış) gibidir. Ancak yüzey teması hidrodinamik yağlamaya göre daha yoğundur. Bu yağlamada, filmler daha incedir. Aynı zamanda, yüzeylerdeki elastik değişimler ve dinamik viskozitedeki basınç daha etkilidir[11].

Geometrinin uygun olmaması durumlarında, örneğin Hertz yoğunluğu temas durumlarında yüzeylerin elastik deformasyonu üzerine etkisi hesaba katılmak zorundadır. Ayrıca, yağlama Hertz temaslarında yüksek basınçlar bulunmasından dolayı yağlayıcı maddenin viskozitesi üzerine basıncın etkisi göz önüne alınmak zorundadır [22].

### 2.1.3. Karışık yağlama

Karışık yağlama rejiminde, viskozitede ya da kayma hızındaki düşüş veya yükteki artış sonucunda yağ filim kalınlığı düşer ve metal metale sürtünme hidrodinamik sürtünmeye eklenir [11]. Karışık yağlama rejiminde yükün bir kısmı ince yağ filmi tarafından diğer kısmı ise temas halindeki yüzey pürüzleri tarafından taşınmaktadır. Yüzeyler arasındaki yağ sebebiyle pürüz uçları teması görülür. Bu yağlama rejiminde başlıca karakteristik yük, hız ve viskozite ile belirlenmekte ve (elasto) hidrodinamik ve sınır yağlama rejimi oluşmaktadır. Sürtünme, yüzey pürüzleri ve viskoz akışkanın kesme direncinden oluşmaktadır. Hidrodinamik yağlama rejiminin aksine karışık yağlamada sürtünme kuvveti hız ve viskozite artışı ya da yükün azalması ile azalmaktadır [13].

Hidrodinamik yağlama rejiminde, yağ filmi kalınlığı çok incelendiğinde hidrodinamik yağlama rejimi kopar ve yük artık yüzey pürüzleri tarafından taşınır. Sıvı sürtünmeye metal metale temas halinde yüzey pürüzleri sürtünmesi eklenir. Hem hidrodinamik hem de sınır yağlama şartı hakim olmaktadır. Yüzey yapısı, hidrodinamik rejimden karışık yağlama rejime geçişi belirler. Pürüzlü yüzeylerde daha düşük yüklerde geçiş sağlanır. Ani yük veya hız değişimi ya da titreşimli mekanizmalarda geçiş daha fazla olur. Silindir segman arasındaki temas ani hız, yük ve sıcaklık değişiminden dolayı

ölü noktalarda (ÜÖN ve AÖN) karışık yağlama rejimine geçmektedir. Kayma anında yağ filmi koparak aralıklarla metal metale temas etmekte ve bunun sonucu olarak sınır sürtünmeye geçerek sürtünme katsayısı artmaktadır [2].

#### 2.1.4. Sınır yağlama

Sınır yağlama rejimini düşük hızlar, düşük viskoziteli yağlar ve yüksek yükler sebep olmaktadır. Sınır yağlama şartlarında, yük tamamen temas halindeki yüzey pürüzleri tarafından karşılanır. Burada fiziksel ve kimyasal performansı tanımlayan yüzeylere yapışmış, ince film hareketleri vardır. Yağlayıcının dinamik viskozitesi önemli değildir, ancak katkı malzemesinin önemli bir rolü vardır [11]. Sürtünme katsayısı hız, yağ viskozitesi ve yükten bağımsızdır. Sürtünme katsayısı sürtünme kuvvetinin normal yüke oranıdır. İki yüzey arasındaki sürtünme ve aşınma davranışı yüzeylerin özelliklerine, çevre şartlarına ve aralarında oluşacak yağlayıcı özelliklerine ile belirlenmektedir [13].

Sınır yağlama rejimi, bağıl hareket eden yüzeyler arasında yağlayıcı ve yüzey özelliklerine bağlı olarak belirlenir. Sınır yağlama rejiminde önemli yüzey özellikleri; pürüzlülük, sertlik, esneklik, şekil değiştirilebilirlik, kayma gerilmesi, ısı iletkenlik ve yağlayıcının ısıtma kabiliyetidir. Yağlayıcının, yağlayıcı yüzeyleri ya da kimyasal yapısı başlıca önemli yağlayıcı özellikleridir. Katı yüzeyler arasında moleküler tutuculuk yağlama kabiliyetini belirler. Sınır yağlamada, yüzey pürüzlülüklerinde dolayı gerçek temas alanı yüzey alanından çok daha azdır. Gerçek temas alanı  $A_r$ , normal yüke  $F_n$  bölünmesiyle malzemenin akma gerilmesi  $\sigma_m$  belirlenir.

$$A_r = \frac{F_n}{\sigma_m} \quad (2.2)$$

Hareketi sağlamak için teğetsel kuvvet gerçek temas alanında oluşur ve malzemenin kayma gerilmesi  $\tau_m$ :

$$F_t = A_r \cdot \tau_m \quad (2.3)$$

Buradan sürtünme katsayısı:

$$f = \frac{F_t}{F_n} = \frac{\tau_m}{\sigma_m} \quad (2.4)$$

Farklı malzemeler için, daha yumuşak malzeme özelliğine sahip olan malzeme sürtünme davranışlarında daha etkindir. Sınır yağlamada yüzeyler arasında oksit tabakası oluşmakta ve kayma gerilmesini azaltarak sürtünme katsayısını düşürmektedir. Sınır yağlama şartında sürtünme katsayısı hızdan bağımsızdır. Motor parçaları arasında (yataklar, piston ve segmanlar) ilk çalıştırma ve durma anlarında sınır yağlama rejimi oluşmaktadır. Ayrıca normal çalışma anlarında üst segman ve silindir gömleği arasında ÜÖN ve AÜN' da büyük yükler ve düşük hızlardan dolayı sınır yağlama rejimi oluşmaktadır [2].

## 2.2. Viskozite

Viskozite, sıvıların akmaya karşı gösterdiği direnç ve iç sürtünmelerin bir ölçüsüdür. Kinematik ve dinamik viskozite olarak ikiye ayrılır. Birbirinden 1 m uzaklıktaki iki düzlem arasındaki 1 m<sup>2</sup> alandaki sıvı tabakasının 1m/s<sup>2</sup> hızla kayması için gerekli olan Newton kuvvetine "dinamik viskozite", dinamik viskozitenin yoğunluğa oranı ise " kinematik viskozite" denir. Kinematik viskozite birimi santistok (cst) olup, 1 cst 1 mm<sup>2</sup>/ saniyedir. Sıvı yakıtları en önemli özelliklerinden birisi de kinematik viskozite kabiliyetidir. [24]

Çoğu sıvıların viskozitesi, artan sıcaklıkla azalır. Boşluk (hole) teorisine göre bir sıvı içerisinde boşluklar bulunmaktadır ve moleküller sürekli boşluklara doğru hareket ederler. Bu olay akışa izin verir, fakat bir molekülün bir boşluğa taşınması bir aktivasyon enerjisine ihtiyaç duyduğundan enerji gerektirir. Yüksek sıcaklıklarda aktivasyon enerjisi daha kolay temin edileceğinden sıcaklık yükseldikçe sıvı daha kolay akar. Ayrıca artan basınçla bir sıvının viskozitesi artar, çünkü basıncın artması sıvı içerisindeki boşluk sayısını azaltır ve bunun sonucu olarak moleküllerin hareketi zorlaşır [25].

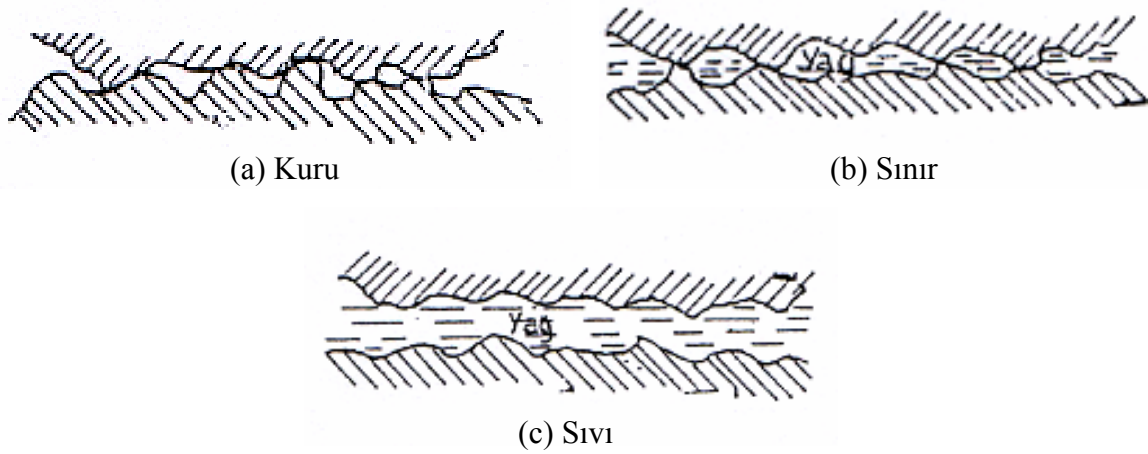
## **BÖLÜM 3. SÜRTÜNME VE AŞINMA MEKANİZMALARI**

### **3.1. Sürtünme Mekanizmaları**

En temel manada sürtünme, temasta olan ve birbirine göre bağıl hareket yapan elemanlar arasında harekete karşı ortaya çıkan direnç (yer çekimi, kütleli kuvvetler ve işletme kuvveti arasında) şeklinde tanımlanmaktadır. Sürtünmenin sayısal değeri bazı durumlarda çok küçük olsa dahi pratik olarak devamlı mevcuttur. Sürtünme direncini oluşturan parametreler oldukça fazladır ve bunların etkileri büyük farklılıklar göstermektedir. Bağıl hareketin türü, elemanların fiziksel durumları, aralarında üçüncü maddenin bulunup bulunmadığı, ortam şartları vb. parametreler ve bunların kendi içerisinde yaptıkları dallanmalar olayı çok kompleks hale getirmektedir [29].

Birbirlerine temas eden hareketli parçalar arasında kayma, yuvarlanma veya kayma-yuvarlanma mevcut olabilir. Böylece sürtünme kinematik bakımdan kayma, yuvarlanma veya kayma-yuvarlanma sürtünmesi şeklinde olur.

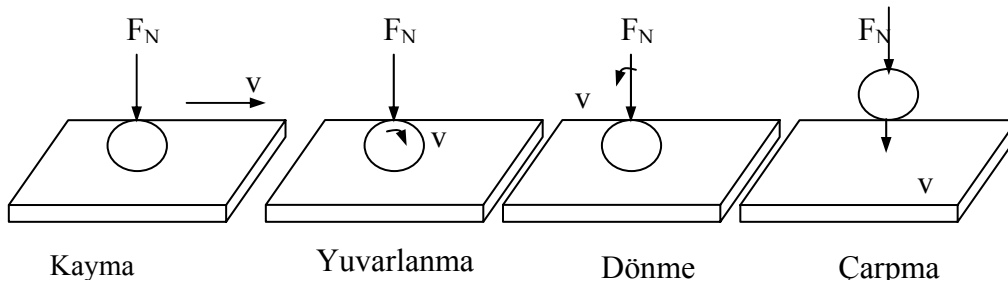
İzafi hareket yapan yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması veya konulmaması bakımından sürtünme olayı kuru, sınır ve sıvı olmak üzere üç halde incelenir. Genel anlamda kuru sürtünme birbirine göre izafi harekette bulunan ve doğrudan doğruya temasta bulunan iki yüzey arasında oluşan sürtünmedir (Şekil 3.1.a). Yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması halinde iki durum ortaya çıkabilir ve esas sürtünme yağlayıcı maddenin tabakaları arasında oluşur; bu hale sıvı sürtünmesi denir (Şekil 3.1.c). İkinci durumda yani yüzeyler tamamıyla ayrılmadığı takdirde, sınır sürtünmesi hali vardır (Şekil 3.1.b) [26].



Şekil 3.1. Sürtünme Çeşitleri [26]

### 3.1.1. Kayma ve yuvarlanma hareketleri

Elemanlar arasındaki bağıl hareket genel olarak kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, dönme veya çarpma şeklinde olmaktadır.



Şekil 3.2 Tribolojik sistemlerin kinematığı [26]

Sürtünmeyi meydana getiren fiziksel nedenler incelendiğinde, kayma ve yuvarlanma arasında makroskobik görünüm olarak bir fark olduğu, mikroskobik açıdan ise her iki sürtünme halinin benzer nedenlerden olduğu anlaşılmaktadır. Teorik olarak tam rijit ve yüzeyi pürüzsüz bir karşı yüzey üzerinde serbest olarak yuvarlanmasında sürtünme direnci oluşması gerekir. Fakat pratikte kayma sürtünmesine göre oldukça küçük dahi olsa bir sürtünme direnci ortaya çıkmaktadır. Kayma hareketinde ortaya çıkan sürtünme katsayısı 0.5 yuvarlanmada ise, 0.005 civarındadır. Temasta olan elemanların tam rijit olmaması dolayısıyla elastik ve plastik deformasyonların oluşması, bunun sonucunda hareket yönünde dalga şeklinde birikmeler meydana

gelmesi, temas şeklinin noktasal ve çizgiselden yüzeysel bir forma dönüşmesi harekete karşı dirence neden olmaktadır [29].

### 3.1.2. Kuru ve yağlanmış yüzey kavramları

Kuru sürtünme, her türlü yabancı maddeden tam olarak arındırılmış yüzeylerin, mutlak vakumda birbirine göre izafi olarak hareket ettirilmeleri durumunda meydana gelmektedir. Bu durumda ise,  $\mu = 8'$  e ulaşan oldukça yüksek sürtünme katsayısı oluşmaktadır. Sürtünme direncindeki bu artış büyük ölçüde yüzeyler arasındaki adhezif bağlarda ileri gelmektedir. Sürtünme dirençlerini düşürebilmek için sürtünen yüzeylere, yüksek sıcaklıklara da dayanabilen katı yağlayıcılar ve yumuşak metalik filmler uygulanmaktadır. Oysa mevcut sistemlerin büyük çoğunluğu normal atmosfer şartlarında çalışmaktadır. Atmosfer şartlarındaki sürtünme durumunda ise, yüzeyler çok iyi şekilde temizlenmiş olsalar dahi, sürtünme sonucunda aktive olan ve sıcaklığı yükselen yüzeylerde, tribo-kimyasal reaksiyonlar sonucunda değişik kalınlıklarda ve bileşiminde çok ince oksit tabakaları oluşmaktadır. Bu oluşum yüzeylerin sürtünme ve aşınma davranışlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu tabakalar, genellikle katı yağlayıcı bir ara madde görevi yaparak, sürtünme direncini düşürmektedir. Özellikle sürtünme direncini etkileyen temas alanının büyümesi sürtünmeyi önemli ölçüde azaltmaktadır.

Genel olarak yabancı maddelerden arındırılmış yüzeylerin atmosfer şartlarındaki sürtünme hali, pratik anlamda "kuru sürtünme" olarak kabul edilmektedir. Sürtünen yüzeylerin arasına yağlayıcı olarak tanımlanan maddelerin girmesi veya gönderilmesi durumunda, yüzeyler artık pratik olarak da kuru değildir. Artık sürtünme arasında "sınır sürtünmesi" ve/veya "film sürtünmesi" şeklinde tanımlanan sürtünme mekanizmaları oluşabilmektedir. Yüzeysel arasında bir yağlayıcının bulunması halinde sürtünme direncinin azaldığı deneysel olarak bilinmektedir [29].

### 3.1.3. Sınır sürtünme

Teorik olarak kuru sürtünme ile film sürtünmesi arasındaki durumu "sınır sürtünme" olarak tanımlanmaktadır. Bu bölge, sınırları kesin olmamakla birlikte sınır



sürtünmesi ve yarı sıvı sürtünme bölgeleri olarak iki bölüme de ayrılabilir. Fakat literatürde genellikle yalnızca sınır sürtünme tanımlaması kullanılmaktadır. Birbiri ile temas halinde olan iki metal yüzey arasında belirli fiziksel özelliklere sahip üçüncü madde (yağlayıcı) koyulup, mevcut yük ve kayma hızı koşullarında kesintisiz bir yağlayıcı film oluşmadığı kabul edildiğinde, sürtünme direncinin üç temel bileşeni olacaktır. Bu bileşenler, adhezif bileşen, deformasyon bileşeni ve yağ filminin kayma direnci şeklinde çıkmaktadır [29].

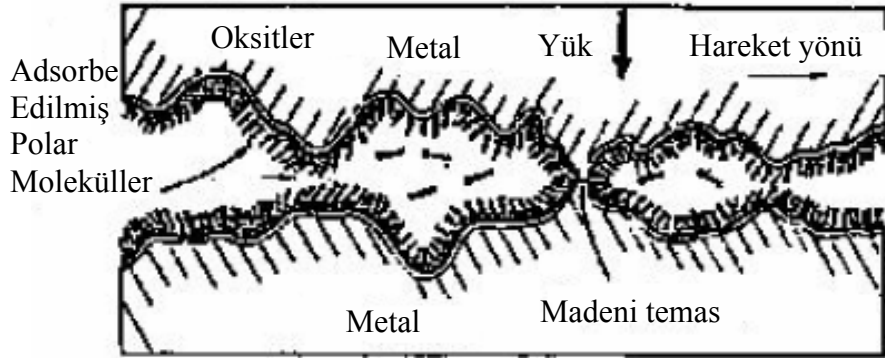
$$\text{Sürtünme kuvveti} \quad F_s = F_{adh} + F_{def} + F_{yağ} \quad (3.1)$$

$$\text{Sürtünme katsayısı} \quad \mu = \frac{F_s}{F_n} = \frac{A[\alpha_w \cdot S_{adh} + (1 - \alpha_w) \cdot S_{yağ}]}{A[\alpha_w \cdot P_{pl} + (1 - \alpha_w) \cdot P_{yağ}]} + \mu_{def} \quad (3.2)$$

Burada;  $\alpha_w$  : Toplam temas alanının adhezif bağ oluşan kısmı  
 $(1 - \alpha_w)$ : Toplam temas alanının film sürtünmesi oluşan kısmı  
 $S_{adh}$  : Adhezif kesme direnci (N/m<sup>2</sup>)  
 $S_{yağ}$  : Yağ filminin kayma direnci (N/m<sup>2</sup>)  
 $P_{yağ}$  : Filmde oluşan basınç (N/m<sup>2</sup>)

Yüzeyler arasında bulunan herhangi bir yağlayıcı maddeye rağmen sıvı sürtünmesi hali oluşturulmadığı durumda sınır sürtünmesi hali ortaya çıkar. Pratikte en çok rastlanan bu sürtünme halinde sürtünme kat sayısı genel olarak 0,02 ile 0,1 arasında değişir.

Yüzeyler arasına bir yağlayıcı madde konulması haline yağlayıcı maddenin molekülleri, adsorpsiyon olayının sonucu olarak madensel yüzeylere düzgün ve muntazam bir şekilde yapışırlar. Yapılan deneyler göstermiştir ki, polar karbonlu hidrojenlerin molekülleri aktif karboksil grupları ile madensel yüzeylere bağlanmaktadır (Şekil 3.3). Böylece yüzeyler üzerinde birkaç molekül tabakası kalınlığında adsorpsiyon tabakaları oluşmaktadır.



Şekil 3.3. Sımr Sürtünmesi [30]

Yağın, bu özelliğine yapışma (oiliness) kabiliyeti denir. Bu özellik yağ ve madensel yüzeylerin karşılıklı etkilerine bağlıdır. Oluşan bu tabaka, oksit tabakada olduğu gibi, metalik yüzeylerin doğrudan doğruya temasa geçmesini önler. Ancak yağ tabakası ile tabii tabaka arasında önemli bir farklılık vardır. Havanın etkisi ile oluşan tabii tabakanın esası oksit tabakasıdır; burada tesadüfen bulunan yağ molekülleri çok azdır. Yağ tabakası ise tamamen yağ moleküllerinden oluşur ve özelliğini buraya yağlamak amacıyla konulan yağ maddesinden alır. Yağ tabakasının oksit tabakasına göre kopma mukavemeti çok daha büyüktür ve bunun sonucu olarak doğrudan doğruya maddesel temasta olan yüzeyler daha azdır. Yapışmış yağ tabakasının kopma mukavemeti  $\sigma_{kopma}$  ve kayma mukavemeti  $\sigma_{kayma}$  ile ifade edilir. İyi bir yağlama sisteminde  $a$  çok küçük olduğundan sürtünme katsayısı;

$$\mu = \sigma_{kayma} / \sigma_{kopma} \quad (3.3)$$

olarak bulunur. Burada önemli olan yağ tabakasının kopma ve kayma gerilmeleridir. Yağ tabakasının kopma mukavemetinin arttırmak veya kayma mukavemetini azaltmak için yağlara katkı maddeleri eklenir.

Genellikle organik yağlardan oluşan katkı maddeleri, yağ içerisine çok az miktarda konulur. Bu maddeler metalsel yüzeylerle kimyasal reaksiyona girerler ve yüzeyler arasında, kopma mukavemeti yüksek olan yarı sıvı halinde madeni sabunlar meydana

getirirler. Pratikte kuru sürtünmede olduğu gibi sınır sürtünmesi bölgesinde çalışan sistemlerin sürtünme katsayıları deney ile tayin edilir [34].

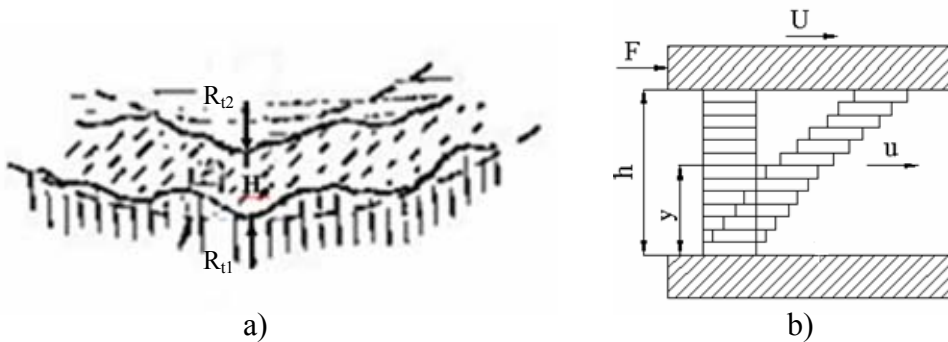
### 3.1.4. Film sürtünmesi

En ideal tribolojik ortam, iç sürtünme direnci çok düşük olan kesintisiz bir ara tabakanın oluşumu ile ortaya çıkar. Bu durumda bağlı hareket yapan yüzeyler arasında oluşacak adhezif ve deformasyon bağları ortadan kalkar. Uygun ara tabaka yani yağlayıcı seçimi ile kontrol altında tutulabilecek bir sürtünme ve aşınma durumu elde edilir. Yağlayıcı olarak akışkan maddelerin kullanılması durumunda, film içindeki madde hareketinin en genel olarak Navier-Stokes denklemleri ile modellemek mümkündür [30].

Film sürtünmesi, madeni yüzeylerin bir yağ tabakası tarafından tamamen ayrılmış olduğu sürtünme halidir. Yüzeylerin pürüzlüğü göz önüne alınırsa, analitik bakımından sıvı sürtünmesi

$$H_0 > R_{t1} + R_{t2}$$

Bağıntısı ile ifade edilebilir. Burada  $R_{t1}$  ve  $R_{t2}$  her iki yüzeyin maksimum pürüzlülüğüdür.



Şekil 3.4. Film Sürtünmesi [26]

Madensel yüzeylerle doğrudan doğruya temasta bulunan yağ tabakaları, adsorpsiyon yolu ile bu malzemelere tamamen yapışmış olduğu görülür; söyle ki U hızıyla hareket eden yüzeye yapışmış olan tabakanın hızı U; sabit yüzey üzerindeki tabakanın hızı ise sıfırdır (Sekil 3.4.b). Ara tabakalarının hızı y mesafesine bağlı olarak U ile sıfır arasında değişir. Böylece sıvı sürtünmesi halinde sürtünme esas itibariyle birbiri üzerinde kayan yağ tabakaları arasında oluşmaktadır. Viskoz bir akışkanda meydana gelen kayma gerilmeleri Newton kanununa göre [28];

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (3.4)$$

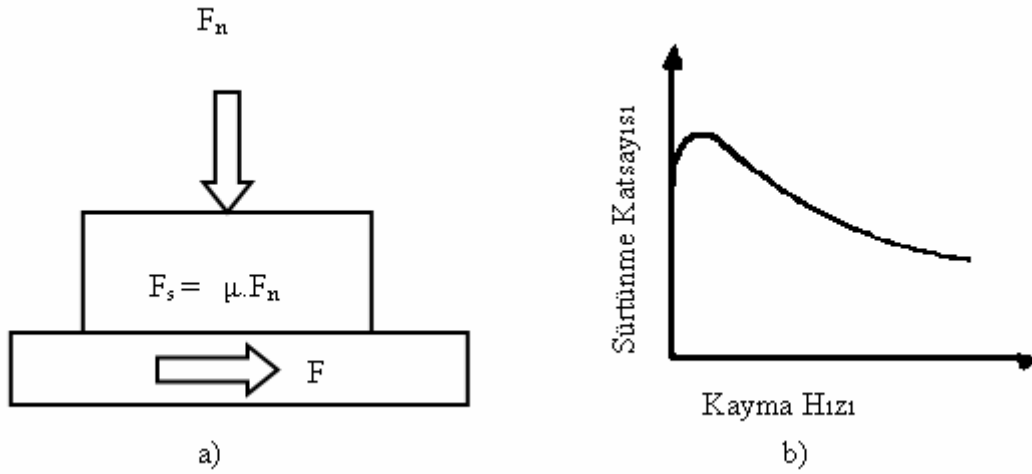
### 3.1.5. Kuru sürtünme teorileri

Teorik olarak kuru sürtünmeyi ifade etmek için sekli 3.5.a'da gösterilen model kullanılmaktadır. Buna göre izafi hareket yapan ve normal bir kuvvetin ( $F_n$ ) etkisi altında bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasında harekete karşı  $F = \mu \cdot F_n$  değerinde bir sürtünme kuvveti oluşur. Burada  $\mu$  sürtünme katsayısıdır.

Genel ifadeye göre sürtünme izafi hareket yapabilme olanağına sahip olan yüzeylerde oluşur. Sekil 3.5.'a da cisimlerin herhangi birine teğetsel bir F kuvveti tatbik edilirse, iki durum ortaya çıkabilir. Birinci durumda  $F_s > F$  yani sürtünme kuvveti F kuvvetten daha büyük olabilir. Bu halde F kuvvetine rağmen cisimler birbirleri üzerinde kaymazlar. Ancak hareket olanağı olduğundan, yüzeyler arası statik sürtünme denilen bir direnç meydana gelir. Kavrama, fren gibi sürtünme esasına göre çalışan elemanlarda bu sürtünme hali vardır ve bu elemanların hesabı bu denkleme dayanır. İkinci durumda  $F_s < F$  yani sürtünme kuvveti F kuvvetinden daha küçük olabilir. Kinematik sürtünme denilen bu halde, F kuvvetin etkisi altında yüzeyler birbirleri üzerinde kayarlar.

Teknikte sürtünme hem istenilen hem de istenilmeyen bir olay olarak çıkar. Fren, kavrama, sürtünmeli çarklar gibi makine elemanlarında sürtünme istenilen bir olaydır. Bu gibi yerlerde sürtünme arttırılır. Bunların dışında, bütün izafi hareket

yapan yüzeylerde istenilmeyen bir olay olarak ortaya çıkan sürtünmenin azaltılması gereklidir.



Şekil 3.5. Sürtünme Katsayısının Tanımlanması [29]

Sürtünme ile ilgili tarihsel gelişime baktığımızda, Amontons, cisimleri rijit olarak kabul ederek, sürtünmenin izahını “kayma esnasında parçalar, yüzey pürüzleri yüksekliğini kaldırmak için gerekli enerji” şeklinde yapmış ve bütün cisimler için sürtünme katsayısı 1/3 olarak verilmiştir. Coulomb, Amontons’un bulduğu sonuçları doğrulamış ve ayrıca sürtünme katsayısının hızdan bağımsız olduğunu gözlenmiştir. Bunlara ilaveten Coulomb statik sürtünme katsayısı kayma başlatma kuvveti ile kinetik sürtünme katsayısını da hareket devam ettirme kuvveti ile tarif edilmiştir. Coulomb kanunu teorisine göre;

- Sürtünme kuvveti, normal yükü orantılıdır.
- Sürtünme kuvveti, geometrik alana bağlı değildir.
- Sürtünme kuvveti, kayma hızına bağlı değildir.
- Statik sürtünme katsayısı, dinamik sürtünme katsayısından daha büyüktür.

Yani bir cismi harekete geçirmek için gerekli olan kuvvet, hareket devam ettirmek için olan kuvvetten daha büyüktür [29].

$$\mu = \frac{F_s}{F_n} \quad (3.5)$$

Burada;

$\mu$  =Sürtünme katsayısı

$F_s$  =Sürtünme kuvveti (N)

$F_n$  =Normal kuvvet / Dış kuvvet uygulanmadığı durumda cismin ağırlığı W (N)

Genellikle statik sürtünme katsayısı kinematik sürtünme katsayısından daha büyüktür. Kayma hızı arttıkça kinematik sürtünme katsayısı azda olsa azalır (Sekil 3.5.b.). Şekilden de görüldüğü gibi sürtünme katsayısının en büyük değeri hareketin başlangıcındadır. Buna karşılık normal kayma hızlarında hıza göre sürtünme katsayısının değişimi çok az olduğundan sürtünme katsayısı sabit sayılabilir. Sürtünme ile ilgili bir başka kavram  $\theta = \tan^{-1}(\mu)$  şeklinde ifade edilen sürtünme açısıdır. Kitlemeli sistemlerde büyük önem taşıyan bu açı, normal kuvvet ile normal ve sürtünme kuvvetlerinin meydana getirdiği  $F_r$  bileşke kuvveti arasındaki açıdır.

Sürtünme olayı incelenirken temas yüzeylerinin pürüzlü oldukları ve madenlerin tam temiz olmadıkları gibi hususlar göz önünde tutulmalıdır.

Yüzeylerin durumuna gelince, yapılan inceleme ve deneylere göre kuru olarak tarif edilen madenlerin yüzeyleri aslında atmosferi teşkil eden elemanların etkisi altında oksit, yağ, su buharı, pislik vs. gibi yüzey tabakaları ile kaplıdır. Adsorpsiyon yolu ile oluşan ve ancak elektronik mikroskoplarla varlığı kanıtlanabilen bu tabakalar madensel yüzeylere kuvvetle bağlanabilmekte ve yalnız çok etkin fiziksel ve kimyasal yöntemlerle temizlenebilmektedir. Ayrıca yüzeylerde ki oksit tabakası ani olarak oluşmaktadır; söyleki talaş kaldırarak işlenmiş veya temizlenmiş yüzeyler atmosfere maruz kalırsa, yüzeylerde derhal bir oksit tabakası meydana gelmektedir.

Sonuç olarak şu söylenebilir. Teknikte kullanılan elemanların yüzeyleri çeşitli kimyasal bileşikleri ihtiva eden tabi bir adsorpsiyon tabakası ile kaplıdır. Bunun sonucu olarak doğrudan doğruya temas eden yüzeyler arasında daima bu tabakalar bulunur.

Sürtünme olayını açıklamaya çalışan birçok teoriler vardır. Bunlardan gerçeğe en yakın olanı Bowden ve Tabor' un kaynak bağları teorisi'dir. Yukarıdaki olaylara dayanarak bu teori şu şekilde açıklanabilir [27].

Yüksüz durumda yüzeyler belirli pürüzlük noktalarında temasta bulunur; bu noktalarda tabii tabakalar arasında bağlar oluşur. Yük tatbik edildikten sonra çok küçük olan temas yüzeylerinde çok büyük basınçlar meydana gelir. Bu basınçların altında bazı temas noktalarındaki tabii tabaka kopar, metalik temas meydana gelir ve yüksek basıncın etkisi altında bu noktalarda moleküler bağ şeklinde mikroskobik kaynak bağları oluşur. Bu bağlar, tabii tabaka bağlantısından çok daha kuvvetlidir. Temasta bulunan elemanların izafi hareketi ancak bu bağların kopması ile mümkündür. O halde sürtünme gerek metalik, gerekse tabii tabaka bağlarının oluşturduğu dirençtir; sürtünme kuvveti ise bu bağların kopması için gereken kuvvettir.

### **3.2. Aşınma Mekanizmaları**

Aşınma, bir yüzeyden diğer bir yüzeye malzeme transferi veya aşınma parçalarının oluşumu neticesinde ortaya çıkan malzeme kaybı olarak tanımlanabilir. Birbiriyle temas halinde olan malzeme yüzeyleri, oksit filmleri veya yağlayıcılar ile korunsa bile, mekanik yükler altında oksit tabakasının veya yağlamanın bozulması, iki yüzeyi birbiriyle doğrudan temasa sebebiyet verebilir. Bu temas malzemenin çalışma koşullarındaki ömrü veya performansını sınırlayarak aşınmaya neden olur[31].

Genel tanım olarak aşınma, birbiri ile temas halinde ve rölatif olarak hareket eden malzemelerin yüzeylerindeki oksit filmlerin veya yağlayıcıların, çalışması esnasında oluşan mekanik yüklemeler sonucu işlevlerin bozulması nedeniyle birbiri ile direkt temas haline geçen yüzeylerden malzeme taşınması veya kaybıdır. Katı bir yüzeyin peküsyon, yani başka bir katı gövde tarafından dinamik temasa maruz bırakılması sonucu aşınma oluşur.

1979'da DIN 50320'ye göre aşınma, kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı, gaz) temas neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların

ayrılması sonucu meydana gelen ve istenilmeyen yüzey bozulmasıdır. Bu tanıma göre aşınmadan söz etmek için; mekanik bir etkinin olması, sürtünmenin olması, istenilmediği halde meydana gelmesi, yavaş fakat devamlı olması, malzeme yüzeyinde değişiklik getirmesi gerekmektedir.

En çok kullanılan endüstriyel problemlerden biri olan korozyon ve yorulma aşınmalarıdır. Bu aşınmalar parçaların kullanılamaz hale gelmesine ve parçaların değiştirilmesine neden olmaktadır. Ayrıca malzemelerde aşınma kaçınılmazdır ve güç kayıplarını, yağ tüketimini ve parça değiştirme sıklığını artırarak işletme verimini düşürür.

Mühendislik sistemlerindeki enerji tüketimini düşürmek ve kobalt, volfran ve kalay gibi az miktarda bulunan maddelerin yerine ya da ilave uygun malzemeler bulabilmek için, aşınmaya verilen önem giderek artmaktadır. İşletme verimini sağlayarak optimum çözümleri elde etmek için, kullanılmakta olan yeni tip araçlarda meydana gelecek sürtünmeyi tanımlamak özellikle önemlidir.

Sürtünme ve aşınma kendinde özgü malzeme özelliği değildir. Ama mühendislik sistemi karakteristiğidir. Tablo 3.1’de gösterildiği gibi sürtünme ve aşınma arasında basit doğrusal bir ilişki yoktur. Ancak 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 problemlerden genel sonuçlara uygularken, büyük özen gösterilmelidir [32].



Tablo 3.1. Bazı metal çiftlerinin sürtünme katsayıları ve aşınma oranları [31]

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

### 3.2.1. Aşınmanın temel unsurları

Bir sistemde aşınmayı etkileyen beş önemli koşul vardır. Bunlar;

1. Yük
2. Hareket
3. Sürtünme elemanları
4. Ara madde
5. Ortam (çevre şartları)

Aşınmanın gerçekleşebilmesi için beş unsur bir araya gelmesi gerekir. Aşınan malzeme ve aşındıran malzemeler aşınma çifti olarak gösterilirler. Aşınma çifti ile ara malzemeye de beraberce aşınma "kombinasyonu" adı verilmektedir. Aşınma çifti arasındaki ara malzeme, sert taneli, sıvı, gaz ve buhar halinde olabilir. Aşınma sırasında oluşan aşınma parçacıkları da ara malzeme gibi etki yaparak aşınma olayına katılırlar.

Aşınma, pürüzlerdeki yüzey etkileşimleri sonucu oluşur. Eğer göreceli olarak küçük miktar malzeme kaybindan sonra aşırı derecede pürüzlenme oluşmuşsa parçaların değiştirilmesi gerekebilir. İçten yanmalı motorlarda piston segmanın silindir yüzeylerinden, yağ ve gaz sızıntısına izin verecek derecede pürüzlülüğe yol açtığında verimliliğini kaybeder. Bu verimlilik kaybı güçteki azalma ile yağ tüketimindeki artış ile fark edilir.

Aşınma partiküllerinin oluşumu ve sirkülasyonu, özellikle boşlukların düşük olduğu sistemlerde, tıkanma ve tutunmaya veya her ikisine sebep olmaktadır. Bu, sistemlerde arızaların artmasına ve işletme veriminin düşmesine büyük katkı sağlamaktadır.

İşletme koşullarına uygun olarak yüzey işlemek giderek daha fazla önem kazanmaktadır( özellikle eğer pahalı malzeme, daha ucuz malzeme ile değiştirilebiliyor ise).

Aşınmaya maruz kalmış yüzeyleri incelenmesinin en kolay yollarından birisi Tarayıcı Elektron Mikroskopunun (SEM-Scanning Electron Microscopy) kullanılmasıdır. Çalışmalarda, mikro grafit aşınma mekanizmalarının fark edilmesi ve ayırt edilmesi açısından çok önemlidir. Böylece bir grup malzeme ve uygulama için hasar karakteristikleri gösteren bir “harita” yapmak mümkündür. Elde edilen karakteristik bu harita, iyileştirilmiş malzeme seçimi için bir kılavuz olarak kullanılabilir.

Otomotiv sanayisinde karşılaşılan aşınma çeşitleri ve yüzdeleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Aşınma, tabloda belirtildiği gibi tek bir mekanizma ile olabileceği gibi ayrı mekanizmalarda farklı aşınma çeşitlerine de maruz kalabilir. Bu durum aşınmayı azaltan faktörleri bulmayı güçleştirmektedir[32].

Tablo 3.2 Aşınma çeşitleri [32]

Abrazif	%50
Adhezif	%15
Erozyon	%8
Titreşim	%8
Kimyasal	%5

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

Aşınma mekanizmaları hakkında ortak bir görüş birliği yoktur. Fakat abrazif ve adhezif olmak üzere iki temel aşınma mekanizmasını kabul eden ilk zamanlardan bu yana bu konuda büyük ilerleme kaydedilmiştir. Artık aşınma davranışının malzemenin deformasyon mekanizması üzerine büyük rol oynadığı fikri kabul edilmiştir. Literatürde adhezif, abrazif, erozyon, yorulma, darbe, plastik deformasyon, kırılma ve oksidasyon dahil olmak üzere çeşitli aşınma tiplerinden bahsedilir. Buradan malzemelerin fiziksel, kimyasal, mekanik karakteristiklerinin aşınma davranışının kontrolünde önemli rol oynadığı açıkça görülür. Sinterlenmiş parçalar sürtünme ve aşınmaya maruz kalan birçok alanda kullanılmakta ve bu kullanım giderek artmaktadır. Sinterlenmiş parçaların işlenmiş(dövme), dökme ve kaplanmış parçalara göre bazı avantajları vardır. Bunlar;

1. Gözenekli yapılar nedeniyle, yağlayıcılar için hazne görevi görürler.
2. Üretilmesi imkânsız veya çok zor olan alaşım malzeme bileşimlerini bu yolla üretmek mümkündür.

Aşınma, sürtünen yüzeylerden maddelerin ayrılması sonucu oluşur ve içten yanmalı motorun alışması için faydalı da olabilir. İçten yanmalı motorlarda yüzeylerin kötüleşmesine etki eden faktörler Tablo3.3’de görülmektedir[33].

Tablo 3.3. İçten yanmalı motorlarda meydana gelen aşınma türleri [33]

1	Adhezif Aşınması
2	Abrazif Aşınması
3	Korozyon Aşınması
4	Yorulma Aşınması

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

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

— Piston pernosu muylu yatağı

Çalışma şartlarının zorluğu aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

a- Yüksek ortalama piston hızı, 10-15m/s (yüksek devirli motorlar)

b- 12000'den 1500m/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 başlarında, segman-gömlek bölgesinde meydana gelen yüksek yanma basıncı

d- Sıcak yanma gazları ile yakın temas sonucu oluşan yüksek sıcaklıklar. Tablo 3.4'deki değerler rejim halindeki motorda ölçülen sıcaklık değerleridir.

Tablo 3.4. Rejim halindeki motor sıcaklık değerleri [35]

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

Motorun ilk çalıştırılmasında ya da soğuk havada segman ve silindir gömleği çeper sıcaklıkları oldukça düşüktür.

e- Yetersiz yağlama:

— Yağ tüketimi ve yanma esnasındaki karbon oluşumu azaltmak için yağ tüketimini bilerek sınırlandırılması

— Yağın yanmış gazlar ile teması sonucu buharlaşması

— Motorun ilk hareketi, yağlamanın olmadığı ya da yetersiz olduğu ilk hareket koşulları

f- Korozyon ortam ile temas:

- Yanma ürünlerinin sonucu: yanma ürünlerinin korozyon ortam ile etkileşimi örneğin yakıt içerisindeki S'ün su ile birleşmesinden  $H_2SO_4$  ve  $H_2SO_3$  oluşumu

g- Aşındırıcı ile temas

— Emme havası ile silindire giren partiküller, temel olarak silindir gömleğinin üst kısımları ve en üstündeki segmana etki ederler.

— Yağ tarafından getirilenler, silindir gömleğinin alt kısmına ve yağ segmanına etki ederler.

Bütün bunlar bize, hangi parçaların hangi aşınmaya maruz kaldığını gösterecektir. Korozyon aşınması tabiki her durumda meydana gelmektedir. Fakat ani bozulmaların sebebi değildir [35].

### 3.2.2. Aşınma zaman ilişkisi

Aşınma pratikte ikiye ayrılır.

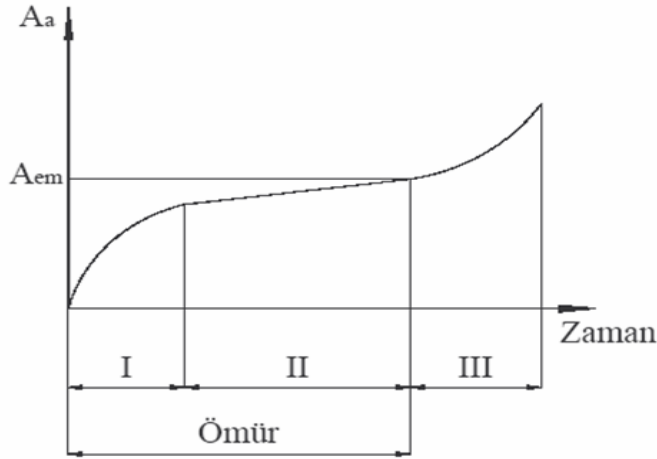
1. Zamana bağlı aşınma
2. Aniden meydana gelen aşınma

Zamana bağlı aşınmayı üç safhada incelemek mümkündür.

1. Safha(Rodaj Safhası): Bu safhada birbirine alışma safhasıdır. Bu safhada parçaların ilk çalışma sırasında şiddetli bir aşınma meydana gelir. Bu nedenle parçaların birbiri ile alıştırmalarının iyi yapılması ve kısa sürede gerçekleştirilmesi bu safhaya ait önemli bir şarttır. Genelde alıştırma, yüksüz ve normal hızlarda yapılır. Alıştırmanın iyi ve kısa sürede tamamlanması için bu safhaya ait olan özel ağırlıklar kullanılır.

2. Safha: Bu safhada aşınma çalışma sırasında temas noktalarında meydana gelir.

3. Safha: Bu bölgede artan aşınma hızı ile şiddetli aşınma meydana gelir.



Şekil 3.6. Aşınma zaman ilişkisi [34]

Aşınan elamana ait, çalışma şartlarına bağlı olarak müsaade edilen bir aşınma sınırı ( $A_{em}$ ) tayin edilirse, aşınma-zaman diyagramından elemanın normal aşınma zamanı (ömür) tespit edilir. Bu zamandan sonra parça değiştirilmeli veya tamir edilmelidir.

Aniden meydana gelen aşınmada, parçaların yüzeyleri birden bire bozulur veya bazı hallerde birbirine kilitlenir ve çalışmaz duruma gelir. Genellikle eş çalışan malzemelerin seçiminde yapılan hatalardan veya yağlamanın yetersiz olmasından meydana gelen bu aşınma şekli, mukavemet altında statik zorlamanın etkisi altında kopmanın benzeridir [34,40].

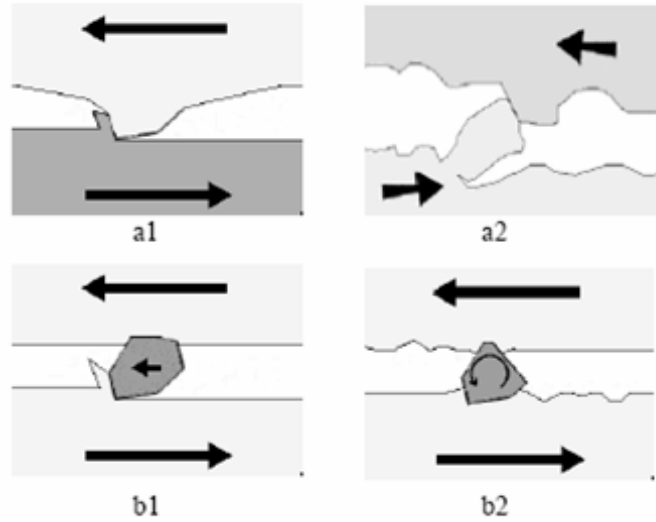
Genel anlamda aşınma, dış etkiler altında, temas yüzeylerinde oluşan fiziksel ve kimyasal değişimler sonucudur. Dış etkenlerin, fiziksel ve kimyasal değişimlerinin çokluğu nedeniyle pratikte bir aşınmada birden çok aşınma hali vardır [34,40].

### 3.2.3. Abrasif 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 oluşturduğu pürüzlü bir yüzey halini alır. Bu tip aşınma, kuvvet derecesine bağlı olarak yüzeyde taramalı, çizgisel sıyırma veya oluklar meydana gelmesi şeklinde tanımlanabilir.

Abrazif aşınması geometrik olarak ikiye ayrılmaktadır. Sürtündükleri malzemeye göre daha sert olan partiküllerin yüzeyi çizmesi ile iki elemanlı abrazif aşınma; iki malzeme yüzeyi arasında serbest olarak hareket eden partiküllerin meydana getirdiği hasara üç elemanlı abrazif aşınma adı verilir [38].



Şekil 3.7. a) İki elemanlı abrazif aşınma b) Üç elemanlı abrazif aşınması [36]

Pratikte abrazif 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 oluşur. 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 ve yuvarlana parçalar sürtünmeye çok az etki ederler.  $80^\circ$  ile  $120^\circ$  arasındaki açılarda gerçekleşen çarpmalar yüksek aşınma nedenlerine sebep olur. Yabancı partiküllerin yataklara kaza ile girmesi problemlere yol açar. Çünkü partiküller yumuşak yatak yüzeyi ve çelik mil yüzeyine gömülürler [36].

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.

Abrazif aşınması ile ilgili olarak Kruschov 1975, özellikle bağıl aşınma dayanımından (E) söz eder:

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

Rölatif aşınma dayanımı sertliklerle ters orantılı olsa da alaşımın mikro yapısı değiştikçe aralarındaki bağıntı daha karmaşık bir hal alır. E genellikle birden küçüktür. Çünkü karşılaştırma için kullanılan standart sertlik göreceli olarak değişir.

Çelik için, mikro yapılar belirli bir karbon aralığındayken, E karbon miktarı ile artar. Perlitin temizlemesi ile de kayda değer ilerlemeler yapabilir. Aynı zamanda bu çalışma sertliğinin artırılmasında da yardımcı olur.

Çeliklerde hem karbür hacminin hem de karbür kompozisyonunun önemli olduğu bilinmektedir. Karbürlerin boyut ve dağılımlarında aşınma üzerinde etkisi vardır. Karbür konsantrasyonunun optimum bir noktası vardır. Bunun üstündeki değerlerde aşınmada önemli bir azalma değeri görülmez. Vanadyum ve niyobyum karbürleri krom ve volfram karbürlerinden daha üstündedir. Gemi dizel motorlarında kullanılan silindir gömleklerinde demir fosfat ve vanadyum karbürün kullanılmasının aşınmayı büyük ölçüde azalttığı görülmüştür.

Abrazif partiküllerin de sertliğini dikkate almak gereklidir. Aşınma direncinde iyileşme elde edilmek isteniyorsa, aşınmaya direnen yüzeyin sertliğinin abrazif madde sertliğinin yarısından fazla olması gerekir.

Aşınma ile ilgili önemli bir nokta ise eğer bütün malzemeler değil sadece yüzey sertleştiriliyorsa, bu bilgiler çok dikkatli uygulanmalıdır. Yüzeyin sertliği, kalınlığı ve alt tabakanın sertliği arasında bir ilişki vardır. İnce sert katmanlar yetersiz alt katman desteğinden dolayı çökebilir.



Sonuç olarak, demir esaslı malzemelerden oluşan metaller abrazif aşınmaya karşı, düzgün dağılmış ikincil karbürümlü martenzit matristen daha fazla direnç gösterir. Karbürlerin alaşımlamasıyla sertliği arttırıldığında aşınma direnci artar. Fakat artışın derecesi abrazif partiküllerin sertliğini de bağıdır. Eğer aşırı yüklenmiş darbe durumunda daha sert bir matris isteniyorsa, martenzitli matris kullanmak mümkün olmayabilir ve kararsız östenitli bir yapı tavsiye edilir [39].

### 3.2.3.1. İçten yanmalı motorlarda abrazif aşınması

Abrazif aşınması, bağıl hareket esnasında iki temas yüzeyinden birinde sert pürüzlerin bulunmasından dolayı, iki yüzeyden birinden malzeme kalması, iki yüzey arasında sert partiküllerin bulunması ya da bu partiküllerin yüzeyden birinin içinde gömülü kalması durumunda oluşur. Bu partiküller yağlayıcı ile taşınmış olan aşındırıcı zerreler veya adhezif aşınması sonucu sertleşmiş ve okside olmuş partiküller gibi yabancı maddeler olabilir.

Abrazif aşınması altındaki yüzey sürtünmelerinde, kayma yönüyle paralel çizgiler oluşmaktadır. Bunlar derin olmayan çizikler olacağı gibi aşırı malzeme kaybından dolayı derin çizikler de olabilir.

Son zamanlarda meydana gelen aşınmalar abrazif direncine karşı, atomlar arası uzaklıkla ters orantılı olduğunu göstermiştir. Metal atomları arasındaki mesafe kısa olduğunda etkileşimler daha büyük olmalıdır. Bundan dolayı da abrazif karşı direnç ağır metaller için daha yüksektir. Örnek olarak Osmiyum abrazife karşı direnci en fazla olan saf malzemedir. Bunun yanında volfram, iridyum ve krom da fazla olan metaller arasında yer almaktadır [37].

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

Sürtünme yüzeyleri arasında üçüncü bir yüzeyin varlığı bir yıkıma sebep olabilir. Bu özellikle yağ tarafından taşınan partiküllerin boyutları ile kıyaslandığında boşluk

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

Abrazif aşınma, malzeme seçimi, yüzey işlemleri ile 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 partiküllerin yok etmenin bir yoludur. Yataklarda aşındırıcı önleyici malzemelerin çok ince katmanları, belli bir miktarda, aşındırıcı partiküllerin görülmesini sağlar. Fakat bu partiküllerin boyutları yağ filmi kalınlığı yanında azdır.

Tablo3.5. Abrazif aşınmaya karşı metal dayanımları [33]

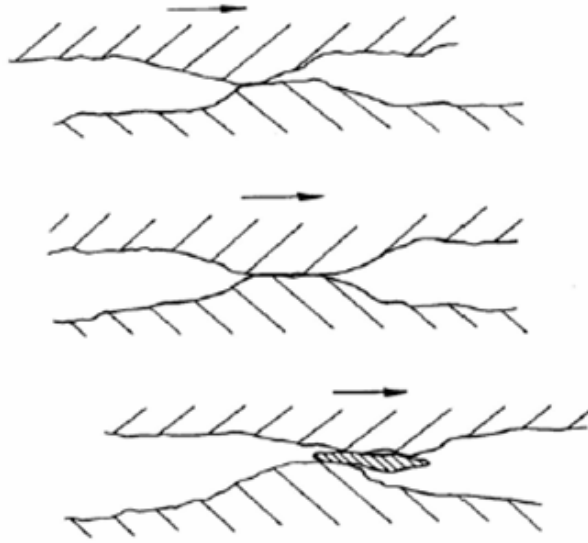
Malzeme	Sertlik $\left[ \frac{kg}{mm^2} \right]$
Yatak çeliği	700-950
Çelik	700-1000
Eloktrolitik krom kaplı çelik	900
Semente edilmiş çelik	900
Nitrürlenmiş çelik	900-1250
Volfram karbür	1400-1800
TiC, SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , B <sub>4</sub> C gibi sert ametal veya kaplama	2000-2750

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

### 3.2.4. Adhezif aşınması

Yapışma aşınması olarak adlandırılan adhezif aşınması, bir metal yüzeyin bir başka metal yüzeyinde bağıl hareket sırasında, birbirine kaynaklanmış (veya yapışmış) yüzeydeki pürüzlerin kırılması sonucu ortaya çıkar.

Uygulamada adhezif aşınma, özellikle metaller arasında kayma sürtünmesi nedeniyle meydana gelir ve aşınma parçaları yumuşak olan metalden kopar. Eğer iki metal aynı sertlikte ise, aşınma her iki yüzeyde de oluşur. Metaller arasındaki yağlamanın mükemmel olması, meydana gelen tribosistemin aşırı ısınmasının engellenmesi, temas eden malzeme yüzeylerinin parlak olması, yüzeye etki eden yükün azaltılması ve malzemenin sertliğinin artırılması ile adhezif aşınma azaltılabilir [38].



Şekil 3.8. Adhezif aşınması [38]

Adhezif aşınma, karşılıklı yüzeyler kayarken ve temas eden pürüz açıları arasında basıncın, plastik deformasyona ve adhezife sebep olacağı değerlerde olduğu durumlarda meydana gelir. Adhezif, temiz yüzeyler, oksitlenmenin olmadığı koşullarda ve kayan yüzeyler arasındaki kimyasal ve yapısal benzerlikler tarafından desteklenir. Adhezif, hareket devam ederken boyutları artan pürüz açıları arasında gerçekleşir. Birleşme yerlerinin en zayıf noktasında, genellikle bir yüzeyden diğerine metal transferi ile sonuçlanan, kırılmalar olacaktır.

Pürüz sertliği aralığında, temas alanı azalacağı için aşınma azalır. Eğer pürüz açıları kimyasal olarak temiz ise aşınma artar. Çünkü yapışma ve kayma olma ihtimali daha fazladır. Ve eğer aşınan çift karşılıklı olarak çözülebilirse aşınma artar. Taşınan parçacıklar ve aşınma partikülleri çalışma sertleşmesine bağlı olarak daha da

sertleşir. Ve bazı durumlarda, faz sertleşmesi meydana gelir. Bu abrazif tarafından ileri aşınmaya sebep olur.

Aşınma oranı bazı önemli faktörlere bağlı olarak formüle edilmiştir. Sürtünen çiftin aşınma sabiti  $K$ , aşınma mekanizmasının değişmediği kabul edilerek özelliklerini belirtir.  $K$  aşınma partikülü oluşma olasılığını gösterir ve çeşitli kombinasyonlarını ve aşınma koşulları için  $10^{-2}$  ile  $10^{-9}$  değerleri arasındadır.

$$\text{Aşınma Hacmi} = \frac{K.S.P}{P_m} \quad (3.6)$$

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

Saf metallerin adhezyonu, onların katı eriyik oluşturma kabiliyetlerine bağlanmıştır. Örneğin kurşun çok düşük çözülebilirliğe sahiptir bu yüzden krom, kobalt, nikel ve demir çok iyi bir yüzey uygunluğu meydana getiriler. Fakat bazı kısaltmalar vardır, özellikle düşük dayanımdan dolayı kurşunu 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 kayma yapma karakteristikleri düşürmeyi amaçlar. Çözünürlük kavramı pratikte uygulaması zor bir kavramdır. Çünkü sadece saf metaller için bilgi mevcuttur.

Metal adhezyonu transferi ile sert pürüz uçlarının yumuşak pürüz uçları üzerinde yarıklar oluşturmaları ile de oluşabilir. Metal partikülleri çelik yüzeydeki yüzey yivleri içine gömülür ve orda kalırlar. Bu aslında gerçek adhezif değildir. Çünkü parçacıklar en azından başlangıçtan buraya gevşek biçimde tutunmuşlardır. Çeliğin artan sertlik ve yüzey pürüzlülüğü, kesme ve yüzey pürüzleri içinde mahsur kalması ile partikül oluşma eğilimi artar. Adhezif ve transferi derecesi daha sert yüzeydeki yivlerin açısı ile değişir. Endüstriyel alanda kullanılan metal ve alaşımlarda nadiren adhezif aşınması görülür.

### 3.2.4.1. İçten yanmalı motorda adhezif aşınması

Motor içersinde özellikle yüksek sıcaklık altında sınır yağlama şartlarının oluştuğu bölgeler adhezif aşınmasına karşı hassastır.

Adhezif aşınması en temel aşınma tipidir. Bu aşınma, metal-metal arası pürüz uçlarının direkt teması ile mikro kaymaların ve birleşmelerin kesilmesine bağlıdır. Kesilmiş küçük aşınma parçaları karşı sert yüzeyde sabit olarak kalabilirler ya da aşınma partiküllerinin oluşumu sırasında ayrılıp uzaklaşabilirler.

Kazıma, çentik oluşumu vs. gibi durumlarda meydana gelen aşınmaların incelemesinde bunların adhezif mi yoksa kaynaklı mı olduğu söylemek zordur. Ama yağlayıcının bulunmaması ile metal-metal arası sürtünmeden dolayı oluşan adhezif aşınması, her zaman lokal bir ısınmayla birlikte oluşur.

Adhezif aşınması ile oluşmuş hasarlar önem sırasına göre aşağıdakiler gibidir:

a-Çizgisel Aşınma: Bazıları çizgisel aşınmanın, hareketlerin ani durmasının yol açmadığı lokal bir hata olduğuna inanırken, diğerleri bunun sürtünen yüzeylerdeki bağıl hareketin, kaynama yada harekete karşı oluşan çok güçlü bir direnç ile bölgesel olarak durduğuna inanmaktadır. Aslında özellikle yüksek sıcaklıklarda iki metal yüzeyinin ani teması sonucu oluşan çizgisel, pürüzlü yüzeylerin kaynamasının mikro çizgisel aşınmaya ya da 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 filminin yok olması ya da bir metal yağlayıcının reaksiyona girmesi ile koruyucu filmin bozularak yağlayıcının görevini yapamaması sonucu ortaya çıkar. Atmosfer bu yağ filminin bozulmasında rol oynar.

c-Çizilme: Kayma yönünde oluşan küçük ve ince çizgilerin oluşumunda verilen addır. Çizilme, adhezif ve/veya abrazif etkileri içeren en küçük hasardır. Bu

terimlerin gerçek anlamları her zaman güç anlaşılır. Ama bunların hepsi bir etkiden çok aşınmanın bir sebebidir.

Sert pürüzlere sahip olan A metali ile daha yumuşak pürüzleri olan B metali arasındaki adhezif partikülleri iki şekilde oluşabilir:

a- Şiddetli aşınma sonucu, metal transferi çok büyük ise yumuşak yüzeyden kopan aşınmış partiküller sert pürüzlerin önünde meydana gelir.

b-Adhezif özellikteki birleşmelerde meydana gelir. Sürtünme sonucu ani olarak kırılması 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 parametrelerle açıklamaya çalışırlar. Bunu da hacimsel adhezif aşınma oranı bağıntısı ile ifade etmişlerdir.

$$v = \frac{k}{3} \frac{P - x}{H_v} \quad (3.7)$$

Burada;

- k :Sürtünme katsayısı
- P :Uygulanan kuvvet
- x : Kayma uzaklığı
- H<sub>v</sub> :Yüzey sertliği

Adhezif sonrası kopan partiküller ortama çapı tahmini olarak hesaplanır. Yarım küre şeklindeki partiküler sadece elastik enerjinin (E<sub>e</sub>) adhezif enerjisinin büyük olduğu durumlarda kopar.

$$E_e \geq E_a$$

$$E_e = \left[ \frac{v^2 \sigma_y^2}{2E} \right] \left[ \frac{\pi d^3}{12} \right] \quad (3.8)$$

$$E_a = W_{ab} \left[ \frac{\pi d^2}{4} \right] \quad (3.9)$$

$$d \geq \frac{6EW_{ab}}{v^2 \sigma_y^2} \quad (3.10)$$

- d : Aşınan parçaların çapı  
 E : Young modülü  
 W<sub>ab</sub> : Temas eden metalin işi  
 v : Poisson oranı  
 σ<sub>y</sub> : Metalin eğilme gerilimi

Bir çok malzeme için  $v^2=0.1$ ;  $\sigma_y$ ,  $H_v$ 'nin 1/3'ü kadar ve  $\sigma_y/E$  oranı bütün malzeme için sabit olup değeri  $3.10^{-3}$  civarındadır. Serbest partiküllerin oluşumu için durum  $d \geq 60000 \frac{W_{ab}}{H_v}$  olur. Bunun sonucunda adhezif aşınmayı oluşturan partiküllerin maksimum çapı adhezif iş ve sertlik arasındaki orana yaklaşık eşit olmaktadır.

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

$$d \geq 24000 \frac{\gamma_a}{H_v} \quad (3.11)$$

$\gamma_a$  :Metalin yüzey enerjisi

Adhezif aşınmayı engellemek için, formülden de anlaşılacağı gibi krom, çimento ve nitrat katılmış çelik ve oksitli seramikler gibi sert malzemeler kullanılması karşımıza bir avantaj olarak çıkmaktadır.

Birbirlerine zayıf etkileşim gösteren malzeme çiftlerinin kullanılması da yararlı olmaktadır.

Yağlayıcı kullanırken, yağ filmi dayanıklılığı dikkate alınmalıdır. Bu yağlayıcılar akışkan ya da yarı akışkan durumlarda kalın film tabakası oluşturacak yeterlilikte viskoz olmalı ve sınır yağlama şartlarında metal-metal arasındaki teması önlemek için yük taşıyıcı bazı katkıları içermelidirler. Adhezif aşınması benzinli ve dizel motorlarının her ikisi içinde geçerlidir ve birkaç küçük durum ile birbirinden ayrılırlar. Aşınma mekanizmaları her iki motor için de aynıdır. Adhezif aşınması temel olarak yüksek sıcaklıkta çalışmada, yüksek hızlarda ve yüklerde ortaya çıkar. Bu tip aşınma; dayanımı sağlayan yağ filminin iki yüzeyi ayıramadığı durumlarda direkt olarak metal-metal arasında temas sonucu meydana gelmektedir. Segman-piston-silindir gömleği bölgesi, sürekli ve etkili yağlamanın en zor oluşturulabileceği bölgedir. Çünkü bağımsız yağlama sistemlerin sahip büyük dizel motorları hariç yağlama bilye başlarındaki yağ akıtma yerlerinden sıçratılan yağdan etkilenir. Ayrıca yağ miktarı segmanlar, özellikle yağ segmanı ile sınırlandırılmışlardır. Mükemmel hidrodinamik yağlama nadiren elde edilir. Bu yüzden adhezif aşınması temel olarak üst ve alt ölü noktada gerçekleştiği kabul etmek mantıklıdır. Zaten silindir gömleğinde aşınma kesitleri özellikle bu noktada göze çarpmaktadır [35].

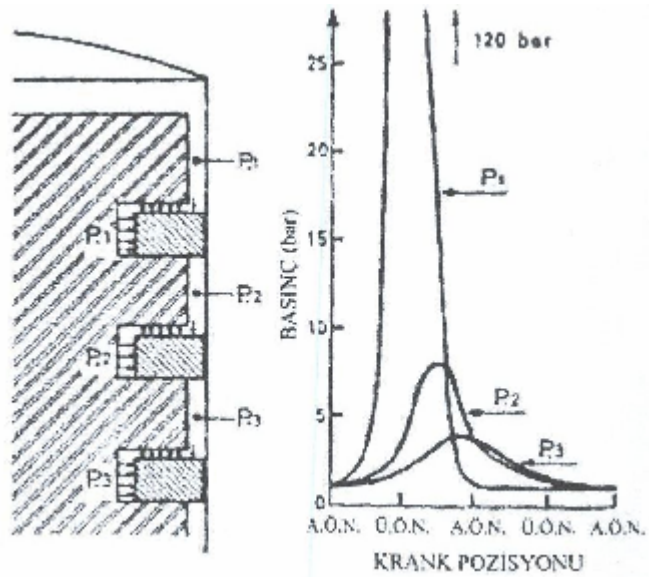
Korozyon ve abrazyon aşınmalarının yokluğunda, silindir gömleği aşınma kesitlerinin görünüşleri şekil 3.9'de görülmektedir. Beklenmedik çizgilere, üst segmanın üst ölü noktada olduğu durumlarda ortaya çıkar ve hızlı bir biçimde sık sık orijinal silindir gömleği kesitine benzeyen bir kesit şekli alır.





Şekil 3.9. Adhezif silindir aşınmasının tipik şekli [33]

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 basınca ve sıcaklık farkları ile açıklanır. Üst ölü noktada, üst segman sıkıştırma basıncının büyük bir kısmına ve daha sonra da yanma basıncının tamamına maruz kalır. Bu sırada ikinci segman birinci segmana oranla akış basıncının sadece küçük bir kısmına maruz kalır. Bu olay şekil 3.10' de gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Dizel motorlarda piston segmanları üzerindeki basınç [33]

Bunun yanında, yanma basıncının hızlı yükselmesinin dinamik etikleri üst segmanda şok etkisi yapıp şeklini bozabilir ve spesifik yükleri daha da artırır. Aynı zamanda, silindirin üst ve alt taraflarındaki sıcaklık farkları 100°C' ye kadar ulaşır. Bu da motor kesitinin yağlama şartlarına, yüzeylerin mekanik dayanımına ve silindir gömleği-segmana zarar veren heterojen genleşmelere neden olan ısıl bozulmalara yol açarak aşınmayı kötüleştirir.

Çalışan bir motorda aşınma mutlaka daha önce bahsettiğimiz aşınma tipleri ile sınıflandırılır. Ve bu yol şartlarının sağladığı test ortamında de geçerlidir. Bu nedenle, aşınmaya etki eden değişik parametrelerin incelenmesi sadece adhezif aşınması ile sınırlanmamıştır. Ayrıca abrazif ve korozyon aşınmaları da içermektedir.

Katmanlarına ayırma prosesinde birçok şart altında yapılan gözlemlerle levhasal partiküllerin, abrazif (metal kıymıkları) karakteristiği veya adhezif (boy kalınlık oranı 3/1 olan partiküller) karakteristiği göstermediği, fakat boyu çoğunlukla kalınlığın 10 kat geçen levhasal partiküller olduğu saptanmıştır. Silindir gömlekleri deformasyon ve kırılma ile bozulabilir ve katmanlara ayırma aşınması açıkça karakterize edilir. Bu tip aşınma motor aşınması bağlamında genellikle "kazıma" olarak adlandırılır [40].

### **3.2.5. Titreşim (Fretting) aşınması**

Bu tip aşınma ufak bir genliğe sahip titreşimli bağıl hareket halindeki iki yüzey arasında meydana gelir. Titreşim aşınması 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 aşınmadan dolayı oluşacak ürünlerin engellenmesi çok zordur. Aşınma partiküllerinin ortamdan uzaklaştırılamamasından dolayı boş alanlara dolarak yağlamayı engellenmesi sonucu ortaya çıkar. Titreşime maruz kalan demir metallerde, yüzeylerde kırmızı/ kahverengi benekler oluşur.

Olay sırasında üç temel karakteristik meydana çıkar;

1. Mekanik hareket, büyük ihtimalle metali tutarak yüzeydeki oksit filminin bozulmasına yol açar. Bu da atmosferde tekrar aktif hale geçmesini sağlar. Bozulmadan sonraki yarı çevrim sırasında, yarı çevrim bitimine kadar tekrar bozulmasına ve tekrar oksitlenmesine yol açabilir.
2. Yüzeyde ince olarak bölünmüş metal partiküller taşlama ile veya temas noktalarındaki kaynak oluşumları sonradan orijinal ara yüzeyden farklı bir yüzeyde, kesme veya yerel yorulma ile temizlenir. Atmosferdeki bu süreç, yorulma sırasında korozyon yorulmasının bir elementinin işin içine girmesi dışında bir etkisi yoktur.
3. 1.'nin sonunda oluşan oksit partikülleri veya 2.'nin sonunda oluşan oksitlenme metal partikülleri yüzeye zara vermeye devam eden aşındırıcı bir tozdur.

Titreşmenin tek bir çözümü yoktur. Fakat titreşim aşınması titreşimin olduğu yerde meydana gelir ve problem titreşim kaynağını ortadan kaldırılarak çözülebilir. Temas alanını yağlayıcı ile kaplanmak sürtünme katsayısını düşürür ve bu adhezyonu da düşürür. Aynı zamanda demir oksitlerin oluşumu engelleyen oksijen ile yok edilebilir.

### **3.2.6. Korozyon aşınması**

Metalik malzemeler içerdikleri alaşım elementlerinin miktarına bağlı olarak yüzeylerinde 0,1 mikron kadar doğal bir oksit tabakası bulunur. Bu tabaka sayesinde korozyon ortamlara karşı direnç gösterirler. Aşındırıcı ortam tarafından metal yüzeyine uygulanan tekrarlı darbeler esnasında yüzeyden malzeme ile beraber oksit tabakası da kalkar. Tekrarlı darbelerin sıklığından veya koruyucu tabakayı oluşturan elementin alaşım içinde zamanla tükenmesinden dolayı oksit tabakası tekrar şekillenmez duruma gelir ve korozyonun beraber geliştiği ve korozyonun aşınma hasarına katkıda bulunduğu bu olaya düşük sıcaklık korozyon aşınması denir.

Yüksek korozyon aşınmasına; kimya, maden ve metalürji sektörleri, nükleer reaktörler, dizel motorlar ve birçok sanayi alanında karşılaşılır. Metalik malzemeler birçok uygulamada yüksek sıcaklıklarda korozif ortamlara maruz kalırlar ve malzemenin korozyon direnci bu ortamlardan etkilenir.

Korozif ortamlar oksitleyici ya da redükleyici olarak sınıflandırılır. Oksitleyici atmosfer, yanma için hava veya oksijen girişinin olduğu, yüksek oranda moleküler oksijen ( $O_2$ ) içeren oksijen aktivitesinin moleküler oksijen konsantrasyonu ile kontrol edildiği ortamlardır. Redükleyici atmosfer ise, oksijen girişinin olmadığı yanmanın oksijensiz şartlarda gerçekleştiği ortamlardır.

En önemli yüksek korozyon aşınma türü oksitlenmedir. Metal ve alaşımlar yüksek sıcaklıklarda hava veya oksitleyici ortama maruz kaldıklarında yüzeylerdeki oksit tabakası doğal olarak büyür. Metalik malzeme ve üzerindeki oksit tabakası farklı ısıl genişleme katsayılarına sahiptirler. Oksit tabakası, çalışma ortamındaki ısınma-soğuma çevrimleriyle oluşan iç gerilmeler nedeni ile (metal tabaka ara yüzeyinde) zaman zaman dökülür ve hemen doğal olarak kendini yeniler. Koruyucu oksidin kendini tekrar yenileyemeyecek duruma gelmesi durumunda savunmasız kalan metalse hızla oksitlenir ve zamanla pul pul dökülerek yüzeyde malzeme kaybı oluşur [41].

Büyük çaplı silindir gömleklerinde korozyon aşınması; kazıma, abrazif aşınmasına sebep olmaktadır. Korozyondan sonra oyuklu bir yüzey oluşma eğilimi vardır.

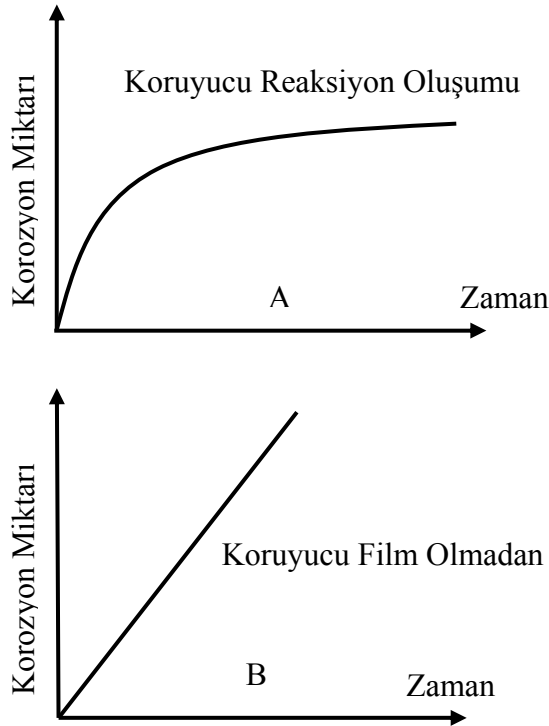
1950'lerde yüksek sülfürlü yakıtların kullanılmaya başlaması ile dökme demir gömleklerindeki aşınma miktarında artış kaydedilmiştir. Bu aşınma sülfürik aside bağlanmıştır. Demire % 0,2 oranında vanadyum katılması ile aşınma önemli ölçüde azalmıştır. Aynı zamanda asitlik problemleri azaltan, serbest alkaliler içeren gelişmiş yağlayıcılar üretilmiştir. Genellikle modern motorlarda korozyon ciddi bir problem değildir ve uzun çalışma ömrü sonucu sadece gömleklerde olur. Korozyon ne üst ölü noktada nede alt ölü noktada en çok orta kısmında görülür.

Korozyondan dolayı oluşan aşınma miktarındaki artış, yağlayıcıların kirlendiği zaman meydana gelebilir. Beyaz metal yataklarda korozyon sonucu kalay oksit oluşumu, yatağın dayanımı önemli ölçüde düşürebilir. Sert oksitlerin varlığı abrazif aşınmasını artırabilir [42].

### 3.2.6.1. 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 kimyasal etkiler sonucu oluşur. Dizel motorlarında yakıt içerisinde bulunan sülfürün yanması korozif sülfür türevleri meydana getirir [37].

Bunlar motordaki korozyon aşınması nedenleridir. Fakat bu aşınma 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 olabilir. Bazı metaller için, alüminyum gibi, koruyucu film tabakası belli bir kalınlığı eriştiği zaman korozyona aşınma reaksiyonu durur. Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Zamana bağlı korozyon aşınma tipleri [31]

Bazen kimyasal saldırı, sabit reaksiyon hızını belirsiz bir süre için sürdürür ve reaksiyon ürünleri sıvı, gaz ya da kırılğan yapıya sahip, yapışkan olmayan esnek gözenekli katılardır.

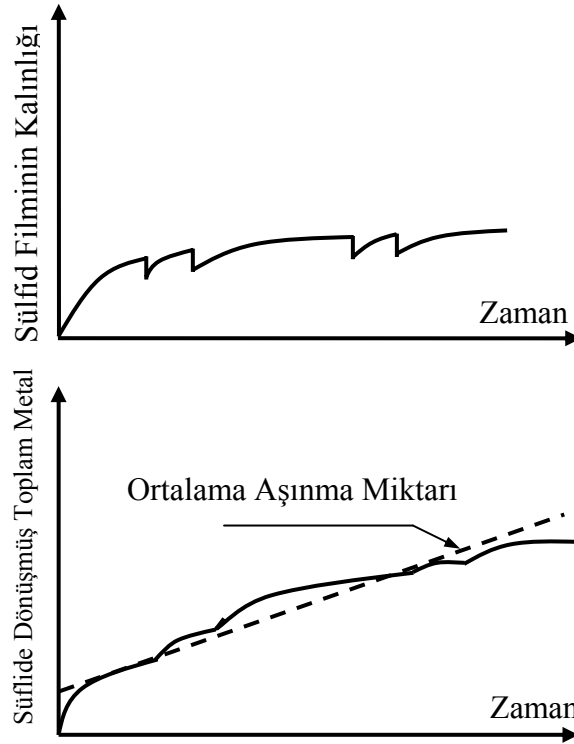
Korozyon aşınmasındaki ikincil adım ise, reaksiyon ürünlerinin sürtünme sunucu yüzeylerden uzaklaşması ile meydana gelir. Bu şartlarda yüzeyler çıplak kalır ve yeni bir koroziif reaksiyonla aşınma devam eder.

Birçok durumda korozyon ürünleri ayrıldıkları yüzeylerden daha serttir. Ve oluşturdukları film tabakası incelinceye kadar aşınmaya karşı dayanım gösterir. Kritik kalınlığı erişildiği takdirde sürtünme kuvvetinden dolayı yüzeyden ayırma işlem 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 şartları için uygun olup, düşük aşınma oranlarını gösterirler. Bu, yumuşak koroziif aşınma tipi olup aşırı basınçlı katık kullanılan yağlamadan sonra gerçekleşmektedir.

Reaksiyon ürünlerinin film kalınlıkları ve aşınma oranları zamana karşı değişimi Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Bu durumda, korozyon ve adhezif aşınmaları arasında bir bağıntı vardır. Korozyon filmi ne kadar kalın olursa metal metal arası temas ve sonradan oluşacak adhezif aşınması olasılığı o kadar düşük olur.

Motorların düşük veya yüksek devirlerdeki çalışma koşulları, yakıt içersindeki sülfür veya yağlama yağının oksidasyonunun bir sonucu olarak asit ürünlerinin oluşumu, korozyon aşınmasına yol açar. Bu anlamda kritik parçalar, yüksek sıcaklık dalgalanmaları altında çalışan parçalardır. Bunlar segmanlar, silindirler ve supaplarıdır. Yüzeyler, yataklarda kullanılan sürtünmeyi azaltıcı alaşımlar olan reaktif metallere kaplanmıştır. Genellikle yağlayıcı, yüzeyi korozyon aşınmasına karşı korumak ve bu aşınmayı yok etmek için kullanılır [33].



Şekil 3.12. Yumuşak korozyon aşınması [33]

### 3.2.7. Yorulma aşınması

Yüksek basınç altında çalışan parçalarda fazla sayıda yük tekrarlarının ardından, ya yüzey altında gelişen çatlakların yüzeye doğru büyümesi ya da yüzeydeki çatlakların gelişip yüzey altındaki çatlaklarla birleşmesi sonucu yüzeyden malzeme parçacığının kopup ayrılması ile oluşan bir aşınma şeklidir. Yetersiz yağlama nedeni ile ortaya çıkan aşınma hasarlarından farklıdır. İyi yağlama şartlarında bile görülebilir. Bu aşınma türü en çok rulmanlı yataklarda, düz yataklarda ve dişlilerde meydana gelir. Hasar yüzeyde veya yüzeyin altında görülebilir. Fakat oyuklu bir yüzey oluşur. Malzemenin yüzeyindeki korozyon veya gövdesindeki meydana gelen oyuklar erken bozulmaya neden olabilir [43].

#### 3.2.7.1. İçten yanmalı motorlarda yorulma aşınması

Yüzeyde kesiklerin meydana gelmesi bozulmaların başlangıcıdır. Daha sonra bu kesikler yüzeyde ilerleyerek kraterler oluşturur. Bu kraterler pitting yani oyuk oluşumu olarak adlandırılır. Bu bozulmaların daha ileriki seviyelerde daha büyük parçalar yüzeyden ayrılır. Buna dökülme ya da ufalanma adı verilir.

Yuvarlanma, yuvarlanma-kayma ve sadece kayma hareketleri altındaki, sıkıştırma ve kesilme dirençlerine göre daha düşük teğetsel dirence sahip gevrek malzemelerde teğetsel gerilimin maksimum olduğu noktada oluşur. Yüzey çatlakları etki ettiği malzemeler seramikler, oksitli seramikler, karbürler, nitritler ve metalik oksitlerdir. Bu malzemeler motorlarda sıkça kullanılmaktadır. Örneğin silindir ve segmanlarda kullanılan oksitli seramikler.

En temel yorulma aşınması olan yüzey çatlakları motorda en hassas noktalar olan kam ve subaplarda meydana gelir. Bu olay aynı zamanda rulmanlı yataklarda da meydana gelir. Bu mekanizmaları elastohidrodinamik ve Hertzian temas prensiplerine dayanarak çalışır. Pitting oluşumu sahip ve aşırı yüklemeler altında çalışan yatak yüzeyleri içinde hesaba katılmalıdır.

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

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

Tablo 3.6. Yorulma ömrüne katkıların etkisi [33]

Yağ Kompozisyonu	Bağıl Yorulma Ömrü
Temel yağ	2,18
Temel yağ + %205 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

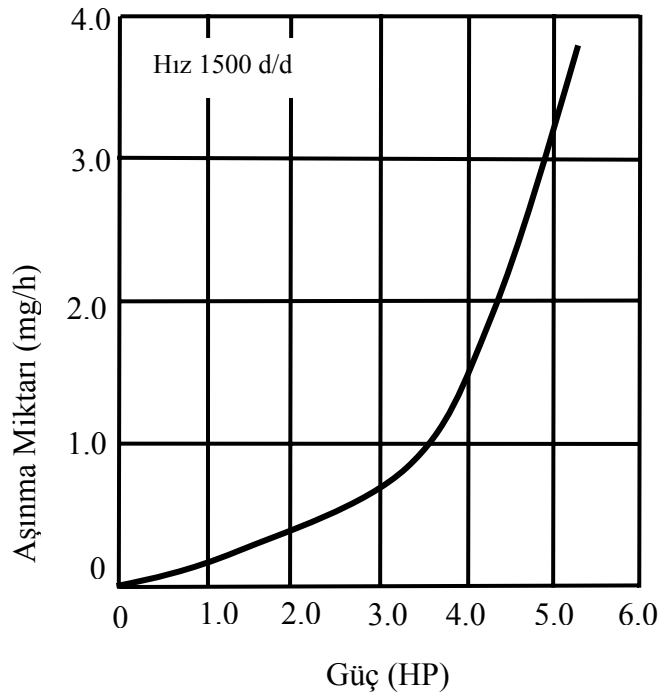


Katkıların yorulma aşınması üzerinde çeşitli etkileri vardır. Bazı koşullar altında molibden disülfür yararlıdır. Fakat Tablo 3.6'da de görüldüğü gibi organik yağlar, yüksek basınç katkıları ve dialkil fosfat zararlıdır.

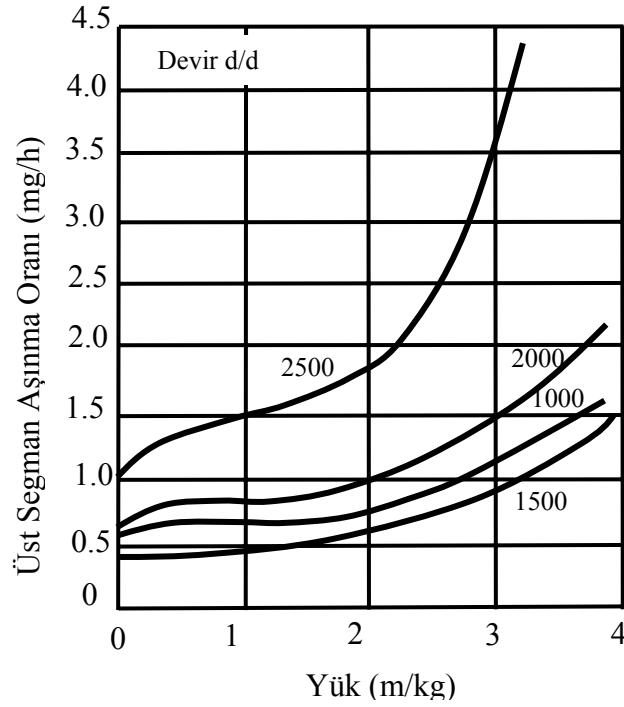
### 3.2.8. Motor çalışma koşullarının aşınmaya etkisi

#### 3.2.8.1. Motor gücü ve ortalama efektif basınç

Motor gücünün veya ortalama efektif basıncın artması sonucu ortaya çıkan daha fazla enerji, sıcaklıkların yükselmesine neden olur. Artan sıcaklıklar ile birlikte motorlarda aşınma miktarları artmaktadır. Şekil 3.13'de sabit hızda çalışan Petter AV 1 Dizel motorunda, Şekil 3.14'da ise değişik hızlarda çalışan benzinli tek silindirli Petter AV1 motorunda yükün aşınmaya olan etkisi görülmektedir. Benzer yükler ve hızlarda aynı motor dizaynı ile birlikte maksimum yanma basınçlarını korumak şartıyla aşınma benzin motorunda dizeldekine oranla daha azdır.



Şekil 3.13. Petter AV1 motorunda yüküne bağlı olarak segman aşınması [33]



Şekil 3.14. Tek silindirli benzin motorunda motor yüküne bağlı olarak segman aşınması [33]

### 3.2.8.2. Anormal Yanma

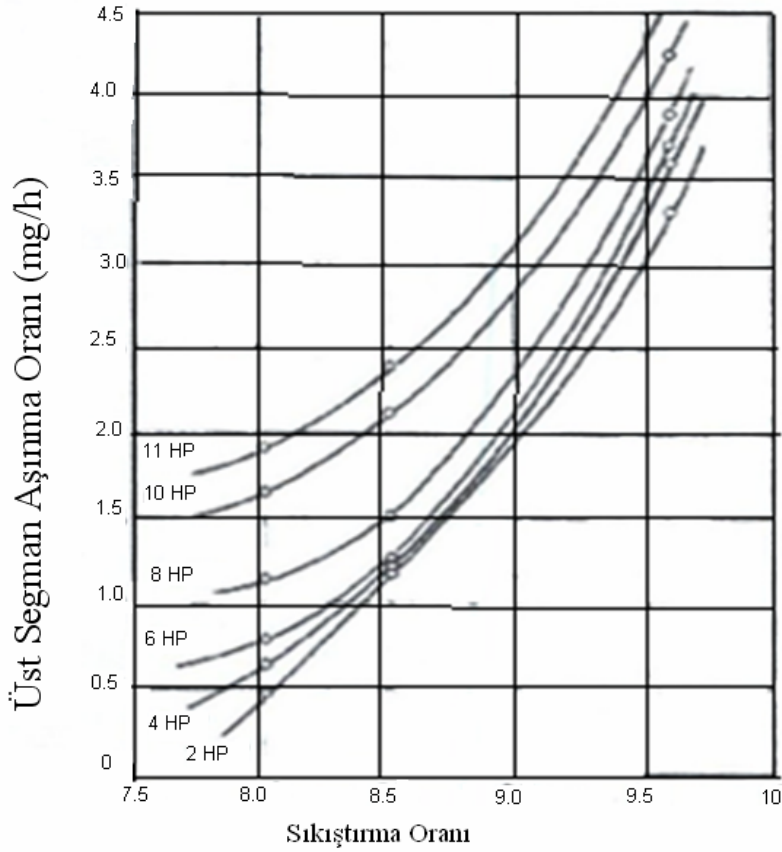
Anormal yanma piston, segman silindir çeperlerinin olduğu kadar çevrimin de sıcaklığını yükseltir. Bu da ani basınç yükselmelerine neden olarak sınır yağlama şartlarını kötüleştirir ve adhezif aşınmasını fazlalaştırır. Örnek olarak benzinle çalışan bir motorda üst segmanın aşınma oranı hafif vuruntu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

Benzer şekilde normal bir benzin motoru yanma şartlarında, çalışan üst segman 0.56 mg/h'lık bir aşınma oranına sahiptir.

### 3.2.8.3. Sıkıştırma Oranı

Eğer soğutma suyu sıcaklığı, motorun korozyon aşınmasına yol açan şartların altındaki sıcaklıkta ise, sıkıştırma oranındaki artış, adhezif aşınmaya benzer bir yükselmeye yol açar. Yanma sonu basıncı sıkıştırma oranına bağlı olarak artar. Şekil 3.15'de tek silindirli bir benzinli motordaki dökme demir üst segmanındaki aşınma

oranının sabit hızda ve değişik yüklerde sıkıştırma oranına bağlı değişimi görölmektedir. Şekil incelendiğinde sıkıştırma oranı ve motor yükü arttıkça aşınma oranının hızla arttığı görölmektedir.



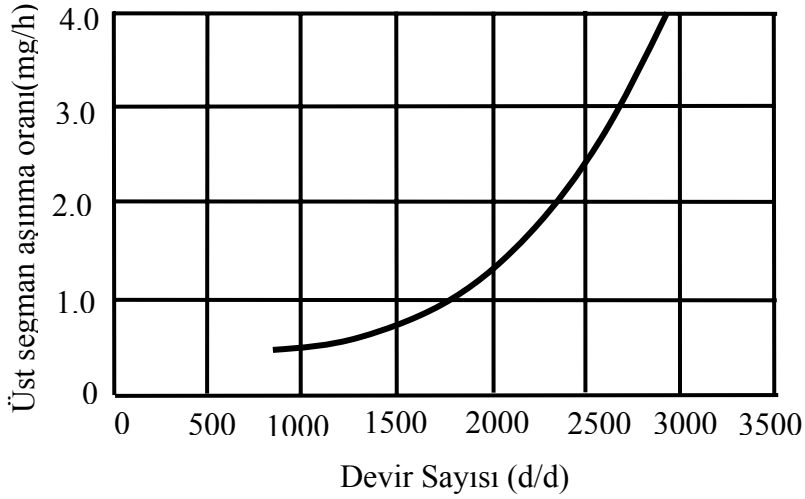
Şekil 3.15. Tek silindri motorun sıkıştırma oranının üst segmana etkisi [33]

#### 3.2.8.4. Sıcaklık

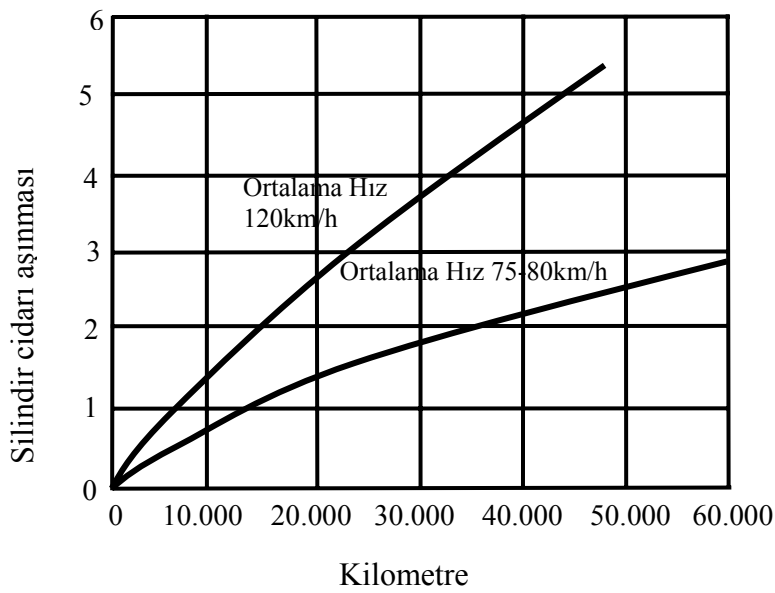
Sıcaklık faktörü aşınmada önemli bir yer tutmaktadır. Sıcaklığın artması ile birlikte bilhassa üst segman bölgesinde yağlama yağı viskozitesinin düşmesi, yağ filmi kalınlığının incelenmesi, metal yüzeylerin gerek kesme kuvvetlerinin azalması ve gerekse sertlik değerlerinin düşmesi dolayısıyla pürüzlerdeki kaynama kabiliyetinin artması özellikle kuru sürtünme şartında adhezif aşınmasını hızlandırır. Sıcaklık artışı ayrıca temas yüzeylerinin yapışması, piston sıkışması ve hatta silindir ve pistonlar arasında genleşme farkının sonucu olarak boşlukların azalmasına ile birlikte yapışmaların olması gibi daha büyük tehlikelere de yol açar [33].

### 3.2.8.5. Devir sayısı

Devir sayısı veya piston hızının artışı hidrodinamik yağlamayı iyileştirmek ancak motor sıcaklığını ve yanma basıncını da artırmaktadır. Sıcaklık ve basınç değişiminin zararlı etkileri hidrodinamik yağlamaya göre daha fazla olup aşınmaların artış yönünde belirlenmelidir. Şekil 3.16 benzinli motorda üst segmanın aşınma ilerlenmesinin nasıl olduğu gösterilmiştir. Şekil 3.17 'da başka bir benzinli motorda silindir cidarı aşınması iki farklı hız için gösterilmiştir. Ve bu olayda 120km/h'daki aşınma 75-80km/h'daki aşınmanın yaklaşık iki katıdır.



Şekil 3.16. Motor hızının segman aşınması üzerindeki etkisi [33]

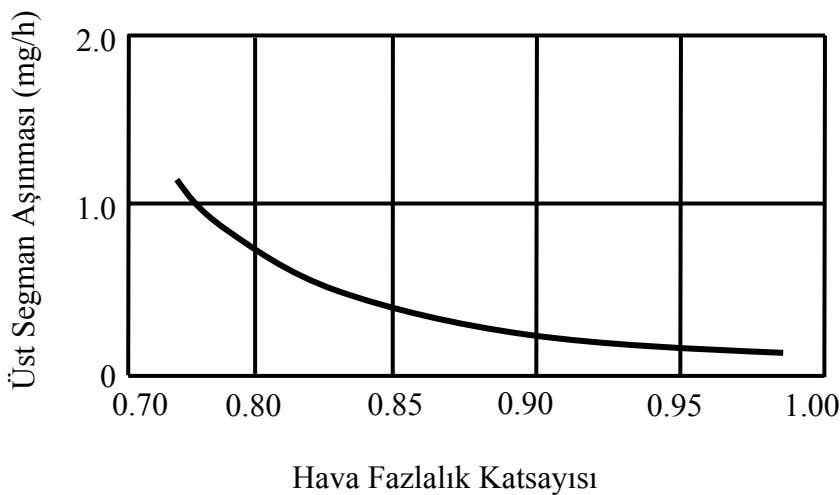


Şekil 3.17. Motor hızının silindir cidarı aşınmasının etkisi [33]

Piston hızı özellikle ivmesi segman üzerine uygulanan dik atalet kuvvetinin şiddetini artırır. Ve bu kuvvetler segmanın oturma yuvalarında titreşime sebep olur. Bu, segman hareketinin zamanlanması ve aynı zamanda yağ oranını etkiler ve kompresyon kaybına neden olur. Bununla birlikte, segmanları ve oyuk yüzeyleri oluşturan malzemelerin sertliğine bağlı olarak piston oyuklarının çekiçlenmesi 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 nedenle basınç oranı ve ortalama efektif basıncın yükselmesine bağlıdır.

### 3.2.8.6. Hava fazlalık katsayısı

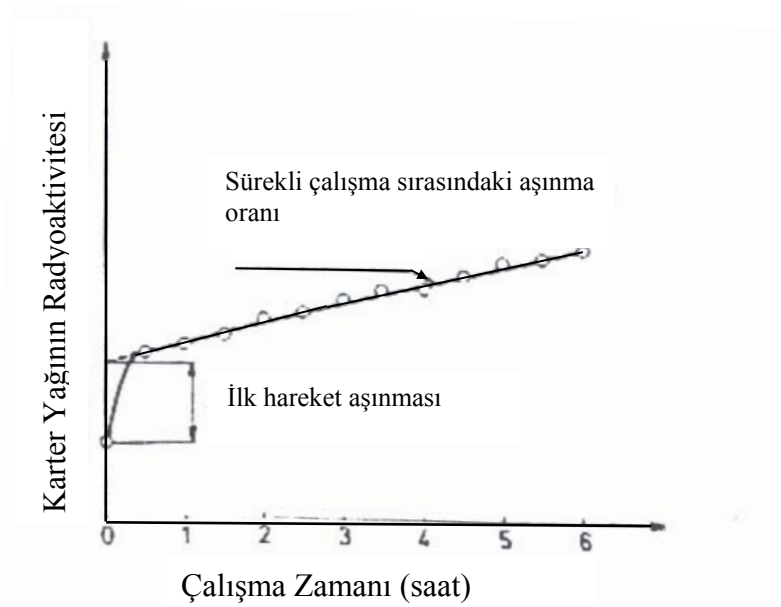
Zengin karışım, yağın geniş ölçüde geçici olarak seyrelmesine ve yağ viskozitesine düşüşe neden olur bu da hidrodinamik yağlamanın etkisini azaltır. Örneğin jiklenin yanlış kullanımı, adhezif aşınmasını artırır. Fakir karışım ise, özellikle dizel motorlarında aşırı oksijen oluşumu neden olur. Bu da sıcak gazlarda temas eden parçalarda yüzey oksitlerinin oluşmasına neden olur ve korozyon aşınmasına neden olan asitli yanma ürünlerinin meydana getirir. Şekil 3.18 benzinli motorda fakir karılımin üst aşınmasına etkisini göstermektedir.



3.18. Hava fazlalık katsayısının üst segman aşınmasına etkisi [33]

### 3.2.8.7. Motor ilk 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 adhezif aşınmasına neden olur. Bazen de yüksek sıcaklıklarda, kullanılan yağın viskozitesinin fazla düşmesi, yağın çok fazla akışkan olması ile yaşanan sıcak çalıştırma zorluklarına sebep olmaktadır. İlk hareket aşınması ile ilgili grafik şekil 3.19’da verilmektedir.



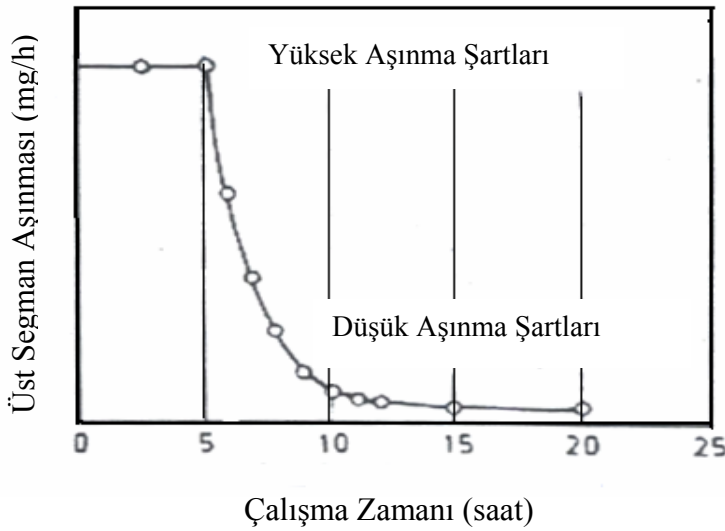
3.19. Benzinli motorda radyoaktif yöntemle aşınma oranının belirlenmesi [33]

Bu yüzden ilk hareket aşınması, rejim halindeki aşınmadan ayrı olarak düşünülmektedir. İlk hareket aşınması daha büyüktür ve korozyon aşınmasının temelini oluşturur. Adhezif aşınması motorun durdurulması sırasında yağ filminin gömlekte iz bırakmasına çalıştırıldıktan sonra yağ filminin daha çok ya da az hızla oluşumuna ve bununla birlikte yoğunlaşmış benzin veya gaz yağı tarafından soğuk cidarların yıkanmasına bağlıdır.

İlk hareket aşınması azaltmak için, motorun kısa süreli durdurulması, uzun süreli durdurulmasına göre tercih edilmelidir. Yoğun viskoziteli yağlar yerine çalıştırma

esnasında film kalınlığı zarar görmediği sürece düşük viskoziteli yağlar tercih edilmelidir.

Durdurma esnasında motorun düşük sıcaklarda olması, yüksek sıcaklıklarda olmasına göre sürtünme aşınmasının daha az olmasına bağlıdır. 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 aşınmasına etkisi aşınmanın genişliğine göre bir ila birkaç saat arasında devam edebilir(Şekil 3.21).



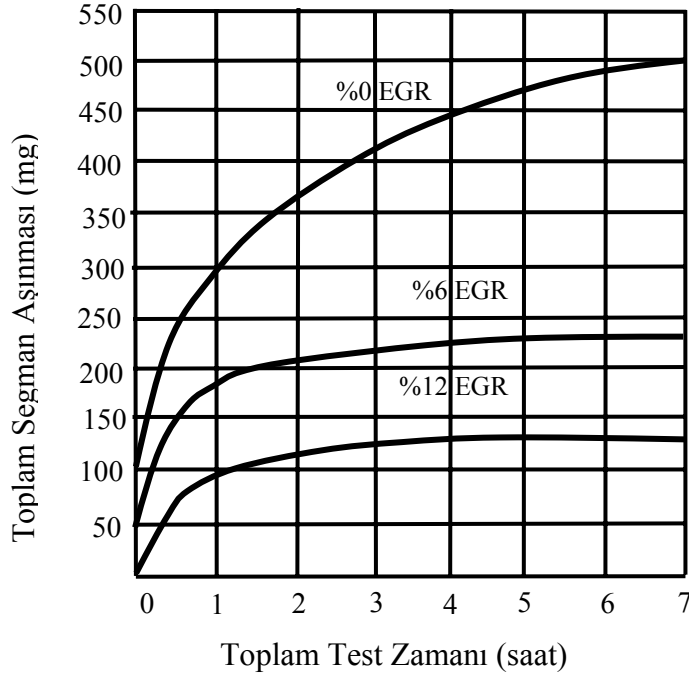
Şekil 3.20. Çalışma koşullarının değiştirilmesi durumunda meydana gelen aşınma oranındaki değişim[33]

Şekilde çalışma şartlarında biri değiştirildiği zaman, geçici olarak bir aşınma tepesinin oluştuğu görülür. Bu nedenle adhezif aşınması devirli çalışma koşullarında daha fazladır. Korozyon aşınması da aynı şekilde olduğundan yüksek devir şartlarında kullanılan motorlar, normal yollarda kullanılan motorlara göre daha çok aşınır.

### 3.2.8.8. Egzoz gazlarının resirkülasyonu

Benzinli motorlarda egzoz gazı resirkülasyonu yapmak, yanma sıcaklığını ve basıncının kontrol edilmesi böylece NO<sub>x</sub> oluşumunun azalmasını sağlar. Motor

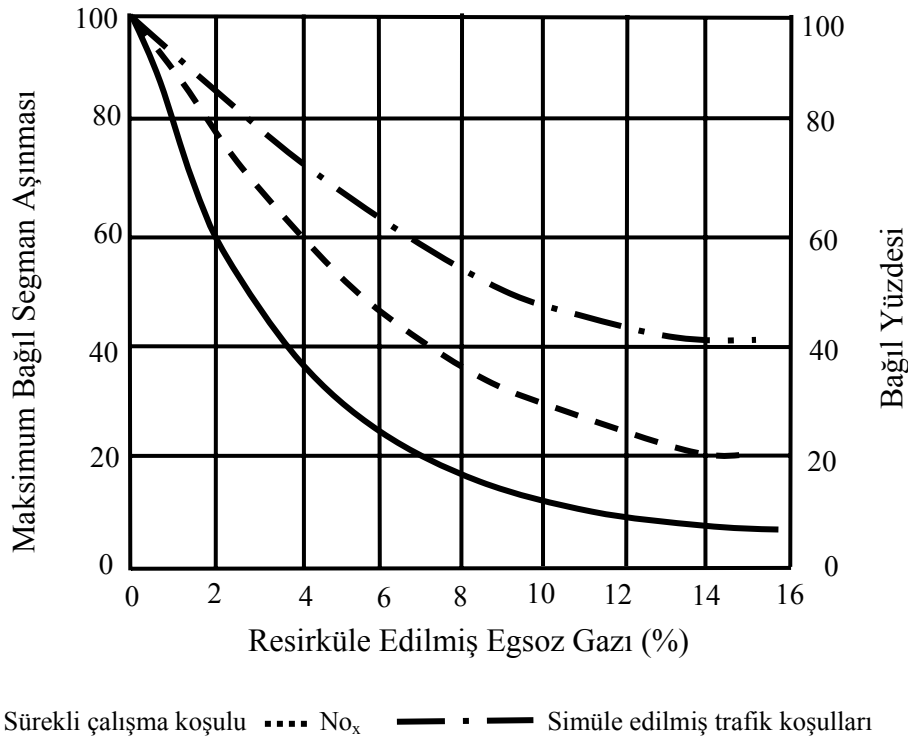
aşınması üzerinde de olumlu etkiye sahiptir. Örneğin dökme demir üst segmana sahip bir V8 motorunda EGR oranı artırıldığında, üst segmanların daha az aşınmaya maruz kaldığı görülmüştür. Bu kararlı ve devirli çalışma koşulları için de geçerlidir.



Şekil 3.21. EGR'nin segman aşınmasına etkisi (1800 d/d) [33]

Geniş ölçüde bakıldığında, rejim koşullarında aşınma azalmasının devirli şartlara göre daha olumlu olduğu görülür. Şekil 3.22'de değişken motor hızı ve yük durumlarında bağıl aşınmanın resirküle edilen egzoz gazları oranına göre değişimi gösterilmektedir. Oluşan bu ürünlerin adhezif ve korozyon aşınmaları açık bir şekilde doğrudan veya dolaylı olarak etkileri vardır. Kirlenmeyi önlemek için yapılan her hareket aynı zamanda aşınmaya karşı yapılmaktadır. Ayrıca NO<sub>x</sub>'lerin yağ üzerinde kimyasal etkileri de unutulmamalıdır.





Şekil 3.22. Yapılan EGR yüzdesinin piston aşınmasına ve NO<sub>x</sub> oluşumuna etkisi [33]

### 3.2.9. Aşınma ölçüm yöntemleri

#### 3.2.9.1. Ağırlık farkı yoluyla ölçme

Ekonomik olması, kullanılan ölçme aletinin oldukça hassas olması nedeniyle çok sık kullanılan bir yöntemdir. Deney numunelerinin her ölçülmesi için fazla zaman kaybına sebep olmaktadır. Ağırlık kaybının ölçülmesi için 1mg veya 0,1 mg hassasiyetindeki teraziler kullanılır.

Aşınma miktarı gram veya miligram cinsinden ifade edilmiş ise, alınan yol metre veya kilometre olarak tespit edilmiş bulunan kayma veya sürtünme yoluna göre birim kayma yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı (g/km) , (mg/m) ile ifade edilir. Ağırlık kaybı birim alanı için hesap edilecekse (gr/cm<sup>2</sup>) gibi bir birimle ifade edilebilir. Ağırlık kaybı hacimsel aşınma miktarı olarak belirtme istendiğinde ise yine ağırlık kaybından hareketle kullanılan malzemenin yoğunluğu göz önünde

bulundurularak bulunabilir. Burada elde edilecek birim hacimdeki aşınma miktarı ( $\text{cm}^3/\text{m}$ ), ( $\text{cm}^3/\text{cm}$ ) gibi birimlerle ifade edilebilir.

### **3.2.9.2. Kalınlık ölçme yöntemi**

Aşınma esnasında meydana gelecek boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeriyle karşılaştırılması suretiyle elde edilir. Kalınlık olarak tespit edilen değer, hacimsel olarak tespit edilen birim hacimdeki aşınma miktarı elde edilir. Kalınlık hassas ölçme aletleri ile  $1\mu\text{m}$  duyarlıkta ölçülebilir.

### **3.2.9.3. İz değişiminin ölçülmesi yöntemi**

Sürtünme yüzeyi bölgesi geometrisi belirli bir iz, plastik deformasyon yoluyla oluşturulur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun değişimi ölçülür. Uygulamalarda en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme aletidir. Bilya veya elmas pramatın bıraktığı iz çapındaki değişme mikroskop yardımıyla ölçülmesi suretiyle değişim incelenir.

### **3.2.9.4. Radyoizotoplarla ölçme yöntemi**

Sürtünme yüzey bölgesinin proton nötron veya yüklü atom paçacıklarıyla bombardıman edilecek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır. Aşınmanın büyük hassasiyetle ölçülebilmesi ve sistem içerisindeki çalışma şartlarının değiştirilmeden ölçü alınabilmesi avantajlarıdır. Fakat ekonomik olmaması deneniyle özel problemlerin çözümü dışında yaygın bir yöntem değildir [43].

## BÖLÜM 4. MATERYAL METOD

Silindir- segman arasındaki sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemek amacıyla bir aşınma cihazı tasarım ve imalatı yapılmıştır. Segman-gömlek çifti arasında meydana gelen sürtünme ve aşınmanın farklı yağlayıcılara göre değişimleri araştırılmıştır. Deneyler farklı yük ve devir şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında silindir gömlek numunesi 75°C'de ısıtılmıştır. Sürtünme deneyleri her bir yük ve devir şartlarında aşınma cihazının 30 sn çalıştırılması ile sürtünme kuvveti değerleri yük hücresi ile tespit edilerek normal yüke bölünmesi ile sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Aşınma deneylerinde ise her bir deney için farklı numune kullanmak suretiyle aşınma miktarları tespit edilmiştir.

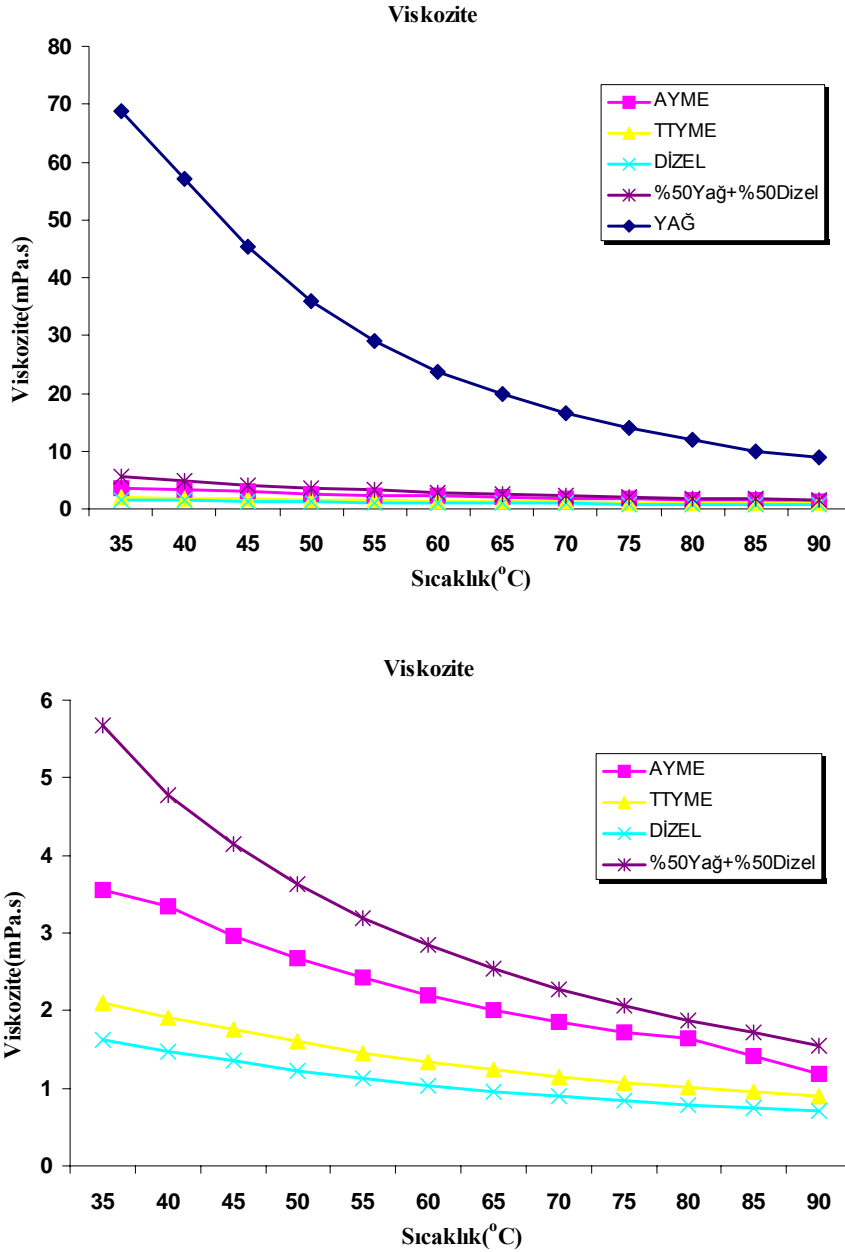
### 4.1. Yağlayıcılar

Deneyler, her bir yük devir şartlarında farklı yağlayıcılar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde sırasıyla 15W40 dizel motor yağı, Euro dizel, TTYME, AYME ve %50Yağ+%50dizel karışımının yağlayıcı olarak kullanılmasının sürtünme ve aşınmaya etkisi incelenmiştir. Deneylerde, segman-gömlek arası yağlanması damlama usulü yapılmış olup ve saatte 0,5 ml olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan yağlayıcıların özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Deneylerde kullanılan yağlayıcıların özellikleri [45,46]

Özellikler	Standartlar	15W40 Yağ	Euro Dizel	AYME	TTYME
Kinematik Viskozite 40°C mm <sup>2</sup> /s 100°C mm <sup>2</sup> /s	ASTM D 445	101 13.96	3.25	5.78	3,5
Viskozite İndeksi	ISO 2909	137			
Yoğunluk 15°C kg/dm <sup>3</sup>	ASTM D 4052	0.881	0.84	0.892	0,860
Akma Noktası	ISO 3016	-33	-10	-6	-15

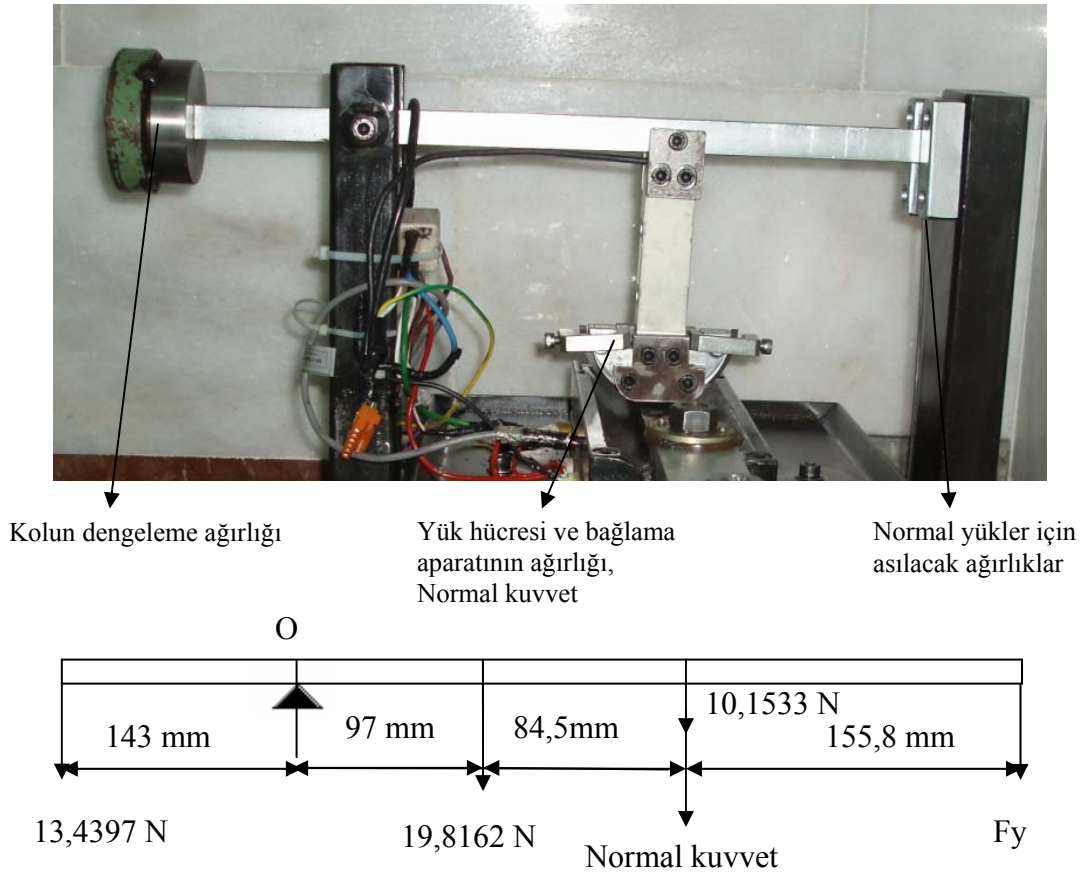
Şekil 4.1' de deneylerde kullanılan yağlayıcıların sıcaklığa bağlı olarak dinamik viskozite değişimi görülmektedir. Şekli incelediğimizde en düşük viskozite değeri dizel yakıtında olduğu görülmektedir. En yüksek viskozite değerini ise yağ vermektedir. Yağdan sonra en yüksek viskozite değeri %50Yağ + 50 Dizel de görülmektedir. Daha sonra sırasıyla AYME ve TTYME gelmektedir.



Şekil 4.1. Yağlayıcıların Sıcaklığa Bağlı Olarak Dinamik Viskozite Değişimi

## 4.2. Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi

Birbirine göre izafi hareket yapan ve normal bir kuvvetin ( $F_n$ ) etkisi altında bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasında harekete karşı  $F = \mu \cdot F_n$  değerinde bir sürtünme kuvveti oluşur. Burada  $\mu$  sürtünme katsayısıdır. Sürtünme katsayısının belirlenmesinde ilk önce normal yüklerin belirlenmesi gerekmektedir. Deneylerde normal kuvvet olarak 100, 80, 60 ve 40 N yükler kullanılmıştır. Segman numunesin de bu deney yüklerinin sağlanması için asılacak yüklerin ( $F_y$ ) belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 4.2'de  $F_y$  kuvvetleri O noktasına göre moment alınarak belirlenmiştir.



Şekil 4.2. Normal kuvvetin belirlenmesi

Yük hücresi ve bağlama aparatının ağırlığı = 10,1533 N

Dengeleme ağırlığı = 13,4397 N

Kolun ağırlığı = 19,8162 N

$F_y$  = Segman üzerine binen normal kuvvetin bulunması için asılacak ağırlıklar

Normal kuvvet; 100 N askı ağırlığı elde etmek için, O noktasına göre moment alınırsa;

$$\sum M_0 = 0$$

$$19,8162 * 97 + 89,81 * 181,5 + 10,1533 * 181,5 + F_y * 337,3 - 143 * 13,4397 = 0$$

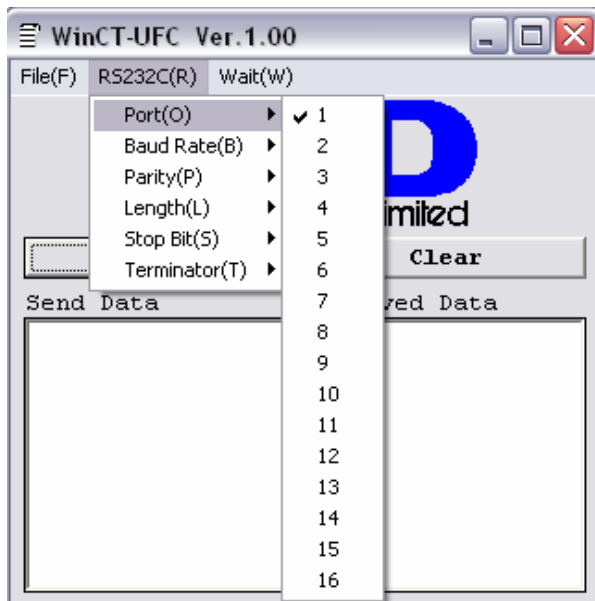
$$F_y = 53,7588 \text{ N' dir.}$$

Aynı şekilde 80, 60 ve 40N'lar için

$$F_y = 42,96 \text{ N, } 32,47 \text{ N ve } 21,48 \text{ N' dir.}$$

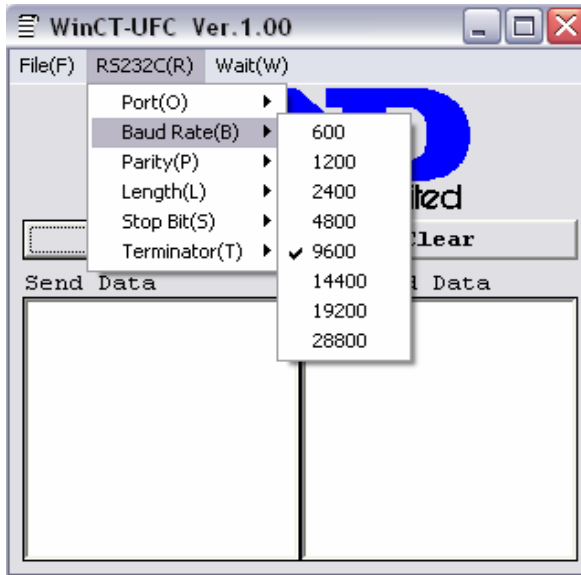
Sürtünme kuvvetini ölçmek için 20 kg kapasiteli C3 serili 1 gr hassasiyetli bir yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücresinden belirlenen sürtünme kuvveti değerleri saniyede 10 veri atabilen bir AD 4406 indikatör vasıtasıyla okunmuştur. İndikatörden okunan değerler program vasıtasıyla bilgisayara aktarılmış olup sürtünme kuvveti belirlenmiştir.

İndikatörün bilgisayar bağlantısı RS-232 ile yapılmıştır. Bilgisayara bağlandığı port programdan ayarlanmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Programın bilgisayara tanıtılması

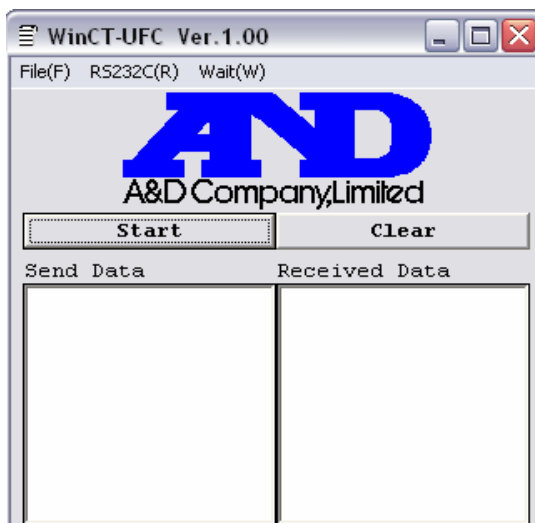
Baud rate (B) ayarını 9600 'a getirerek aktarma hızı belirlenmiştir (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. Programın ayarlanması

Daha sonra diğer ayarları olan Parity(P) N, Length(L) 8, Stop(S) 1 ve Terminator(T) CR/LF olarak ayarlanmıştır. Ayrıca Wait(W) 0 'a getirilerek indikatörün aktarma hızı olan saniyede 10 veri olarak ayarlanarak program çalıştırılmaya hazır hale getirilmiştir.

Start yapılarak yük hücresinden okunan sürtünme kuvveti değerleri belirlenmiştir. Okunan bu değerlerin ortalaması alınmak suretiyle sürtünme kuvveti değerleri hesaplanmıştır (Şekil 4.5.).



Şekil 4.5. Programın başlatılması

### 4.3. Aşınmanın Ölçülmesi

Deneylede aşınma miktarı ağırlık kaybı esasına göre belirlenmiştir. Deneyle başlamadan önce segman ve gömlek numunesi etanol ile temizlenmiştir. Temizleme işleminden sonra numunelerde etanolün kalmaması için kurutulma işlemi sağlandıktan sonra deney öncesi hassas terazide ( $10^{-4}$  g hassasiyetinde) ölçüm yapılmıştır. Daha sonra aşınma cihazında farklı devir, yük ve yağlayıcılar ile 5000m yol alınmıştır. Deney sonrası tekrar segman ve gömlek numunesi etanol ile temizlenmiştir. Temizleme işleminden sonra etanolün segman ve gömlek numunesinden buharlaşmasını sağladıktan sonra ölçüm tekrar yapılmıştır. Ölçülen değerlerin farkları alınmak suretiyle segman ve gömlekteki aşınma miktarları belirlenmiştir.



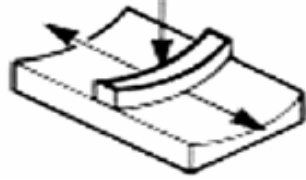
Şekil 4.6. Hassas Terazi

### 4.4. Tasarım ve İmalat

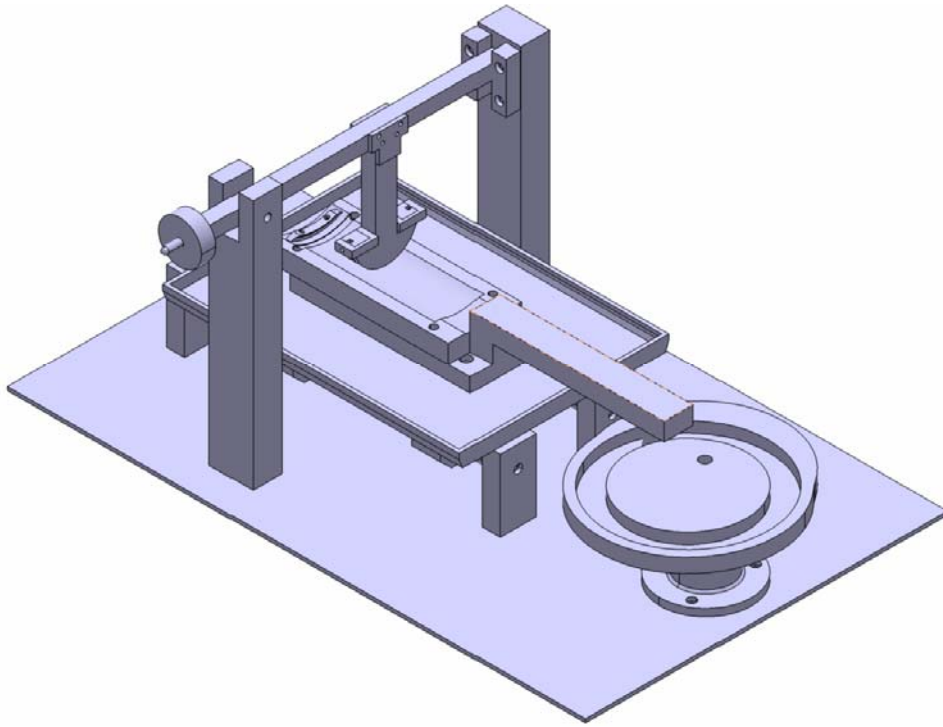
Bu çalışmada segman-gömlek arasındaki sürtünme-aşınma miktarlarını ve farklı yakıt ve yağ karışımları kullanılmasının bu parametreleri olan etkisi incelenmek amacıyla bir aşınma cihazının tasarım ve imalatı yapılmıştır. Tasarımı yapılan cihaz motorlardaki gömlek- segman gibi doğrusal hareket etmektedir. Fakat motorlardan



farkı segman numunesi sabit gömlek numunesi ise hareketlidir. Segman tutucuya yerleştirilen yük hücresi yardımı ile sürtünme kuvveti ölçülmektedir. Şekil 4.7' de segman ve gömlek numunesi çalışmasının şematik görünümü görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.8.'de tasarlanan aşınma cihazının katı modeli görülmektedir.



Şekil 4.7. Segman-gömlek numunesinin şematik görünümü



Şekil 4.8. Tasarlanan aşınma cihazının katı modeli

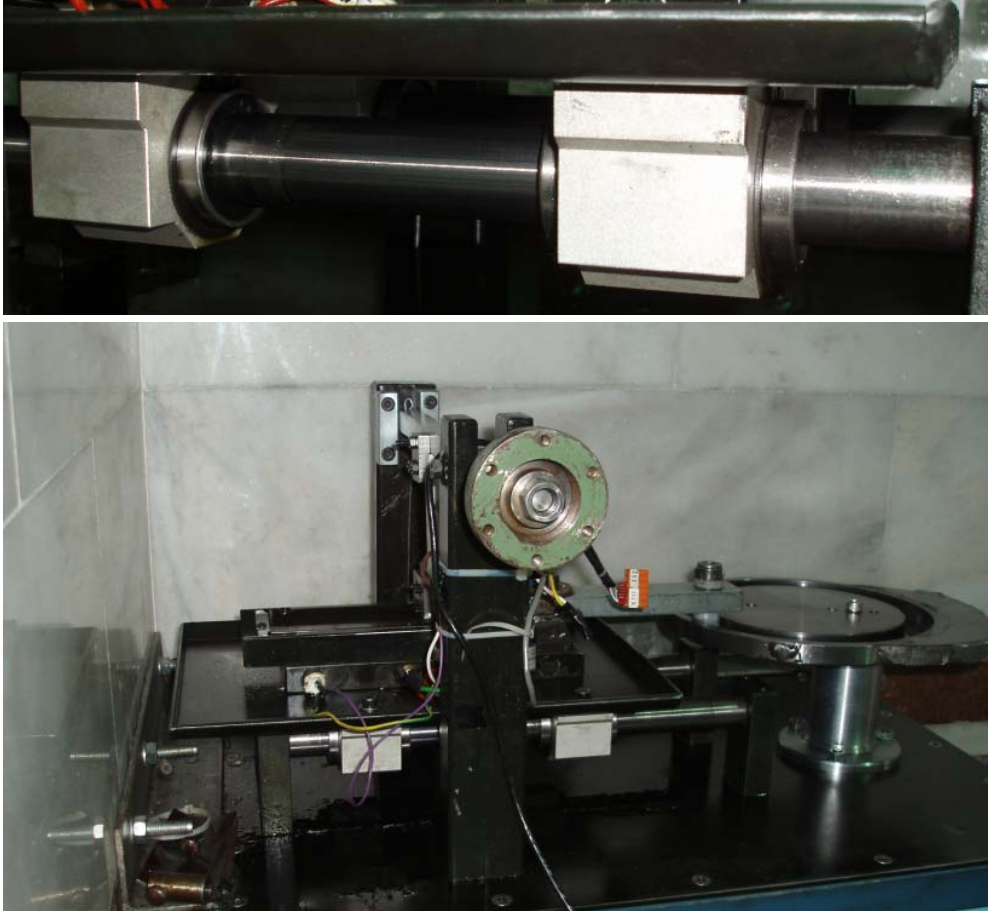
İmalatı aşamasında ilk olarak gömlek tutucu olarak görev yapan alt tablanın imalatı yapılmıştır. 98mm çapındaki bir gömlek kullanılarak gömleğin alt tablaya oturması için bu çapa uygun olarak numune frezede işlenmiştir. Gömlek numunesi hareket esnasında sabitlemesi için konik bir sabitleyici yapılmıştır (Şekil 4.9). Daha sonra farklı çaplardaki gömlek numunesi incelemek amacıyla bu tablanın bağlandığı farklı bir alt tabla kullanılarak bilyalı yataklar üzerine montajı yapılmıştır. Bilyalı yatak ile

alt tabla arasına 0,4 mm kalınlığında ve uçları bükülmüş yağlama sırasında yağın aşağıya akmasına önlemek için bir saç konulmuştur (Şekil 5.10).



Şekil 4.9. Gömlek numunesinin bağlanması

Bilyalı yatakların ve diğer parçaların montajı için sehpa yapılmıştır. Hareketli olan tablanın sehpa üzerine montajı edilmiştir.



Şekil 4.10. Bilyalı yatakların ve diğer parçaların montajı

Ağırlıkların ve yük hücresinin bağlandığı kol imal edilip, bunun sehpaye bağlanması için iki ayak yapılmıştır. Kola, yük hücresi ile segman numunesinin bağlanıp, ağırlıkların asıldığı anda segmanın gömlek numunesine teması sırasında tam dengede olduğu konum dikkat edilerek tasarım yapıp imal edilmiştir. Tek taraftan sabit mil üzerine bağlanan ve diğer taraftan doğrusal hareket esnasında sabit kalmasını, yukarı aşağı hareket edebilen sabitleyici ayaklar kullanılarak montajı yapılmıştır. Ağırlıkların asılması için ağırlık asıcı kol kullanılmıştır.

Tablanın hareketini sağlayacak 1,5 kW gücünde bir DC motor kullanılmıştır. DC motorun sehpaye montajı yapılmıştır. Motor çıkış milinden hareketin iletilmesi için bir yatak imal edilmiştir. Silindir-krank mekanizması elde etmek için gömlek kursu boyunca 100 mm çapını verecek bir şekilde kam yapılmıştır. Yapılan kam balans makinesinde balansı sıfırlanmıştır. Masuralı yataklar ile hareketi iletimi sağlayacak bir yuva açılmıştır. Bu yuva içersinde masuralı yatak yuvarlanması suretiyle hareket iletimi sağlanmıştır. Diğer taraftan ara kol ile gömlek numunesinin bağlandığı alt tablaya sabit olarak montaj edilmiştir.

Gömlek numunesinin çalışma şartlarına göre ısıtılması için alt tablanın başına, ortasına ve sonuna fişek ısıtıcılar bağlanmıştır. Sıkı geçme olarak takılacak ısıtıcılar 18mm çapında delinerek ısıtıcıların montajı yapılmış olup sıcaklığın istenilen değerde sabit kalması için devre kesicili bir termostat kullanılmıştır. Termostat probu gömlek numunesine yakın bir yere bağlanmıştır.



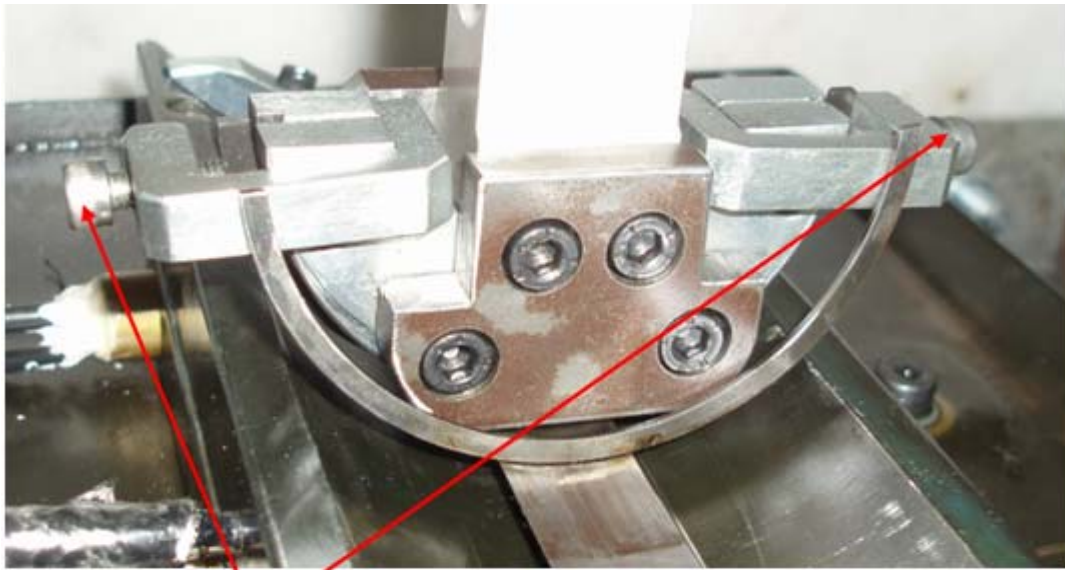
Şekil 4.11. Termostat

DC motor üç fazlı olup maksimum 2200 d/d' dır. DC motoru kumanda edecek LG marka 2 faz girişli üç faz çıkışlı 1 ile 60 Hz aralığında çalışan bir sürücü kullanılmıştır.



Şekil 4.12. Sürücü

Segmanın bağlanması için bir segman tutucu imal edilmiştir. Segmanın gömlek numunesinde temas genişliğini ayarlamak için her iki taraftan segmanın çapını değiştiren bir ayar vidası kullanılmıştır (Şekil 4.13). Bu ayar vidalarıyla segmanın çapı kısıtlayıp veya açmak suretiyle istenilen temas genişliği ayarlanmıştır. Daha sonra segman tutucu yük hücresi ile beraber kola bağlantısı yapılmıştır. Bağlantı noktası cıvatalı olup segmanın yük uygulandığı anda gömleğe tam oturması sağlanmıştır.

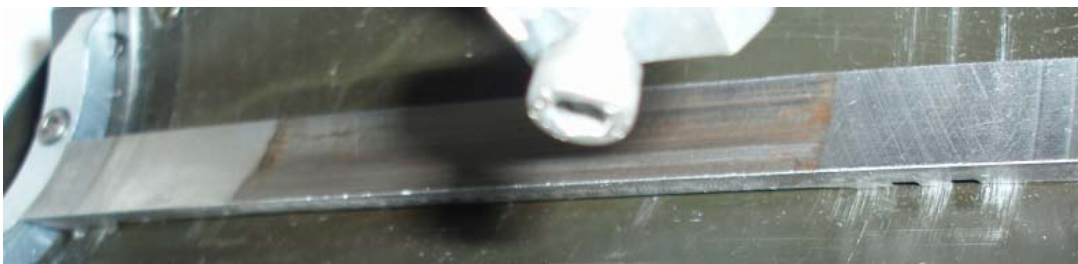
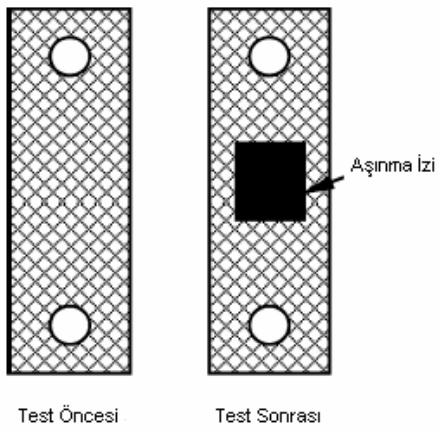


Segman ayar vidası

Şekil 4.13. Segman tutucu



Şekil 4.14. Yük hücresi ve segman tutucunun bağlantısı



Şekil 4.15. Gömlek aşınma izi

Yük hücresinden ölçülen sürtünme kuvveti bir gösterge vasıtasıyla okunarak program ile bilgisayara aktarılmıştır. Asılan yük ve elde edilen sürtünme kuvveti ile sürtünme katsayısı belirlenmiştir.



### Aşınma Deneyleri Parametreleri

1. Alınacak yol : 5000 m.
2. Tabla sıcaklığı :  $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$
3. Devir : 60, 90, 120, 150 d/d
4. Yük : 40, 60, 80, 100 N
5. Yağ, %50Yağ + % 50 Dizel, %100 Dizel, %100 Tütün Tohumu Metil Esteri (TTYME) ve %100 Ayçiçeği Yağı Metil Esterinin (AYME) aşınma davranışı incelenmiştir.



Şekil 4.16. Aşınma cihazının görünüşü

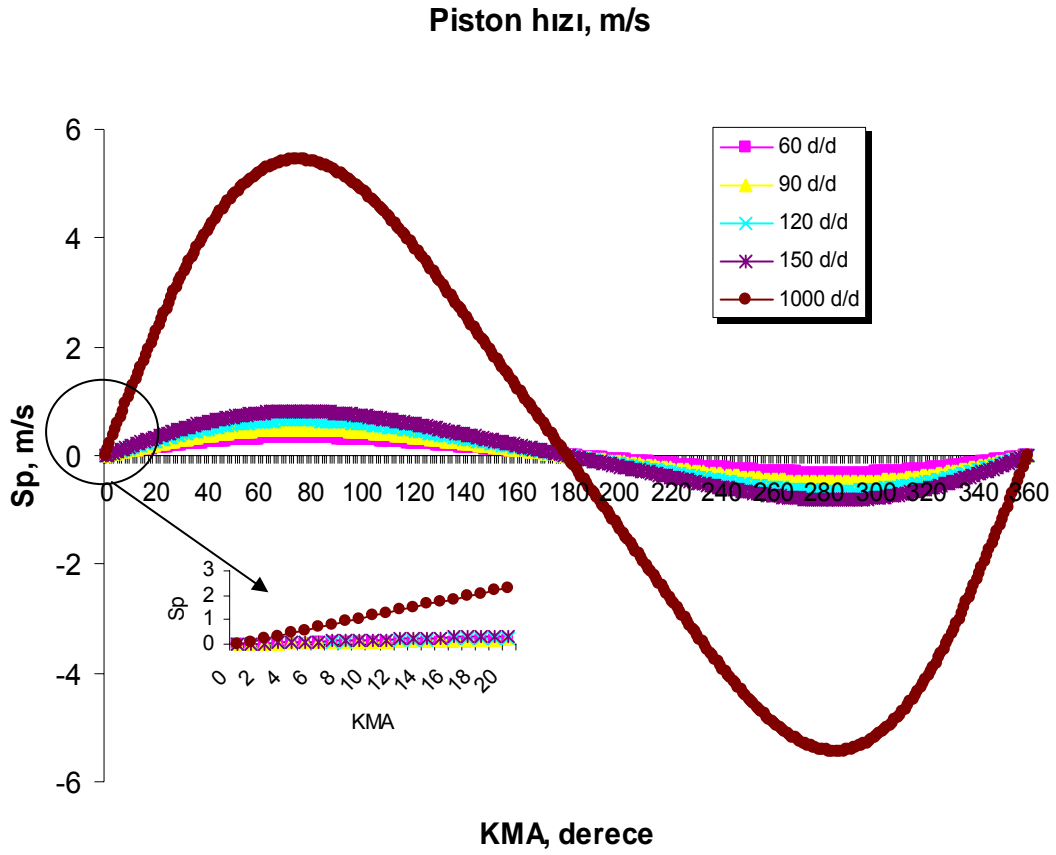
## **BÖLÜM 5. DENEY SONUÇLARI**

### **5.1. Sürtünme Deneyleri**

Aşınma cihazı her bir yük ve devirde 30 saniye boyunca çalıştırılarak PC' ye aktarılmıştır. Belirtilen yük ve devir şartlarındaki sürtünme kuvveti, aktarılan sürtünme kuvveti değerlerinin ortalaması olarak alınmıştır. Ortalaması alınan sürtünme kuvvetlerinin normal yüklere bölünerek sürtünme katsayıları belirlenmiştir. Çalışma devirleri 60,90,120 ve 150 d/d olarak, normal yükler için ise 40, 60, 80 ve 100 N seçilmiştir. Motorlarda özellikle ilk hareket esnasında ve ÜÖN civarlarında sınır sürtünme şartı hakim olduğundan deneyler esnasında özellikle düşük devir aralıkları seçilmiştir. Şekil 5.1' de farklı motor devirlerinde ortalama piston hızlarının değişimi görülmektedir. Şekilden de görüleceği gibi 1000 d/d da çalışan bir motorda piston hızı 20 KMA' dan sonra hızla arttığı için yağlama rejimi sınır sürtünmeden hidrodinamik sürtünmeye geçmektedir. Oysa deneyde seçilen devir aralıkları anlık piston hızlarının 1000 d/d' nın oldukça altındadır. Böylece seçilen bu devir aralıkları hem ilk hareket esnasındaki sürtünmeler hem de normal çalışma devirlerinin ilk 20 KMA' a kadar olan düşük piston hızlarındaki sürtünmeleri daha gerçekçi analiz edebilmek açısından önemlidir.

Deneyler esnasında motor soğutma suyu çıkış sıcaklığı olan  $75\pm 5$  °C esas alınmıştır. Bu nedenle düzenekte kullanılan silindir gömleği ısıtıcı ve kontrol düzeneği vasıtasıyla çalışma sıcaklığı ise  $75\pm 5$  °C' ye ayarlanmıştır.

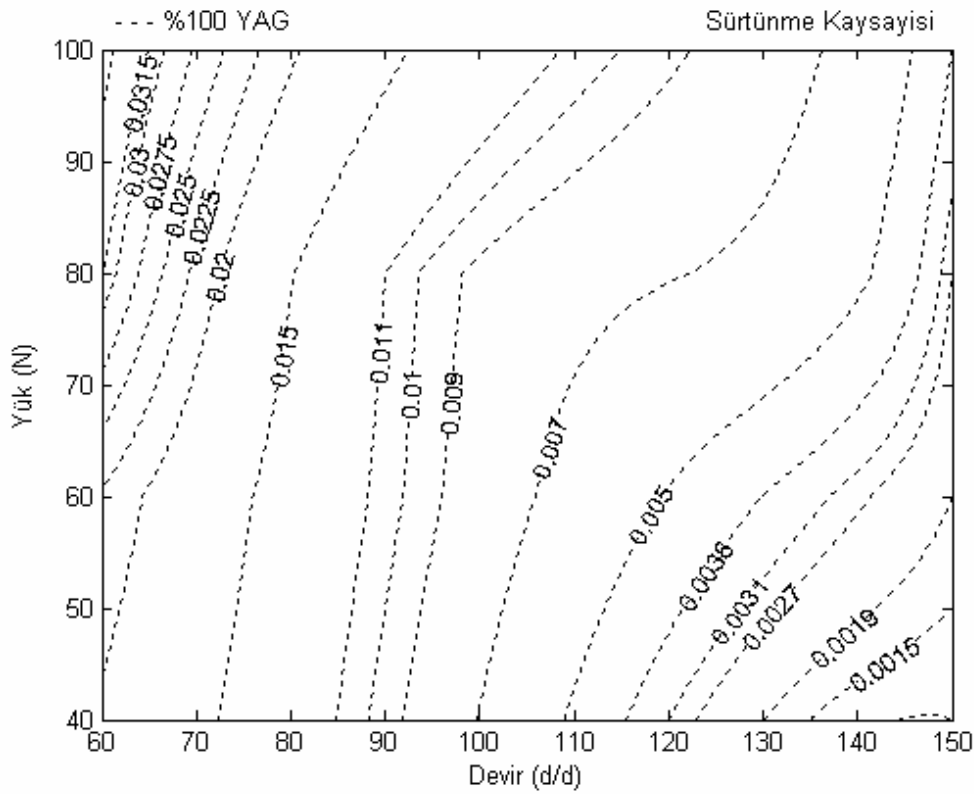
Karşılaştırma açısından deneye, dizel motorlarında kullanılan 15W40 motor yağı ile yağlama yapılarak başlanmış olup daha sonra farklı yağlayıcılarla aynı deneyler tekrar edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sürtünme deneylerinde her deney için farklı gömlek ve segman numunesi kullanılmış olup aynı şartlar altında sürtünme katsayısının belirlenmesi sağlanmıştır.



Şekil 5.1. Krank Mili Açısına Bağlı Olarak Piston Hızı Değişimi

Sürtünme, özellikle düşük devir ve yüksek yük şartları altında arttığı Şekil 5.2.'de görülmektedir. Şekil 5.2.'de %100Yağ ile yağlama yapıldığında yük devir değişimlerine göre sürtünme katsayısındaki değişim eş eğriler şeklinde verilmiştir. %100 Yağ ile yağlama yapıldığında sürtünme kuvveti, yük ve devire bağlı olarak değişmektedir. Yüksek yükler ve düşük devirlerde sınır sürtünme hakim olmakta ve sürtünme katsayısı yükselmektedir. Fakat devir artıkça ve yük azaldıkça karışık yağlamaya geçiş yapmakta olup ve sürtünme katsayısında düşmeler görülmektedir. Şekli incelediğimizde maksimum sürtünme katsayısı 60d/d' da ve 100 N yük altında 0,035 olarak ölçülmüştür. Yük azalıp devir yükseldikçe sürtünme katsayısı azalmıştır. 40N yük ve 150d/d' da sürtünme katsayısı 0,0005 olarak tespit edilmiştir.



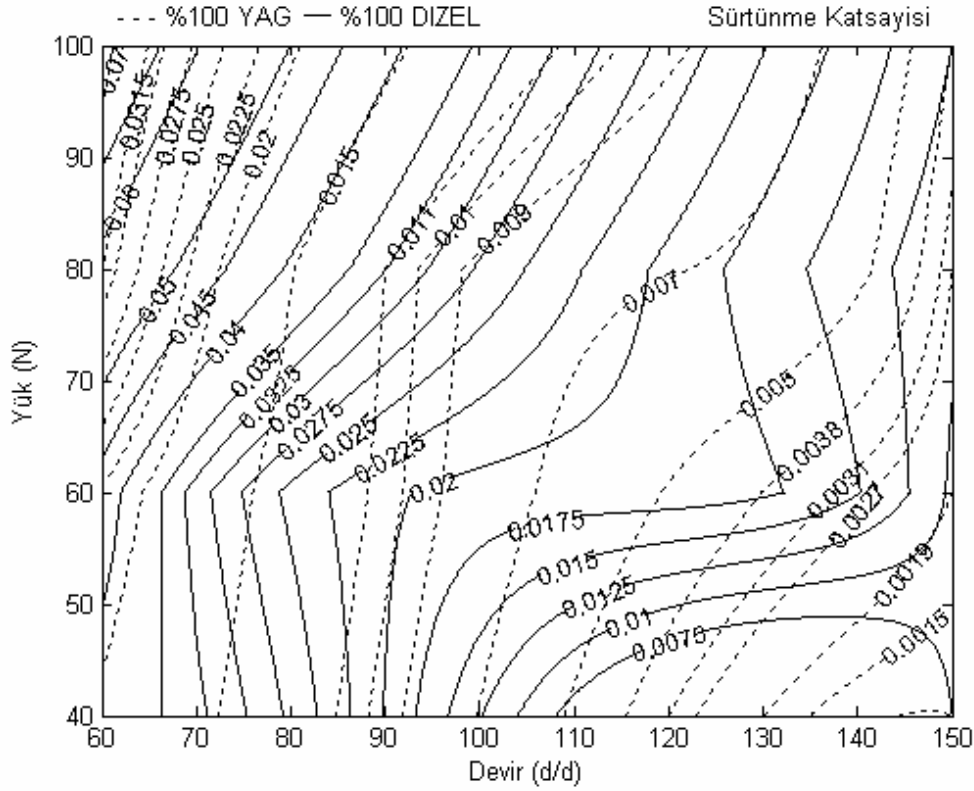


Şekil 5.2. %100Yağ'ın Devir ve Yüke Bağlı Olarak Sürtünme Katsayısı Değişimi

Yağlayıcı olarak %50Yağ + %50Dizel kullanılmasında maksimum sürtünme katsayısı 60 d/d ve 100 N' da 0,0409 olduğu, minimum sürtünme katsayısı ise 150 d/d ve 40 N' da 0,0015 olarak tespit edilmiştir.

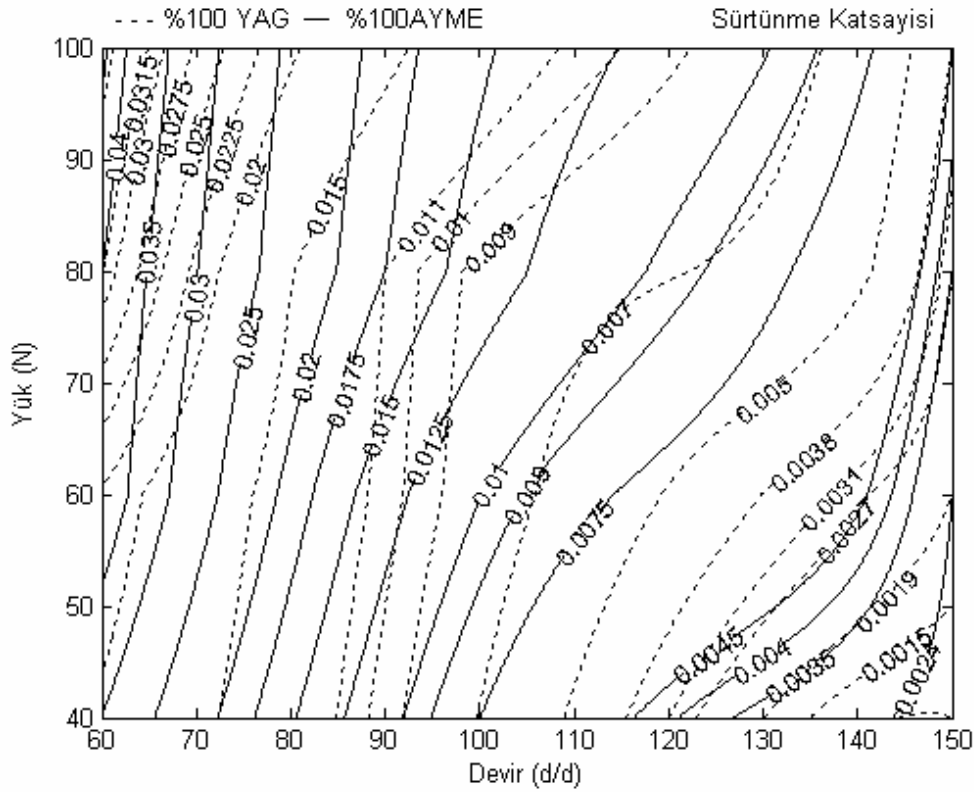
Şekil 5.3.'de %100 Yağın %50 Yağ + %50 Dizel'e göre sürtünme katsayısının karşılaştırılması görülmektedir. Şekli incelediğimizde yüksek yükler ve düşük devirlerde %50 Yağ + %50 Dizel kullanılması durumunda sürtünme katsayısı %100 Yağ'a göre 1,15 kat arttığı, fakat yükün azalıp devir artışı ile birlikte sürtünme katsayısında 3 kat artmaların olduğu görülmektedir.





Şekil 5.4. %100 Yağın %100 Dizel'e Göre Sürtünme Katsayısının Karşılaştırılması

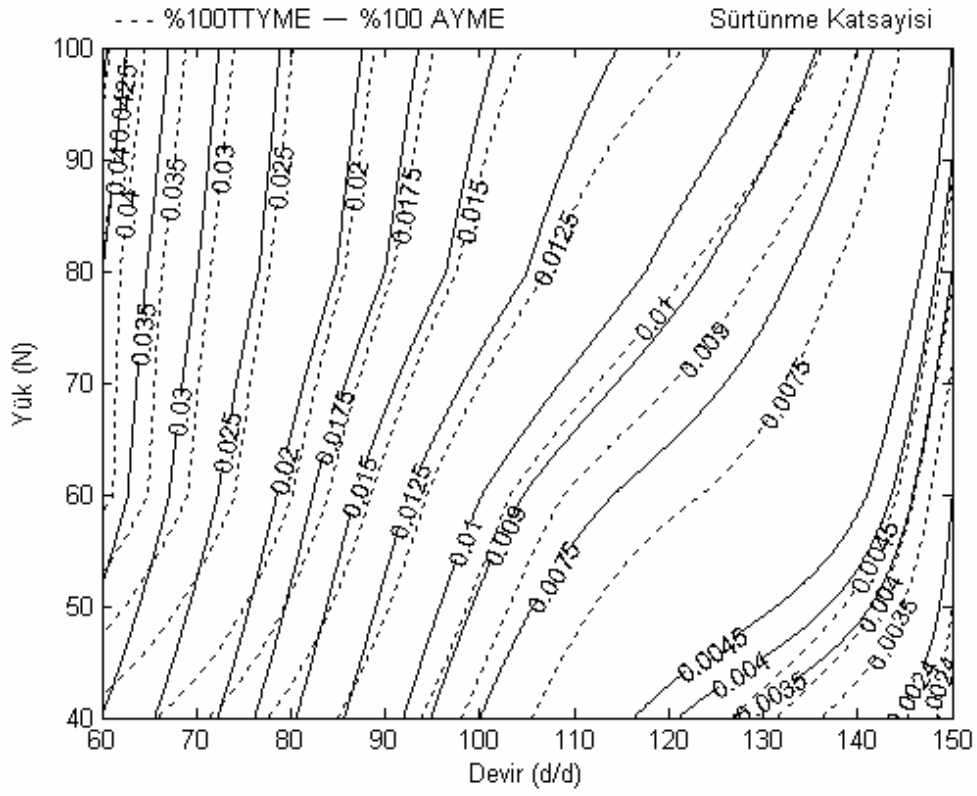
Şekil 5.5'de %100 Yağın %100 AYME'ne göre sürtünme katsayısı değişimi görülmektedir. Şekilde yağlayıcı olarak %100 AYME kullanıldığı zaman maksimum sürtünme katsayısının 100 N yük ve 60 d/d' da 0,0432 olduğu, minimum sürtünme katsayısının ise 40 N yük ve 150 d/d' da 0,0019 olduğu görülmektedir. Bu iki farklı yağlayıcı kendi aralarında karşılaştırıldığında ise %100 AYME kullanıldığı zaman, yüksek yükler ve düşük devirlerde (100N ve 60 d/d) %100 Yağ'a göre 1,25 kat artmanın olduğu, düşük devir ve yüksek yüklerde (40N ve 150 d/d) ise 3,8 kat artmanın olduğu görülmektedir.



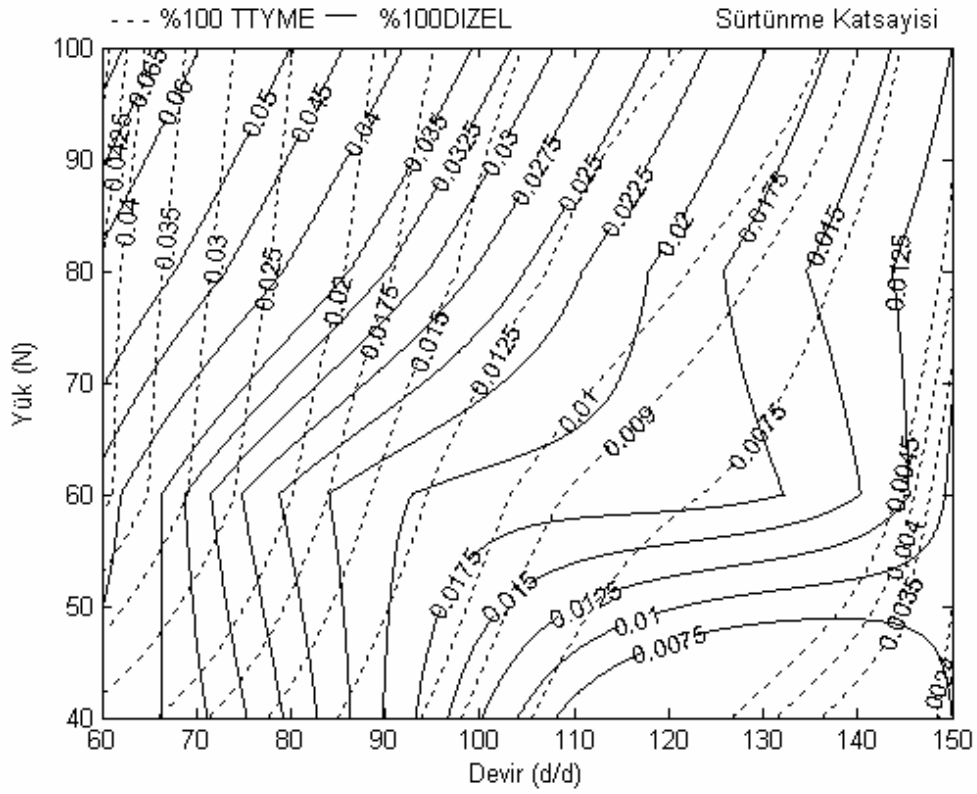
Şekil 5.5. %100 Yağ'ın %AYME'ne Göre Sürtünme Katsayısının Karşılaştırılması

Şekil 5.6.'da segman-gömlek çifti arasında yağlayıcı olarak iki farklı biyodizel kullanılması durumundaki sürtünme katsayısı değişimi görülmektedir. Şekilde iki farklı biyodizel kullanılması durumunda her yük devir şartlarında birbirine yakın değerler olduğunu fakat %100 AYME kullanılmasının %100 TTYME'ne göre daha az sürtünme katsayısının oluşturduğu görülmektedir. %100 TTYME kullanıldığında düşük devir ve yüksek yüklerde sürtünme katsayısının 0,0462 olup, yüksek devir ve düşük devirlerde ise 0,0021 olduğu görülmektedir.

Şekil 5.7.'de %100 TTYME'nin %100 Dizel'e göre karşılaştırılması görülmektedir. Şekilde %100 TTYME kullanıldığı zaman düşük devir ve yüksek yüklerde sürtünme katsayısının 1,6 azaldığı, yüksek devir ve düşük yüklerde sürtünme katsayısının 3,6 kat azaldığı görülmektedir. Motorlarda üç farklı yakıt kullanıldığı zaman biyodizellerin sürtünme katsayılarının daha düşük olduğu ve dizel yakıtına göre yağlama özelliğinin daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Bu üç farklı yakıtın dinamik viskozitesine baktığımızda aynı sıcaklık altında (75°C'de) dizelin 0,85 mPa.s, TTYME'nin 1,07 mPa.s ve AYME'nin ise 1,72 mPa.s olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.6. %100 TTYME'nin %AYME'ne Göre Sürtünme Katsayısının Karşılaştırılması



Şekil 5.7. %100 TTYME'nin %Dizel'e Göre Sürtünme Katsayısının Karşılaştırılması

## 5.2. Aşınma Deneyleri

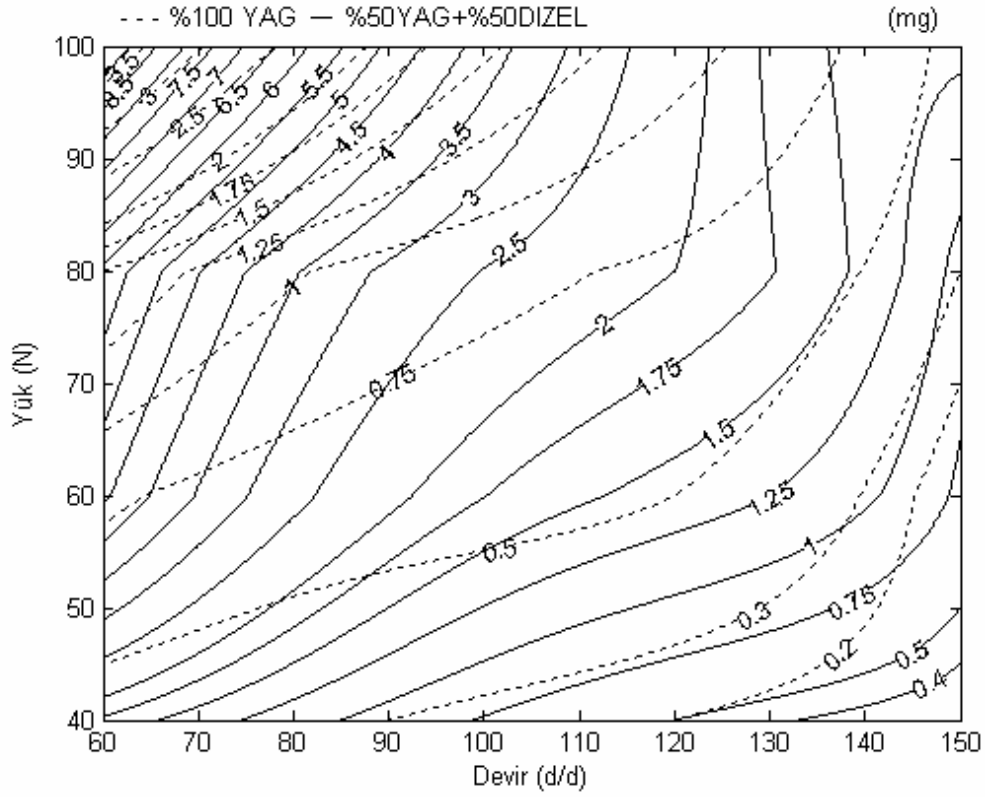
Aşınma deneyleri her bir yük ve devir şartlarında yapılması için ilk önce 5000 m yolun ne kadar zaman aralığında alacağı tespit edilmiştir. Aşınma cihazının kursu 100 mm olarak ayarlanmıştır. Çalışma devri 60 d/d'da iken 6,56 saat, diğer çalışma şartlarında ise sırasıyla 90, 120 ve 150 d/d'da 4,38, 3,28 ve 2,47 saat olarak tespit edilmiştir. Segman numunesinin gömleğe basma miktarı 20 mm olarak ayarlanmıştır.

Deneyler öncesi gömlek numunesi  $75\pm 5$  °C 'ye ısıtılmıştır. Deneylerde gömlek ve segman numunesi deneylere başlamadan önce etanol ile temizlenip her iki numuneden etanolün buharlaşması için kurutma işlemi yapıldıktan sonra hassas terazide ölçülmüştür. Numunelerin ağırlıkları tespit edildikten sonra deneylere başlanmıştır. Her deney sonrası tekrar numuneler etanol ile temizlenip kurutulduktan sonra tekrar hassas terazide ölçülmüştür. Ölçülen değerlerin farkı alınarak aşınma miktarları belirlenmiştir.

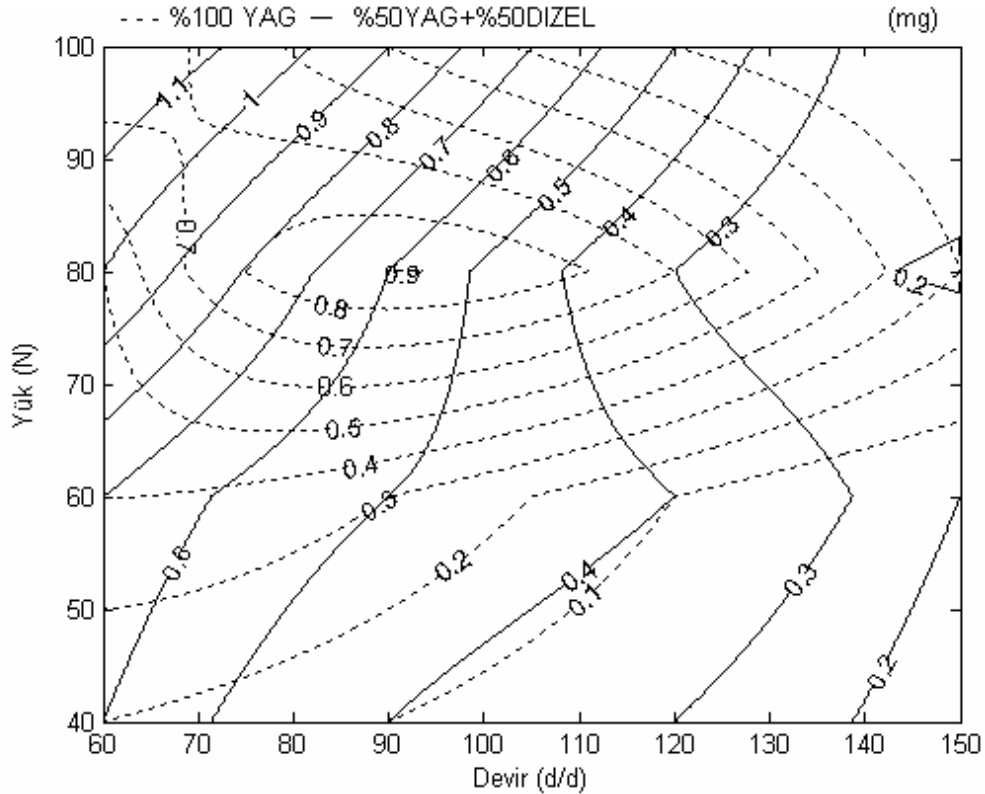
Deneylerde yağlayıcı olarak sırasıyla %100 Yağ, %50 Yağ + %50 Dizel, %100 Dizel, %100 TTYME ve %100 AYME kullanılmıştır. Yağlayıcılar saatte 0,5 ml akış oranında damlama usulü verilmiştir.

Şekil 5.8.'de %100 Yağın, %50Yağ + %50Dizele göre gömlek aşınma miktarları görülmektedir. %50Yağ + %50Dizel kullanılması durumunda %100 Yağ'a göre aşınma miktarlarında 2,5 kat artma görülmüştür. %100 Yağ kullanıldığında düşük devir ve yüksek yüklerde aşınma miktarı, yüksek devir ve düşük devirlere göre daha fazladır. 150 d/d ve 40 N'da aşınma miktarı 0,1 mg iken 60 d/d ve 100 N'da ise aşınma miktarı 3,9mg olarak tespit edilmiştir. Aynı şartlar için %50Yağ + %50Dizel kullanıldığında maksimum aşınma miktarı 9,3 mg, minimum aşınma miktarı ise 0,3 mg olarak belirlenmiştir. Şekil 5.9'da segman numunesinin aşınma miktarını incelediğimizde ise %50 Yağ + %50 Dizel kullanılması durumunda %100 Yağ'a göre düşük devir ve yüksek yüklerde aşınma miktarında 1,6 kat artma görülmüştür. %100 Yağ ile yağlama yapıldığında segman numunesinde aşınma miktarı maksimum 0,8 mg , %50Yağ + %50Dizel'de ise maksimum 1,2 mg olarak bulunmuştur.

Minimum segman aşınma miktarları ise %50 Yağ + %50 Dizel kullanımında 0,1 mg olarak ölçülmüştür.

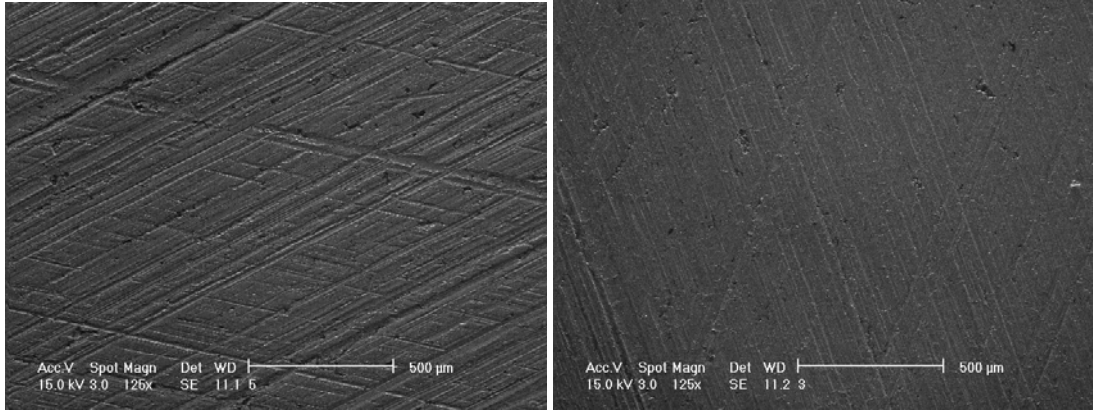


Şekil 5.8. %100 Yağın %50Yağ+%50Dizele Göre Gömlek Aşınma Miktarının Karşılaştırılması



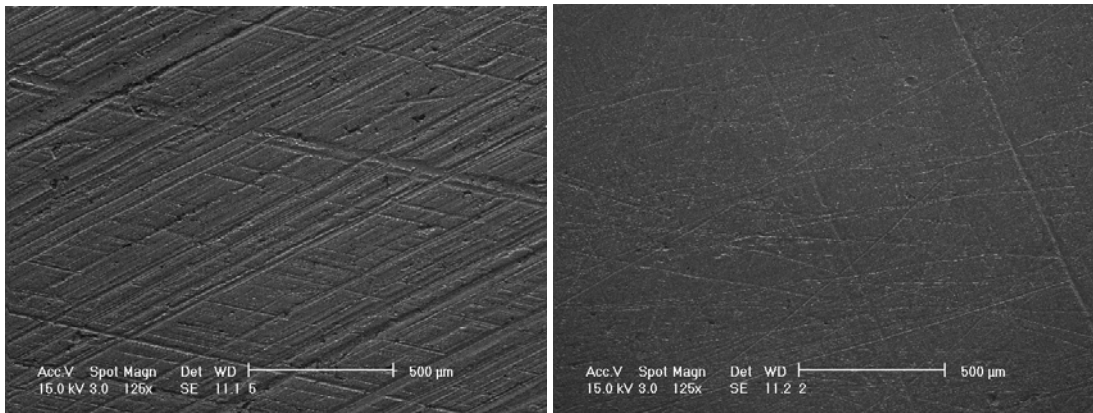
Şekil 5.9. %100 Yağın %50Yağ+%50Dizele Göre Segman Aşınma Miktarının Karşılaştırılması

Şekil 5.10'da ise gömlek numunesinin orijinal ve 5000 m yol kat ettikten sonraki SEM ile çekilmiş yüzey profilleri görülmektedir. Şekilde orijinal ve yağlayıcı olarak %100 Yağ kullanımasından sonra, SEM ile çekilen fotoğraflarda 100 N yükte ve 60d/d' da silindir gömleğinde orijinal gömleğe göre honlama çizgilerinin yer yer kaybolduğu görülmektedir.



Şekil 5.10. 100 N 60 d/d' da a) orijinal gömlek ve b) %100 yağlama durumunda SEM ile çekilmiş görünümü

Şekil 5.11'de 100N ve 60 d/d'da orijinal ve %50 Yağ + %50 Dizel ile yağlama yapıldığında gömlekte meydana gelen aşınma izleri görülmektedir. Şekle baktığımızda orijinal gömleğe göre honlama çizgilerinin hemen hemen yok olduğu ve düz bir yüzey meydana geldiği görülmektedir. %100 Yağ ile karşılaştırıldığında ise %50 Yağ + %50 Dizel ile yağlama yapıldığında honlama çizgilerinin daha fazla kaybolduğu görülmektedir.

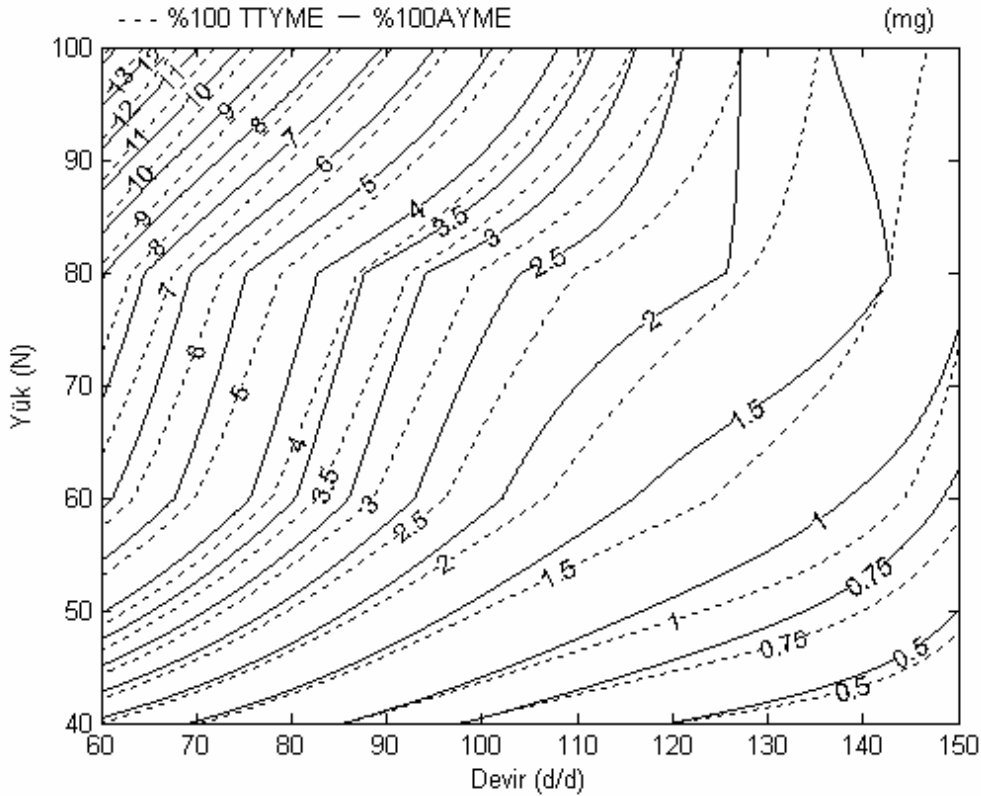


Şekil 5.11. 100 N 60 d/d' da a) orijinal gömlek ve b) %50Yağ + %50 Dizel ile yağlama durumunda SEM ile çekilmiş görünümü

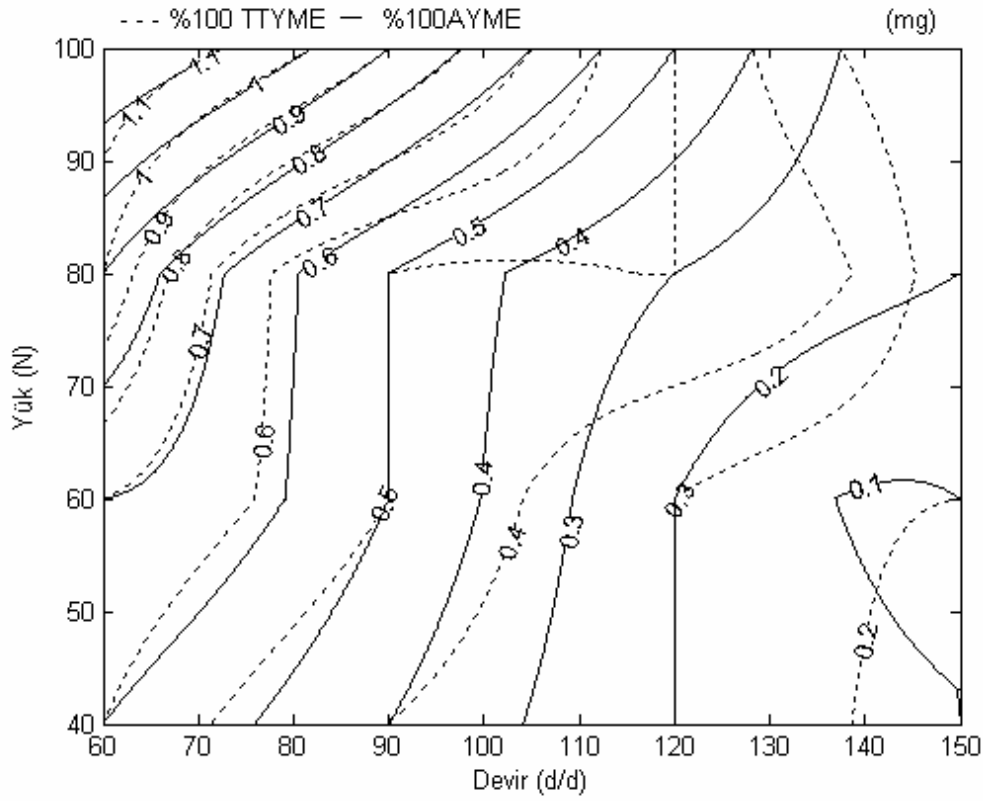


Şekil 5.12.'de %100 TTYME'nin %100AYME'ne göre gömlek aşınma miktarı karşılaştırılması görülmektedir. Sürtünme katsayısında olduğu gibi aşınma miktarlarının karşılaştırılmasında da birbirlerine göre yakın değerler vermişlerdir. %100AYME, %100 TTYME'ne göre aşınma miktarı daha düşüktür. Maksimum aşınma miktarı %100AYME kullanıldığında düşük devir ve yüksek yüklerde 13,4 mg iken, %100 TTYME kullanıldığında aynı şartlar altında bu değer 14,3 mg olarak bulunmuştur. Minimum aşınma miktarları ise her ikisi için de yüksek devir ve düşük yüklerde 0,3 mg olarak belirlenmiştir.

Segman numunesinin aşınma miktarları Şekil 5.13'de incelendiğinde her devir ve yük aralığında birbirlerine yakın değerler vermiştir. %100 AYME ve %100 TTYME kullanıldığında düşük devir ve yüksek yüklerde maksimum aşınma miktarları 1,2 mg ve minimum aşınma miktarı ise düşük yük ve yüksek devirlerde 0,1mg olarak tespit edilmiştir.

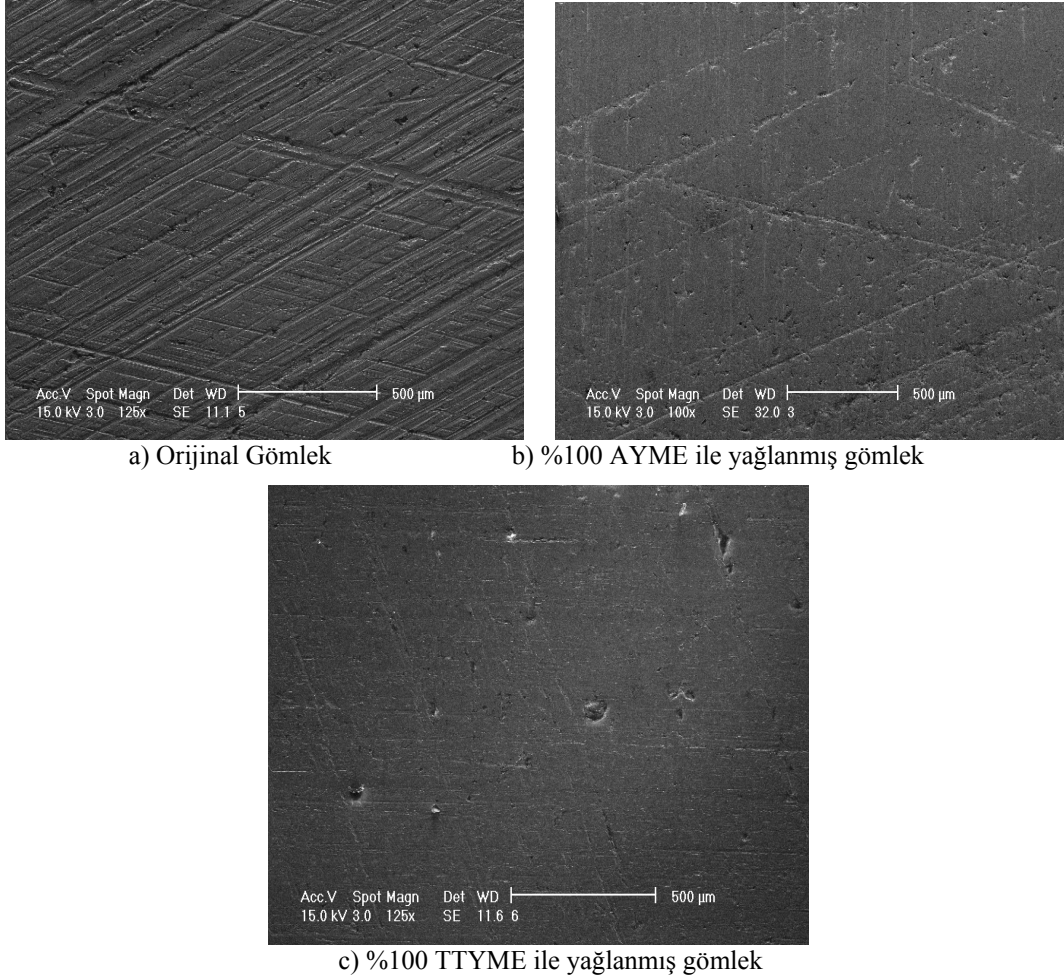


Şekil 5.12. %100 TTYME'nin %100 AYME'ne Göre Gömlek Aşınma Miktarının Karşılaştırılması



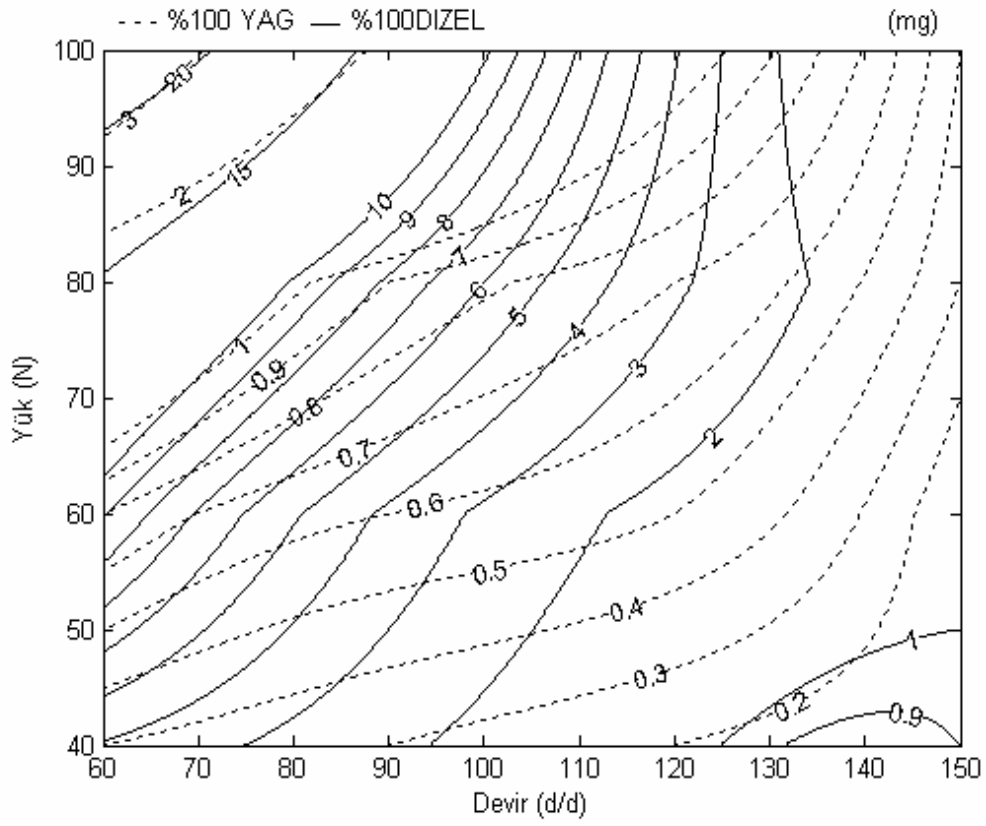
Şekil 5.13. %100 TTYME'nin %100 AYME'ne Göre Segman Aşınma Miktarının Karşılaştırılması

Şekil 5.14'de SEM ile çekilmiş fotoğraflarda, %100 AYME ile %100 TTYME'nin yağlayıcı olarak kullanılması durumunda orijinal gömleğe göre honlama çizgilerin kaybolduğu, kendi aralarında kıyaslandığında ise birbirlerine göre yakın görünüm elde edildiği görülmektedir. %100 dizel ile karşılaştırıldığında ise, %100 dizel kullanımında gömlek numunesi üzerinden yer yer kopmaların meydana geldiği ve numunenin plastik deformasyona uğradığı görülmektedir. Fakat %100 AYME ile %100 TTYME kullanıldığında numunede bu derecede yüksek kopmaların ve deformasyonların oluştuğu görülmemektedir.

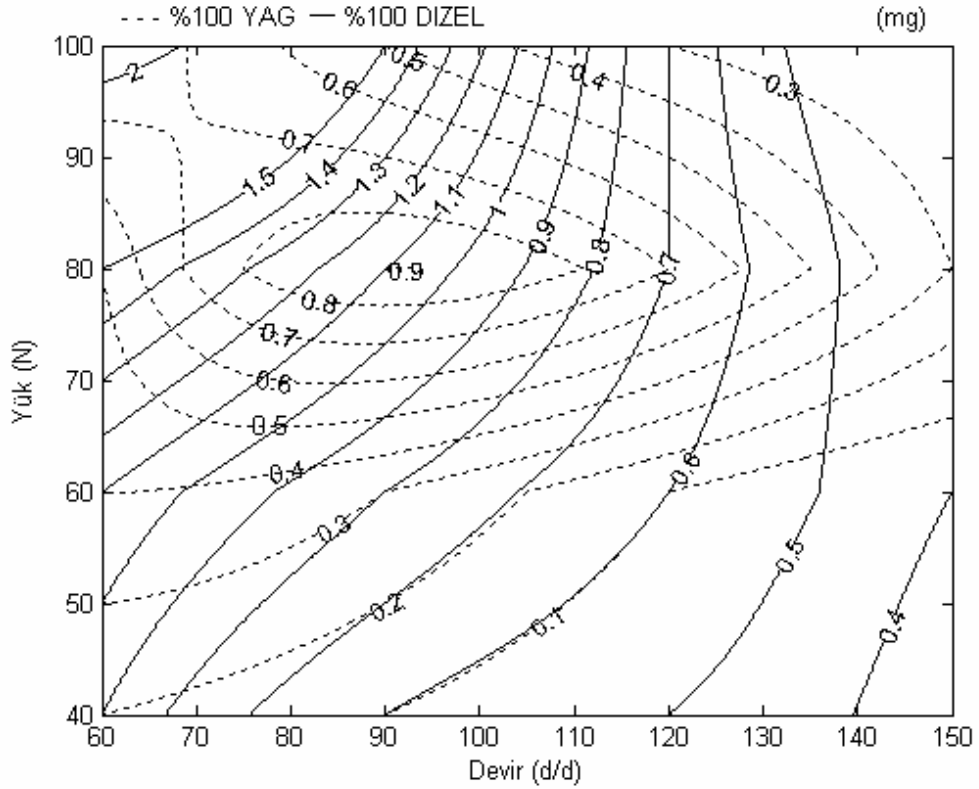


Şekil 5.14. 100 N 60 d/d' da a) orijinal gömlek, b) %100 AYME ile yağlama, c) %100 TTYME ile yağlama durumunda SEM ile çekilmiş gömlek görünümü

Yağlayıcı olarak %100 Dizel kullanılması durumunda maksimum aşınma miktarı görülmüştür. Şekil 5.15 ve 5.16'da sırasıyla gömlek ve segman numunesinin %100 Yağın %100 Dizel'e göre aşınma miktarlarının karşılaştırılması görülmektedir. %100 Dizel kullanılmasının %100 Yağ kullanılmasına göre aşınma miktarında yüksek yük ve düşük devirlerde 7 kat artma görülmektedir. Gömlek numunesinde maksimum aşınma miktarı aynı şartlar altında ( 60 d/da ve 100N yük) 22,8 mg iken ve minimum aşınma miktarı ise 150 d/d ve 40 N yük altında 0,9 mg olarak bulunmuştur. Segman numunesindeki aşınma miktarı karşılaştırıldığında ise maksimum aşınma miktarı düşük devir ve yüksek yüklerde 2,1mg, minimum aşınma miktarı ise düşük yük ve yüksek devirlerde 0,3 mg olarak tespit edilmiştir.

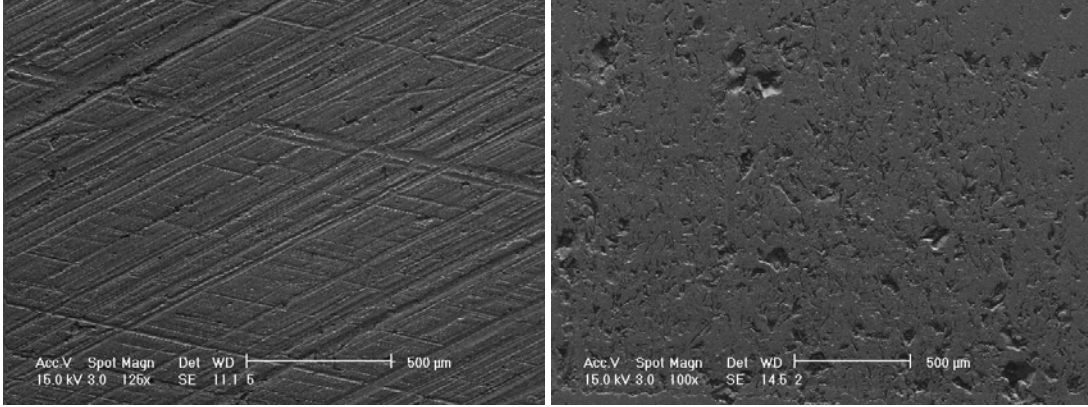


Şekil 5.15. %100 Yağın %100 Dizel'e Göre Gömlek Aşınma Miktarının Karşılaştırılması



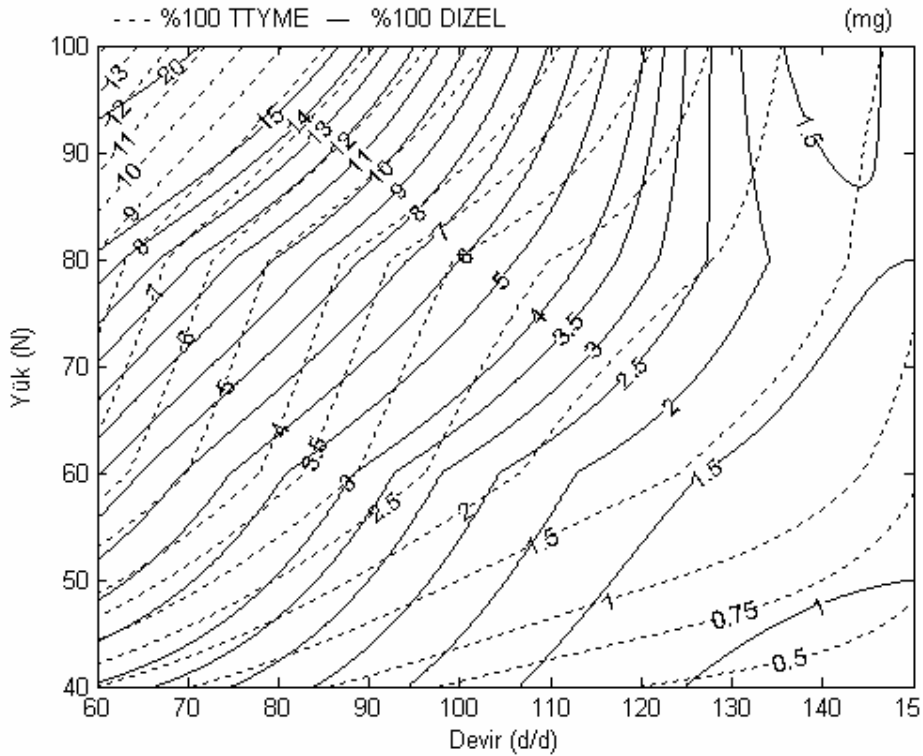
Şekil 5.16. %100 Yağın %100 Dizel'e Göre Segman Aşınma Miktarının Karşılaştırılması

Şekil 5.17’de yağlayıcı olarak %100 Dizel kullanılması durumunda, SEM ile çekilen fotoğraflarda 100 N yük ve 60 d/d’ da silindir gömleğindeki honlama çizgilerinin kaybolduğu ve yer yer derin kopmaların meydana geldiği ve gömlek numunesinin plastik deformasyona uğradığı görülmektedir.

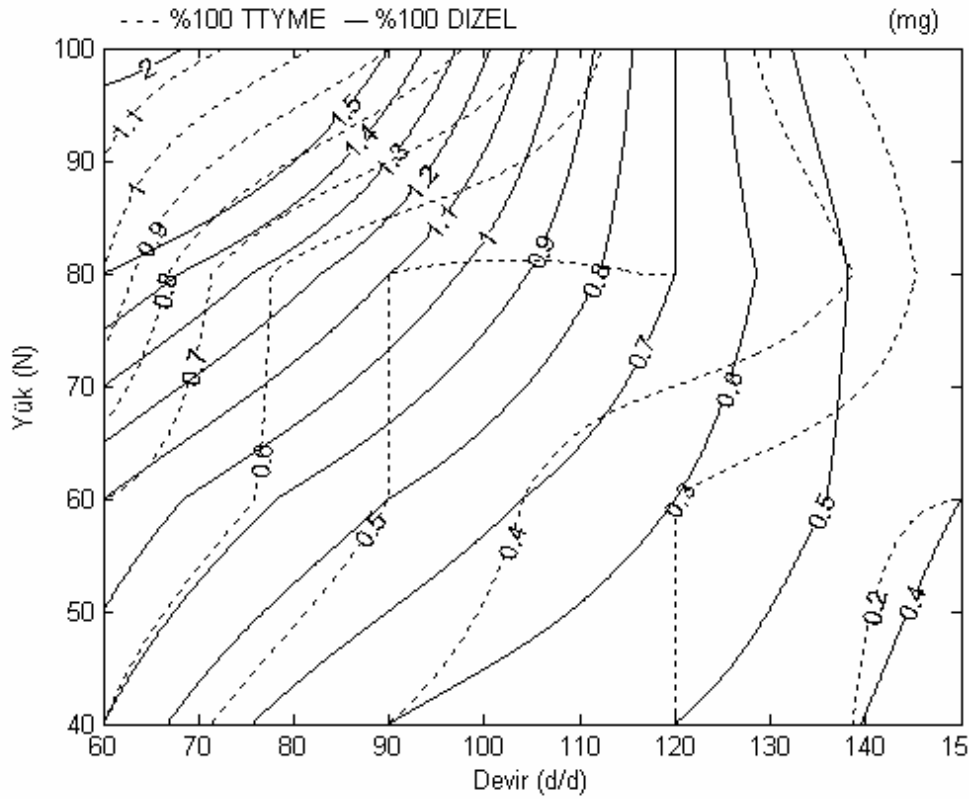


Şekil 5.17. 100 N 60 d/d’ da a) orijinal gömlek ve b) %100 Dizel ile yağlama durumunda SEM ile çekilmiş görünümü

Şekil 5.18 ve 5.19’da %100 TTYME’nin %100 Dizele göre gömlek ve segman aşınma miktarları görülmektedir. Şekilden her devir ve yük aralığında %100 Dizel yerine %100 TTYME’ni yağlayıcı olarak kullanıldığında gömlek aşınma miktarında 2 kat azalmalar görülmektedir.

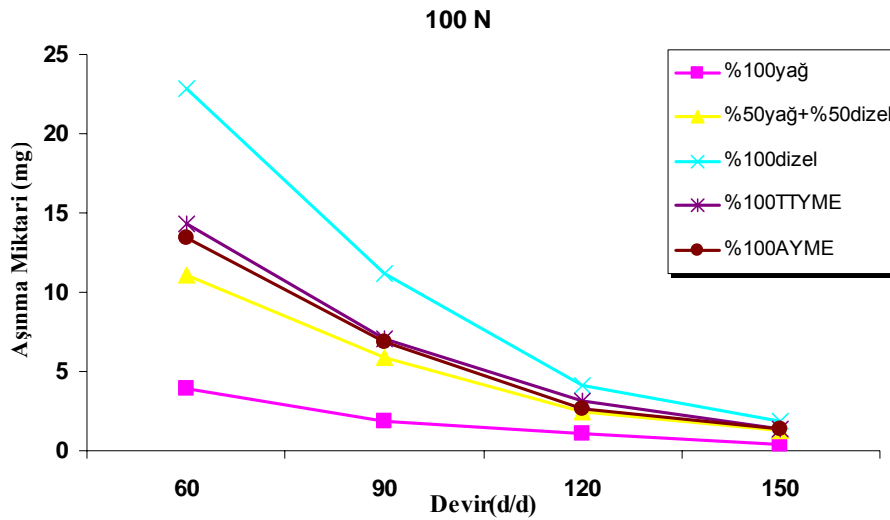


Şekil 5.18. %100 TTYME’nin %100 Dizel’e Göre Gömlek Aşınma Miktarının Karşılaştırılması

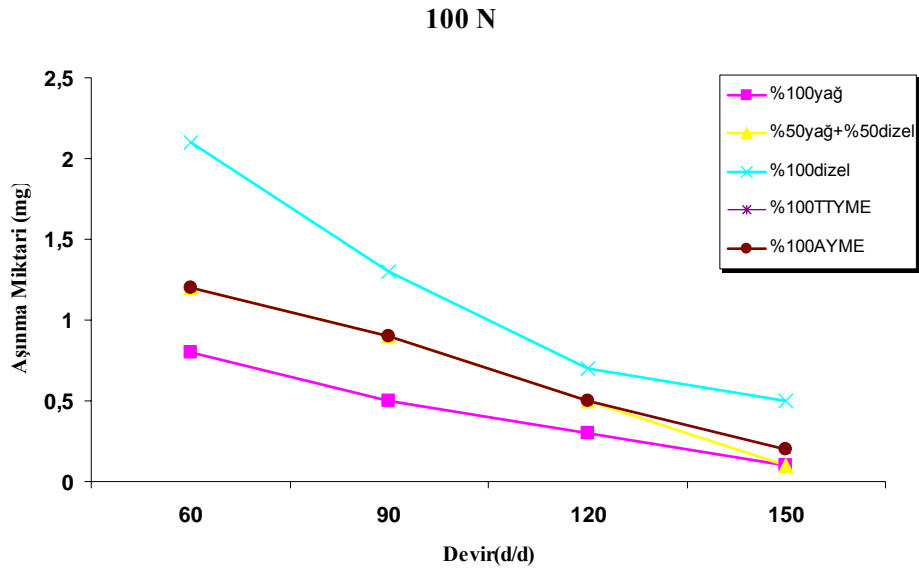


Şekil 5.19. %100 TTYME'nin %100 Dizel'e Göre Segman Aşınma Miktarının Karşılaştırılması

Şekil 5.20 ve 5.21'de farklı yağlayıcıların 100 N yük altındaki gömlek ve segman aşınma miktarının devire bağlı olarak değişimi görülmektedir. Gömlek ve segman numunesinde aşınma miktarı, devir arttıkça azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.20. 100N Yük Altında Gömlek Aşınma Miktarının Farklı Yağlayıcılara Göre Değişimi



Şekil 5.21. 100N Yük Altında Segman Aşınma Miktarının Farklı Yağlayıcılara Göre Değişimi

## BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Segman gömlek arasında oluşan sürtünme ve aşınma davranışı farklı yağlayıcılar altındaki değişimleri incelenmiştir. Deneyler, özellikle motorun ilk hareket anlarındaki düşük devirlerde maksimum sürtünme ve aşınma miktarının oluşması dikkate alınarak düşük devirlerde yapılmıştır. Segman- gömlek arasında özellikle düşük devir ve yüksek yüklerde karışık yağlama rejimi hakim olmakta ve sürtünme ve aşınma miktarının artmasına yol açmaktadır.

Dizel motorlarında kullanılan 15W40 dizel yağı (%100 Yağ) ile yağlama yapıldığında 60 d/d ve 100 N yük altında sürtünme katsayısı maksimum değerini vermiş olup 0,035 olarak tespit edilmiştir. Segman gömlek arasında karışık yağlama rejimi hakim olduğundan devir artışı ve yük azalması ile birlikte sürtünme katsayısı azalmıştır. Minimum sürtünme katsayısı ise 40N ve 150 d/d'da 0,0005'dir.

Yağlayıcı olarak %50 Yağ + %50 Dizel kullanılması durumunda % 100 Yağ'a göre 100 N ve 60 d/d'da sürtünme katsayısında 1,15 kat artma, devir artışı ve yükün azalması ile birlikte (40N ve 150 d/d'da) 3 kat artma görülmüştür. %100 Dizel kullanılması durumunda aynı şartlar altında sürtünme katsayısının yüksek yük ve düşük devirlerde ( 100N ve 60d/d ) 2,1 kat artmaların olduğunu, fakat yüksek devir ve düşük yüklerde ise ( 40N ve 150 d/d ) sürtünme katsayısının 15 kat arttığı görülmüştür. Yağlayıcı olarak %100 AYME kullanılması durumunda 100N ve 60 d/d'da ortalama 1,25 kat artma, 40N ve 150 d/d'da ise 3,8 kat artmanın olduğu tespit edilmiştir. %100 AYME'nin %100 TTYME'ne göre karşılaştırıldığında ise sürtünme katsayısı hemen hemen aynı olduğu fakat %100 AYME' de daha az sürtünme katsayısı değeri elde edilmiştir.

İki farklı biyodizel ile %100 Dizel karşılaştırıldığında sürtünme katsayısının düşük devirlerde ve yüksek yüklerde ortalama 1,6 kat, yüksek devir ve düşük yüklerde ise



3,6 kat azaldığı belirlenmiştir. Motorlarda bu üç farklı yakıt kullanıldığı zaman biyodizellerin sürtünme katsayılarının daha düşük olduğu ve dizel yakıtına göre yağlama özelliğinin daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.

Gömlek yüzey sıcaklığı 75°C 'de ve saatte 0,5 ml akış oranında yağlama yapıldığında minimum aşınma miktarı yağ ile yağlama yapıldığında görülmüştür. Sürtünme katsayısında da görüldüğü gibi maksimum aşınma miktarı %100 Dizel ile yağlama yapıldığında görülmüştür. %100 Yağ yerine yağlayıcı olarak %100 Dizel kullanılması durumunda gömlek aşınma miktarında 7 kat artma görülmüştür. Segman numunesinde ise ortalama 2,75 kat artmalar tespit edilmiştir. Fakat %50 Yağ + %50 Dizel kullanılması durumunda ise aşınma miktarı gömlek ve segman numunesinde 1,5 kat artmaktadır. İki farklı biyodizel (100 TTYME, %100 AYME) ile yağlama yapıldığında %100 yağa göre aşınma miktarında ortalama segman ve gömlek numunesinde 2 kat artmalar görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- [1] BHUSHAN.B., Ph. D., D. Sc., "Modern Tribology Handbook"
- [2] HEYWOOD, J.B., International Combustion Engine Fundamentals, McGraw Hill Book Company, New York, 1988.
- [3] PRIEST, M., TAYLOR, C.M., "Automobile engine tribology-approaching the surface" School of Mechanical Engineering. The University of Leeds, Woodhouse Lane, Leeds, LS2 9JT, UK
- [4] JARREL, D.J., BEJBL, F., Understanding Wear and Friction in Medical-Grade Stainless Steels, *Medical Device & Diagnostic Industry Magazine* MDDI Article Index, Ağustos 1999
- [5] TAYLOR, C.M., Yağlama rejimleri ve içten yanmalı motorlar, Elsevier Science Publishers, Leeds England, 1993.
- [6] TUNG, C.S., GAO, H., "Tribological characteristics and surface interaction between piston ring coating and a blend of energy-conserving oils and ethanol fuels", Chemical and Environmental Sciences Laboratory, General Motors Center, MI48090i, USA
- [7] CHO, S-W., CHOI, S-M., BAE, C-S, "Frictional modes of barrel shaped piston rings under foolded lubrication", Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, KAIST 373-1, 1 June 2000.
- [8] RYK, G., ETSION, I., "Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction" Department of Mechanical Engineering, Technion, Haifa 32000 Israel , 27/07/2005
- [9] CZICHOS, H., Tribology, Elsevier Scientific Publishing, Newyork, 1978.
- [10] TRUHAN, J.J., QU, J., BLAU, P., J., "A ring test to measure friction and wear of heavy duty diesel engine piston rings and cylinder liners using realistic lubrivants", University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA.
- [11] PRIEST, M., Taylor, C.M., Automobile engine tribology approaching the surface, *Wear* 241, 193-203, 2000.

- [12] AKALIN, Ö., “Motorlarda Kaplı Silindirlerin Tribolojik Özellikleri, İTÜ, 2003.
- [13] URAS, H.M., “A Study Of Piston-Ring Assembly Friction”, Mechanical Engineering, Doctor of Philosophy, In The University Of Michigan, 1984.
- [14] COURSE, W.H., Automotive Fuel, Lubrication and Cooling Sysstems, McGraw Hill Book Company, New York, 1967.
- [15] ANONİM, Petrol Ofisi A.Ş., Madeni Yağlar ve Petrol Ofisi Ürünleri, Ankara, 2003.
- [16] ARVUZ, V., Karasu, T., Özdamar, İ. Taşkaya, Y., “Otomobil Motorlarında Yakıt, Yağlama ve Soğutma Sistemleri”, MEB Mesleki ve Teknik Öğretim Kitapları 78, Ankara.
- [17] BİLGİNPEK, H., “Dizel motorları” MEB Basım evi, İstanbul, 1991
- [18] ANONİM, TS 4427, Endüstriyel Sıvı Yağlayıcıların Viskozite Sınıflaması, Ankara, Mart 1985.
- [19] HAMROCK, B.J., Fundamentals of Fluid Film Lubrication, McGraw Hill Book Company, New York, 1994.
- [20] CUNNINGHAM, G., An Investigation Into the Lubrication of Crankcase Scavenged Two-stroke cycle engines. Engineering Mechanical Science, pp 117, 1996.
- [21] GAUTAM, M., Chitoor, K., Durbha, M., Summers, J.C., Effect of diesel soot contaminated oil on engine wear-investigation of novel oil formulations, Tribology International 32 (1999) 687699, 1999.
- [22] COY, R.C., Practical applications of lubrication models in engines, Tribology International Vol. 31, No. 10, pp. 563571, 1998.
- [23] FUKUI, M., Sato, T., Fujita, N., Kitano, M., Examination of lubricant oil components a.ecting the formation of combustion chamber deposit in a two-stroke engine, JSAE Review 22 281285, 2001.
- [24] ALTIN, R., “Bitkisel Yağların Dizel Motorlarında Yakıt Olarak Kullanılmasının Deneysel Olarak İncelenmesi “, Doktora Tezi, Gazi, Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1998.
- [25] SHELL Resarch Limited , Symposium on Wear in the Gasoline Engine, 1970.
- [26] ANNUAL Book of ASTM Standarts, Volume18.

- [27] BOWDEN F.P. and Tabor D., The friction and Lubrication of Solids, Claredon Pres, Oxferd, 1950.
- [28] UZUNER, H., Polimerlerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,1; 2001
- [29] SOYDAN Y.,Ulukan L.,Triboloji Sürtünme-Aşınma-Yağlama Bilimi ve Teknolojisi, Sakarya Üniversitesi İstanbul Üniversitesi 2003.
- [30] WULPI D.J., Understanding How Components, ASM Metals Park, Ohio 44073, USA, s 163-204, 1985.
- [31] EYRE, T.S., Wear Diagnosis, They and Application, Brunel University, England, 1980.
- [32] EYRE, T.S., Wear Charactersitics of Metals, Tribology International, England, 1976.
- [33] SCHILLING, A., Automobile Engine Lubrication – Engine Wear, Scientific Publications, England, 1972.
- [34] KÖKDEN, M.U.,”GGG 50 ve GGG 80 sınıf küresel grafitli dökme demirlerin abrasive aşınma davranışlarına östemperleme işleminin etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 92-121,1998.
- [35] MÜJDECİ, S., “İçten Yanmalı Motorlarda Meydana Gelen Aşınma Mekanizmaları ve Örnek Motorlardaki Piston, Segman ve Silindir Yüzeylerinde Oluşan Aşınmaların Mikroskobik Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003
- [36] WIT E.de, Blanpain B., froyen L. Celis F.P., “The Tribochemical Behaviour of TiN-Coatings During Fretting Wear” , Wear 217s (215-224), 1998.
- [37] EYRE, T.S, Dutta K. K. ve Davis, F.A., Characterization and simulation of wear occuring in the cylinder bore of the internal combustion engine. Tribology International, England, 1990.
- [38] BHUSMAN, B., Gupta , B.K., “Handbook of Tribology”, Mc Graw Hill Inc., s. (15.1-15.71,9.1-9.60), 1991.
- [39] KALELİ, H., Motorların Değişik İşletme Şartlarında, Yağların Yapısal Değişimlerinin Aşınmalarına Etkilerin İncelenmesi ve Optimum Yağ Değiştirme Süreçlerinin Araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul, 1995.
- [40] ŞEN, U.,” Küresel Grafitli dökme demirlerin borlanması ve özellikleri”, Doktora Tezi. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul12–25, 1997.

- [41] SARIKAYA, Ö., Aşınmaya Karşı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri,1-60;2007
- [42] TAYLOR, C.M., Automobile engine tribologydesign considerations for efficiency and durability, Wear 221, 18, 1998.
- [43] ASLAN, A., "Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 42-54,2002.
- [44] NEALE, M., 9-59K Deltic Donanma Motorlarındaki (Gemi Dizeli) Piston Aşınmaları Sebeplerinin Araştırılması, Michael N. Associates, Surry, England,1981.
- [45] [www.shell.com](http://www.shell.com), 2008.
- [46] HAŞİMOĞLU, C., "Düşük Isı Kayıplı Bir Dizel Motorunda Biyodizel Kullanılmasının Performans ve Emisyon Parametrelerine Etkisi", Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2005.

## ÖZGEÇMİŞ

İdris CESUR, 02.07.1982 de Yozgat' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Adapazarı'nda tamamladı. 2000 yılında Sakarya Fatih Teknik Lisesi, Motor Bölümünden mezun oldu. 2001 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Otomotiv Öğretmenliğini 2005 yılında bitirdi. 2005 yılında Sakarya Üniversitesi, Makina Eğitimi Bölümüne araştırma görevlisi olarak girdi. Halen Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.