

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DENİZ TAŞITLARINDA KULLANILAN FARKLI YAĞLARIN SEGMAN-SİLİNDİR
ÇİFTİ YÜZEYLERİNDEKİ TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİ EDEN
PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

ZAFER AYDIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. ADNAN PARLAK
EŞ DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. ÖMER SAVAŞ

İSTANBUL, 2015

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DENİZ TAŞITLARINDA KULLANILAN FARKLI YAĞLARIN SEGMAN-SİLİNDİR
ÇİFTİ YÜZEYLERİNDEKİ TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİ EDEN
PARAMETRELERİN İNCELENMESİ**

Zafer AYDIN tarafından hazırlanan tez çalışması 12.01.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Adnan PARLAK
Yıldız Teknik Üniversitesi

Eş Danışman

Yrd. Doç. Dr. Ömer SAVAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Adnan PARLAK
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cengiz DENİZ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÇAKIR
Yıldız Teknik Üniversitesi



Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün 2013-10-02-KAP02 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Deniz taşıtlarında kullanılan farklı yağların segman-silindir çifti yüzeylerindeki tribolojik özelliklerine etki eden parametrelerin deneysel olarak incelendiği bu yüksek lisans tez çalışmamda değerli bilgi, belge ve tecrübelerini benden esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Adnan PARLAK' a teşekkürlerimi sunarım.

Samimiyeti ve heyecanı ile beni telkin eden, yönlendiren, Taguchi tasarımı konusunda yardımlarını esirgemeyen, eş danışmanım ve 2013-10-02-KAP02 numaralı BAPK proje yürütücüm Yrd. Doç. Dr. Ömer SAVAŞ' a teşekkürlerimi sunarım.

Akademik hayatımın daha ilk günlerinden beri, her soruma ve sorunuma cevap veren, bir adım arkasından gitmekten her zaman gurur duyacağım Arş. Gör. Görkem KÖKKÜLÜNK' e ve deneyler esnasında yanımda olan, tez yazımında fikirlerini sunan değerli dostum Arş. Gör. Hüseyin ELÇİÇEK' e ayrıca teşekkür ederim.

Deneylerin yapılabilmesi için oluşturulacak deney düzeneğinin tasarımı ve imalatı esnasında her türlü isteğime cevap veren, benimle beraber canla başla koşturan "SÜLEYMANOĞLU MAKİNE" işyeri sahibi Yahya Kemal AYDIN' a ve Elektrik donanımının hazırlanmasında emeği geçen Tekniker Enver GÖKDEMİR' e teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim öğretim hayatımın ilk günlerinden bu yana heyecanlarından hiç bir şey eksilmeyen, her başarıma benimle beraber sevinen, başarısızlığımda benimle dertlenen, başta sevgili babam Kaptan Sami AYDIN' a, annem Saadet AYDIN' a her türlü desteklerinden dolayı minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Son olarak da; hayatıma renk katan, hayat arkadaşım, yoldaşım ve gelecekte birçok başarıyı beraber karşılayacağım, başarısızlıklarda sığınağım olacak, dert ortağım, sevgili eşim Meral AYDIN' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ocak, 2015

Zafer AYDIN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	4
1.2 Tezin Amacı	15
1.3 Hipotez	15
BÖLÜM 2	
TRİBOLOJİNİN ESASLARI VE İÇTEN YANMALI MOTORLARDA TRİBOLOJİ.....	16
2.1 Sürtünme.....	18
2.1.1 Sürtünmenin esasları.....	18
2.1.2 Sürtünme türleri	22
2.1.2.1 Kuru sürtünme	22
2.1.2.2 Sınır sürtünme	23
2.1.2.3 Yarı sıvı sürtünme (Karışık sürtünme)	23
2.1.2.4 Sıvı sürtünme (Hidrodinamik sürtünme).....	23
2.1.3 İçten yanmalı motorlarda sürtünme.....	24
2.1.3.1 İçten yanmalı motorlarda sürtünme ölçüm yöntemleri	25
2.2 Aşınma.....	28
2.2.1 Aşınmanın esasları.....	28
2.2.2 Aşınma türleri	29
2.2.2.1 Adezif aşınma	29

2.2.2.2	Abrazif aşınma	31
2.2.2.3	Korozif aşınma	32
2.2.2.4	Yorulma aşınması	32
2.2.3	İçten yanmalı motorlarda aşınma	33
2.2.4	Aşınma ölçüm yöntemleri	34
2.2.4.1	Ağırlık farkı yoluyla ölçme	34
2.2.4.2	Kalınlık ölçme yöntemi	35
2.2.4.3	İz değişiminin ölçülmesi yöntemi	35
2.2.4.4	Radyoizotoplarla ölçme yöntemi	35
BÖLÜM 3		
MATERYAL VE METOT		36
3.1	Yağlayıcılar ve yakıtlar.....	36
3.2	Deney düzeneği.....	37
3.3	Sürtünme katsayılarının belirlenmesi	40
3.4	Aşınma kayıplarının ölçülmesi.....	42
3.5	Deney tasarımı ve Taguchi metodu	44
3.5.1	Ortogonal diziler	45
3.5.2	Sinyal / gürültü oranı	46
3.5.3	Taguchi metodunda etkileşimlerin incelenmesi.....	47
3.5.4	Varyans analizi.....	47
3.5.4.1	Kareler toplamı (Varyasyon).....	47
3.5.4.2	Serbestlik derecesi	48
3.5.4.3	Varyans	48
3.5.4.4	F testi	49
3.5.4.5	Faktörlerin toplam değişime etkilerinin yüzdesi	50
3.5.4.6	Doğrulama deneyleri	50
3.6	DeneySEL parametreler ve deney planı	50
BÖLÜM 4		
DENEYSEL SONUÇLAR		53
4.1	Aşınma kaybı sonuçları.....	53
4.2	Sürtünme katsayısı sonuçları	63
4.3	Anlık sürtünme katsayısı sonuçları	73
BÖLÜM 5		
SONUÇ VE ÖNERİLER.....		74
KAYNAKLAR.....		76
ÖZGEÇMİŞ.....		82

SİMGE LİSTESİ

f_k	Sürtünme kuvveti
f_n	Net kuvvet
F_A	A faktörüne ait F test değeri
μ_s	Statik sürtünme katsayısı
μ_k	Kinetik Sürtünme Katsayısı
P	Silindir içi maksimum basıncı
V	Silindir hacmi
n	Motor devri
i	Her bir çevrim için devir sayısı
z	Silindir sayısı
$^{\circ}C$	Derece Celcius
k	Parametre seviyesi
N	Toplam deney sayısı
S^2	Gözlem değerinin varyansı
SS	Kareler toplamı
SS_A	A faktörüne ait kareler toplamı
SS_B	B faktörüne ait kareler toplamı
SS_{AxB}	A ve B etkileşimine ait kareler toplamı
SS_e	Hata kareler toplamı
SS_T	Toplam kareler toplamı
SS_{ep}	Pooling varyasyonu
V_{ep}	Pooling varyansı
V_e	Hata varyans değeri
v_A	A faktörünün serbestlik derecesi
v_B	B faktörünün serbestlik derecesi
v_{AxB}	AxB etkileşimine ait serbestlik derecesi
v_e	Hatanın serbestlik derecesi
v_T	Toplam serbestlik derecesi
y_i	i. gözlem değeri

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ASTM	American Society for Testing and Material
ANOVA	Varyans Analizi
BMEP	Fren ortalama efektif basınç
BP	Fren gücü
cSt	CentiStoke
DM	Alman Markı
DOP	Yüzey üzerinde hareketli disk
EDS	Enerji Dağılım Spektroskopi
FMEP	Sürtünme ortalama efektif basınç
GSMH	Gayri Safi Milli Hâsıla
IFO	Intermediate Fuel Oil
IMEP	İndike ortalama efektif basıncı
ISO	International Organization for Standardization
LO	Lubricating Oil
MDO	Marine Diesel Oil
pC	Picocoulomb
POD	Disk üzerinde hareketli pin
PVD	Fiziksel buhar biriktirme
SAE	Otomotiv Mühendisleri Birliği
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SFC	Özgül yakıt tüketimi
S/N	Sinyal/Gürültü oranı
TAN	Toplam asit sayısı
TBN	Toplam baz sayısı

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Makinede meydana gelen sürtünme kayıpları	2
Şekil 1.2 İçten yanmalı makinelerde yakıtla giren enerjinin dağılımı	3
Şekil 1.3 İçten yanmalı makinelerde mekanik kayıpların oranları	4
Şekil 2.1 Tribolojik Sistem	16
Şekil 2.3 Tribolojinin diğer bilimlerle olan ilişkisi.....	17
Şekil 2.3 Tribolojik sistem ve unsurları.....	18
Şekil 2.4 İtme veya çekme ile cisimde, sürtünme kuvvetinin şematik gösterimi	19
Şekil 2.5 Statik sürtünme ve Kinetik sürtünme	21
Şekil 2.6 Kuru sürtünme mekanizması	22
Şekil 2.7 Sınır sürtünme mekanizması	23
Şekil 2.8 Yarı sıvı sürtünme mekanizması	23
Şekil 2.9 Sıvı sürtünme mekanizması.....	23
Şekil 2.10 Belli parçaların çıkarılmasıyla sürtünmeye olan etki.....	27
Şekil 2.11 Willians çizgi metodu.	28
Şekil 2.12 Adezif aşınma.....	30
Şekil 2.13 Adezif aşınma testleri.	30
Şekil 2.14 Abrazif aşınma	31
Şekil 2.15 Kauçuk tekerlekle abrazif aşınma testi.....	31
Şekil 2.16 Korozif aşınma	32
Şekil 2.17 Yorulma aşınması.....	33
Şekil 3.1 Lineer hareketli aşınma cihazı katı modeli ve imal edilmiş hali	38
Şekil 3.2 Aşınma cihazı detaylı katı modeli	38
Şekil 3.3 Cihazın imal edilmiş detaylı görünüm.....	39
Şekil 3.4 Eurotherm sıcaklık kontrol ünitesi.....	39
Şekil 3.5 ABB ACS150 İnverter	40
Şekil 3.6 Üç eksenli kuvvet sensörü	40
Şekil 3.7 Kistler 9027C Üç eksenli kuvvet sensörü ve montajı	41
Şekil 3.8 Şarj amplifikatörü	41
Şekil 3.9 Kistler ManuWare yazılımı.....	42
Şekil 3.10 Hassas Terazî.....	42
Şekil 3.11 Ultrasonik Banyo.....	43
Şekil 3.12 Vakumlu Fırın	43
Şekil 3.13 Desikatör.....	44
Şekil 4.1 Ağırlık kayıpları için parametrelerin grafiksel görünümü	55

Şekil 4.2 Optimum deney şartlarına göre farkı yağlayıcı ortamında yapılan ilave deney sonuçları ve tahmini değerleri	57
Şekil 4.3 %100 Yağ kullanımında sıcaklığa bağlı aşınma kayıpları.....	58
Şekil 4.4 %50 Yağ + %50 Dizel Oil kullanımında sıcaklığa bağlı aşınma kayıpları.....	59
Şekil 4.5 %50 Yağ + %50 Fuel Oil kullanımında sıcaklığa bağlı aşınma kayıpları.....	60
Şekil 4.6 %100 Dizel Oil kullanımında sıcaklığa bağlı aşınma kayıpları.....	61
Şekil 4.7 150 °C’de farklı yağlayıcılar için aşınma kayıpları.....	62
Şekil 4.8 Sürtünme katsayıları için parametrelerin grafiksel görünümü	65
Şekil 4.9 Sürtünme katsayıları için optimum deney şartlarına göre farkı yağlayıcı ortamında yapılan ilave deney sonuçları ve tahmini değerleri	66
Şekil 4.10 %100 Yağ kullanımında sıcaklık değişimine göre sürtünme katsayıları	67
Şekil 4.11 %50 Yağ + % 50 Dizel Oil kullanımında sıcaklığa bağlı sürtünme katsayıları..	68
Şekil 4.12 %100 Yağ + %50 Fuel Oil kullanımında sıcaklığa bağlı sürtünme katsayıları..	69
Şekil 4.13 %100 Dizel Oil kullanımında sıcaklığa bağlı sürtünme katsayıları.....	70
Şekil 4.14 150 °C’de farklı yağlayıcılar için sürtünme katsayıları	71
Şekil 4.15 Taguchi reçetelerine göre Deney 2 ve Deney 10’un bir çevrim boyunca anlık sürtünme katsayısı grafikleri	72
Şekil 4.16 Taguchi reçetelerine göre Deney 6 ve Deney 14’ün bir çevrim boyunca anlık sürtünme katsayısı	72
Şekil 4.17 Orta ve Yüksek devirli motorlarda krank açısına bağlı pistonun rölatif hızı.....	73

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Yaklaşık Sürtünme Katsayıları.....	22
Çizelge 3.1 Silindir yağlama yağı özellikleri.....	36
Çizelge 3.2 Marine Diesel Oil özellikleri.....	37
Çizelge 3.3 Intermediate Fuel Oil özellikleri.....	37
Çizelge 3.4 Kayıp fonksiyonu tipleri.....	45
Çizelge 3.5 Ortogonal dizilerden L ₄ ve L ₉	45
Çizelge 3.6 Parametreler ve seviyeleri.....	51
Çizelge 3.7 Deneylerde L16 ortogonal dizisi.....	51
Çizelge 3.8 Deney planı.....	52
Çizelge 4.1 Ortalama ağırlık kaybı miktarı.....	53
Çizelge 4.2 Ağırlık kayıpları için Varyans Analizi sonuçları.....	54
Çizelge 4.3 Ağırlık kayıpları için doğrulama deneyi sonuçları ve tahmini güven aralığı..	56
Çizelge 4.4 Deneyler sonrasında elde edilen ortalama sürtünme katsayıları.....	63
Çizelge 4.5 Sürtünme katsayısı için Varyans Analizi sonuçları.....	64
Çizelge 4.6 Sürtünme katsayıları için doğrulama deneyi sonuçları ve tahmini güven aralığı.....	65

**DENİZ TAŞITLARINDA KULLANILAN FARKLI YAĞLARIN SEGMAN-SİLİNDİR
ÇİFTİ YÜZEYLERİNDEKİ TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİ EDEN
PARAMETRELERİN İNCELENMESİ**

Zafer AYDIN

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Adnan PARLAK

Eş Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ömer SAVAŞ

Makinelerin işletilmesi esnasında, temas halinde olan tüm parçaları arasında sürtünme kayıpları ve aşınmaların oluşması kaçınılmazdır. Sürtünerek aşınma ile deforme olan bu parçaların mukavemetleri azalmakta, sonucunda da kopma ve kırılma gibi istenilmeyen durumlar ortaya çıkmaktadır. Çalışan makine parçaları arasında doğabilecek bu aşınmaları minimize edebilmek için temas halinde olan parçaların seçimine ve içinde buldukları çalışma koşullarının uygunluğuna dikkat edilmelidir. Bu nedenle makine parçalarında oluşacak aşınmaları önlemek ve sürtünme kayıplarını minimize etmek için yağlama sistemlerine gereksinim duyulmaktadır.

Temas halinde çalışan tüm sistemlerde olduğu gibi içten yanmalı motorlarda da üretilen gücün bir kısmı sürtünme kayıplarına harcanmakta, bu da doğrudan motor performansını ve yakıt ekonomisini olumsuz yönde etkilemektedir. Motor silindirleri içerisinde yakıtın yakılması sonucu elde edilen ısı, segman grupları aracılığı ile silindir gömleğine iletilir. Ortaya çıkan bu yüksek ısı aşınma kayıplarının artmasına neden olur. Yanma sonucu ortaya çıkan ısının silindir gömleğine iletimiyle yağlama yağında buharlaşma ve oksidasyon oluşur. Tüm bunların yanında; silindir içine alınan havanın

sıkıştırılması ile ortaya çıkan su buharı, asit etkisi olan yanma ürünleri, karbon birikintileri ve yanma artıkları segman-silindir gömleği çiftinin aşınmasının da nedenlerindedir.

Motorlarda kullanılan yakıt, yanma sonucu oluşan bileşenler, yanma artıkları, karbon birikintileri ve aşınmalardan ortaya çıkan parçacıkların yağlama yağına karışması sonucunda yağlama yağında bozulmalara neden olur. Bu da sonuçta büyük boyutlu sürtünme kayıplarına sebep olacağından motorun güç ve performansını düşürmektedir.

Bu çalışmada içten yanmalı bir motorun piston-silindir donanımına uygun olarak, segman-silindir gömleği çifti arasında oluşabilecek sürtünme kayıplarını ve aşınma mekanizmalarının araştırılmıştır. Çalışmada içten yanmalı motor sistemine benzer bir aşınma cihazı temin edilerek farklı türlerdeki deniz yağlarının ve yağ-yakıt karışımlarının sürtünmeye ve aşınmaya olan etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Aşınma test cihazında her bir yağlayıcı için; farklı devir, sıcaklık ve yük değişimlerinin etkileri araştırılmıştır. Sürtünme katsayılarının ve aşınma oranlarının düşük devirlerde artmasından dolayı testler 60-150 d/d aralığında gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: İçten yanmalı motor, Aşınma, Sürtünme, Segman, Silindir Gömleği.

**INVESTIGATION OF PARAMETERS AFFECTING TRIBOLOGICAL BEHAVIOR
OF DIFFERENT MARINE LUBRICANTS ON THE CYLINDER LINER-PISTON
RING PAIRS**

Zafer AYDIN

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Adnan PARLAK

Co-Advisor: Asst. Prof. Dr. Ömer SAVAŞ

It is obviously that there have been occurred friction and wear between mechanical parts being in touch during engine operating. Strength of materials of components becoming deformed with friction and wear has reduced and undesirable situation such as fracturing and breaking has been occurred. It is important choosing materials and also operating conditions to minimize wearing effect. For this reason, appropriate lubricant and lubricating system should be used to minimize the wearing of the moving parts of engine.

Some percentage of the total power has been decreased with friction loss in an internal combustion engine and as a result of this decrease, engine performance and fuel consumption have been negatively affected. Consequential high heat of combustion has been resulted in increasing wearing loss. The conducting heat to cylinder liner from combustion of fuel has been vaporized and oxidized the lubricating oil. Besides, water vapor appearing at the end of compression stroke, acidic combustion products, carbon deposits and combustion residue have been affected the

piston ring-cylinder liner wear. Lubricating oil has disintegrated as a consequence of mixing with fuel, combustion residues, carbon deposits and particles causing from wear. Thus, friction and wear has increased in engine and this resulted in power losses.

In this study, a wear device has been designed and manufactured for the purpose of investigating friction and wear between piston ring and cylinder liners. The effects of using different marine lubricants, oil-fuel mixtures as a lubricant on the friction and wear has been investigated experimentally, depending on the load and revolution (cycle) between piston ring and cylinder liner. Experiments have been done at 60-150 rpm owing to increasing friction and wear with low speeds.

Keywords: Internal Combustion Engine, Wear, Friction, Piston Ring-Cylinder Liner



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Dünyadaki gelişmelerle beraber artan uluslararası ticaret, ürünleri taşımanın en ucuz yolu olarak kabul görmüş olan deniz taşımacılığının tercih edilmesiyle, dünya deniz ticaret filosunda gün be gün artış meydana gelmektedir. Zamanla bu artışa bağlı olarak gemi kaynaklı genel enerji tüketimi ve sonucunda da hava kirliliğini artmaktadır. Enerji endeksli olarak petrol fiyatlarındaki artışlar ile gemilerden kaynaklanan hava kirliliğini minimize etmek amacıyla getirilen egzoz emisyonu düzenlemeleri, makine üreticilerini gemi dizel makinelerinde yüksek performanslara ve düşük egzoz emisyonlarına ulaşmaya iterken, maksimum yakıt ekonomisi sağlama hedefine de yönlendirmiştir. Bu amaçla dizel motor üreticilerinin bahse konu olan hedeflere ulaşabilmesi için izlediği yollardan biri de motorlarda oluşan mekanik kayıpların minimize edilmesidir.

Dizel motorlarda yakıt ile giren toplam enerjinin %12'si yararlı iş olarak alınabilmektedir. Buradaki kayıplar ise; soğutma sistemi kayıpları, egzoz kayıpları, pompalama kayıpları ve mekanik kayıplar olarak bilinmektedir. Mekanik kayıplar ise, bu kayıp enerjilerin %17'sini oluşturur[1].

Motorlar için sürtünme kaynaklarını üç ana başlık altında inceleyebiliriz.

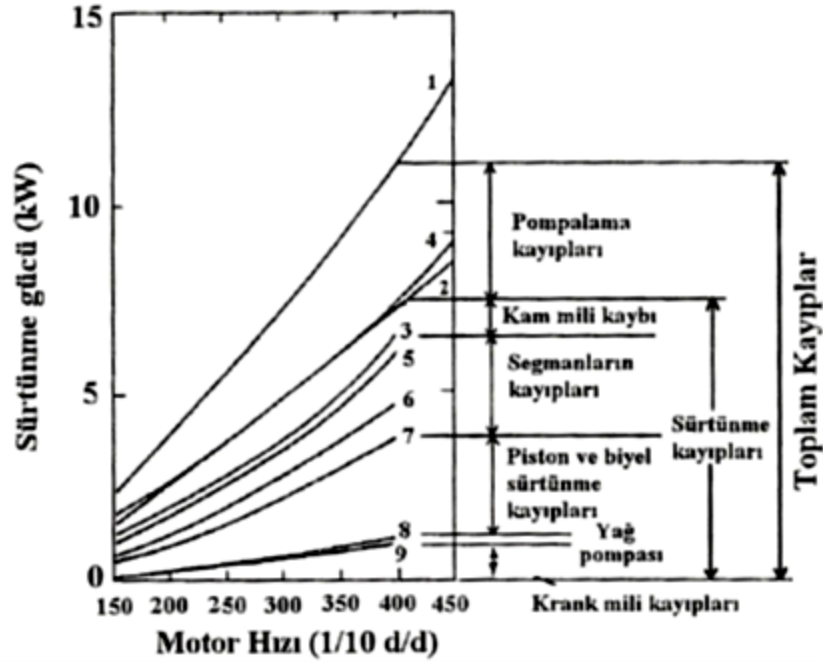
Birincisi; temiz havanın silindire içine alınması ve egzoz gazların silindirden dışarı atılması sırasında harcanan enerjiden kaynaklanan kayıplardır. Bu işe, pompalama işi denir[2].

İkincisi; direkt sürtünme kayıpları olarak tabir edilen, motorun çalışması esnasında birbirlerine göre hareket eden parçalar arasında sürtünmeden dolayı oluşan kayıplardır. Burada segmanlar ile silindir gömleği, piston ile piston pimi, kroşet

mekanizması, krank şaft ve yatakları, valf açma kapama mekanizmaları, dişliler, kasnaklar-kayışlar, zincirler üzerindeki sürtünmeler buna örnek olarak verilebilir. Dizel motorlarında sürtünme kayıpları araştırıldığında en büyük kayıpların direk sürtünme kayıpları olduğu anlaşılmaktadır[2].

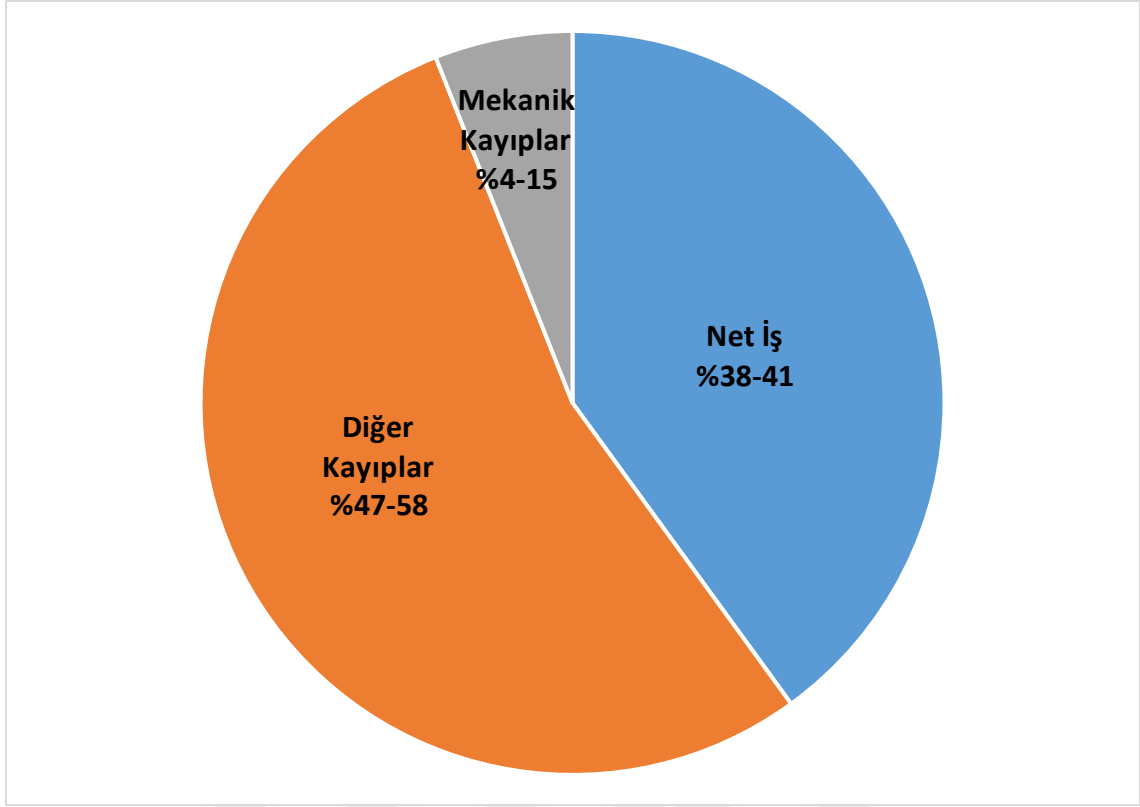
Üçüncüsü ve sonuncusu ise; motor üzerinden hareket alan ekipmanlar için harcanan enerji kayıplarıdır. Bu kayıplar parazitik kayıplar olarak da adlandırılır. Fan, soğutma suyu pompası, yağ pompası, lubrikatörler gibi motordan hareket alan ekipmanlardan kaynaklanan kayıplar parazitik kayıplara örnek olarak verilebilir[2].

Şekil 1.1'de makinede meydana gelen sürtünme kayıpları görülmektedir.



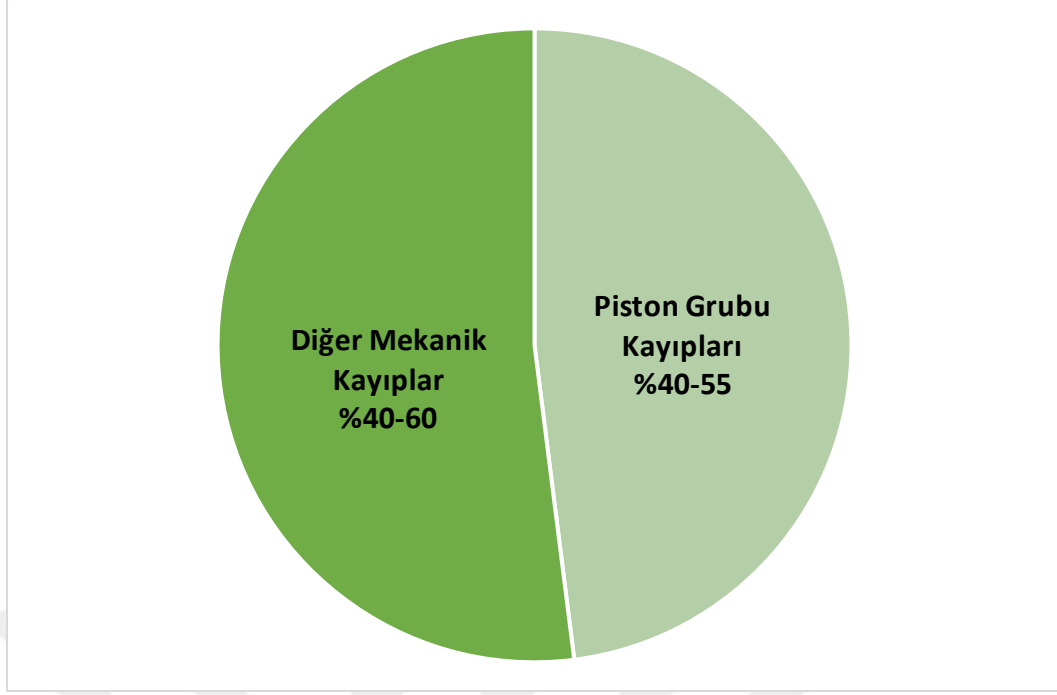
Şekil 1.1 Makinede meydana gelen sürtünme kayıpları [3].

Şekil 1.2 de gösterilen grafikteki değerler makine tipine ve çalışma koşullarına bağlı olduğu gibi, grafikteki her bileşen için ifade edilen oranlar oldukça anlamlıdır. Burada görüleceği üzere bir içten yanmalı makineye yakıtla giren enerjinin yaklaşık olarak %38-41'i faydalı işe dönüştürülebilmektedir. Bunun yanında olarak, %4-15'i mekanik kayıplara harcanırken, %47-58'i da soğutma, egzoz vb. diğer nedenlerden kaynaklanan kayıplara harcanmaktadır. ile kaybedilir[4].



Şekil 1.2 İçten yanmalı makinelerde yakıtla giren enerjinin dağılımı[4].

Şekil 1.3’de ise makinede oluşan mekanik kayıplarının %40-55 gibi büyük kısmının piston grubundan kaynaklandığı gösterilmiştir. Bunun yanında yataklardan kaynaklanan kayıplar, pompalama kayıpları ve valf mekanizması da diğer mekanik kayıplar %47—58’lik kısmı oluşturmaktadır. Piston grubundan kaynaklanan sürtünmelerin toplam sürtünme kayıplarının neredeyse yarısını oluşturduğu görüldüğünden, buradaki kayıplar müdahale edilmesi çok gerekli bir husus haline almıştır. Birçok araştırmacı piston grubu üzerindeki triboloji olaylarını anlamak ve sürtünme kayıplarını azaltmak için ciddi gayret sarf etmişlerdir. Bununla beraber piston grubundaki sürtünme kayıplarının azaltılması hala; sürtünme, emisyonlar, mukavemet, ses ve titreşimler, yakıt ve yağ tüketimi ve egzoz gazlarının segmanlar üzerinden kartere kaçmaları gibi hususlar arasındaki ilişkilerden ve tribolojik olayların karmaşıklığından dolayı ilgi çekici bir alan olma durumunu korumaktadır[4].



Şekil 1.3 İçten yanmalı makinelerde mekanik kayıpların oranları[4].

Bu nedenle, gemi dizel motorlarında maksimum performansı, yakıt tasarrufunu ve minimum egzoz gazı salınımını sağlayabilmek için sürtünme kayıplarını minimize etmek gereklidir. Sürtünme kayıpları performansı, yakıt tasarrufunu ve egzoz salınım oranlarını etkilerken diğer yandan da malzemelerde oluşan hasarlardan dolayı işletme maliyetlerini de yükseltmektedir. Bu da aşınmaların ve sürtünmenin makine üreticileri için önemli bir parametre olması zorunluluğunu doğurmuştur.

1.1 Literatür Özeti

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

Johansson vd., silindir gömleği ve piston segmanları etkileşimdeki sürtünme değerlendirmeleri için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında referans gömlek malzemesi olarak düzlemsel honlanmış gri dökme demir kullanırken, bunun yanında ek ısı işlem görmüş düzlemsel honlanmış gri dökme demir ve tek kademe honlanmış termal spreyleneş malzeme kullanılmıştır. Deneşler esnasında yağlayıcı olarak temiz 15W40 yağ tercih edilmiştir. Sonuç olarak; sürtünmedeki farklılıkların yağ

filmi oluşum şartları ile ilişkili olduğu, yüzey pürüzlülüğünün ise malzeme özelliklerinden bağımsız olduğu görülmüştür[5].

Truhan vd., silindir gömleği ve piston segmanı arasındaki sürtünmeleri ve aşınmayı bir aşınma cihazı tasarlayarak incelemişlerdir. Silindir gömleği malzemesi olarak gri dökme demir, segman malzemesi olarak 200 µm kalındığında plazma kaplamalı krom kullanılmıştır. Yağlayıcı olarak kullanılanlar ise, Jet A hava yakıtı, mineral yağ, yeni ve kullanılmış 15W40 makine yağıdır. Bu durumda farklı yağlama rejimlerine, sıcaklıklara yüklere bağlı olarak segman malzemesinin sürtünme ve aşınma davranışlarını araştırmışlardır. Aynı şartlarda farklı yağlayıcılarla yaptıkları deneylerde, sürtünme katsayısının Jet A yakıtında maksimum, kullanılmış 15W40 yağda ise minimum olduğu ve aşınmanın ise sürtünme kuvveti ile doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir [6].

Tamminen vd., dört zamanlı ve silindir çapı 200 mm olan, orta devirli bir dizel motorda yükün, piston segmanları ile gömlek arasındaki tribolojik şartlar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deneyler motorun çalışma koşullarında gerçekleştirilmiş ve daha sonra ticari bir bilgisayar simülasyonu ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak; periyodik dalgalanmalar ve farklı stroklardaki yük seviyeleri altında segman ve gömlek arasındaki yağ filmi oluşumu ve gelişimi üzerine etkisinin önemli olduğu vurgulanmıştır. Üstteki sıkıştırma segmanı için kritik yağlama durumunun düşük yüklerde egzoz zamanının sonuna doğru olduğu, üst sıkıştırma segmanı ve gömlek arasındaki yağ filminin kalınlığının da egzoz zamanının sonuna doğru en ince halini aldığı ve yağ filmi kalınlığının yük ile arttığı görülmüştür[7].

Grabon vd., bir silindir gömleği ve segman etkileşim test düzeneği kurarak bu düzenekte aşınan ve aşındırıcı malzemeler arasındaki sürtünme kuvvetlerinin okuyabilme imkânı sağlamışlardır. Gömlek numunesindeki yağsız ve yağlı hallerde görülen aşınmalar karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar tam ve zayıf yağlama koşullarında, 0,44 m/s, 0,66 m/s ve 0,88 m/s hızlarda, 50 ila 300 N'luk yükler altında tamamlanmıştır. Sonuç olarak; sürtünme kuvvetlerinin neredeyse iki kat kadar azalması, iyi yağlama şartlarındaki faydalı yağ filminin etkisinin kanıtı olmuştur[8].

Ma vd., tek boyutlu elastohidrodinamik karışık yağlama, aşınma ve sürtünme modeli geliştirmiş ve yüzey pürüzlülüğü, temas noktaları, sıcaklık, basınç ve viskozitenin piston

segmanları ile silindir gömleği arasındaki sürtünme, aşınma ve yağlamaya etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak silindir gömlek sıcaklığı arttıkça yağ viskozitesinin azaldığı dolayısıyla da yağ filmi kalınlığının azaldığı görülmüştür. Yağ filmi kalınlığının azalmasıyla da segman ve gömlek aşınmalarında büyük oranlarda artışlar gözlemlenmiştir[9].

Bolander ve Sadeghi, segman ile gömlek arasında yağlama şartlarını, sürtünme kayıplarını araştırmak ve belirlemek amacıyla deneysel ve teorik olarak çalışmışlardır. Deneysel düzenek değişken şartlar altında segman ve gömlek arasındaki sürtünmeleri ölçmek amacıyla kullanılmıştır. Analitik model geliştirilmesindeki amaç ise, tamamen belirleyici bir yaklaşım kullanılarak, sınır ve karışık yağlamanın etkilerini içeren deneysel sonuçları desteklemektir. Çalışmalar sonucunda analitik modelden alınan sayısal sonuçlar ile deneysel çalışmadan alınan sonuçlar arasında iyi bir ilişki olduğu görülmüştür. Karışık yağlama modelinin faydası, yapılan gömlek yüzeyi üzerindeki çapraz çiziklerin muayenelerinde resmedilmiştir. Burada segman ile gömlek arasındaki sürtünme kayıplarının azalması bu çapraz çizikler arasındaki açının azalmasıyla azalmıştır[10].

Tung ve Gao, yüksek frekanslı bir tribometre kullanarak farklı nitrürlenmiş paslanmaz çelik segmanları ve krom kaplamalı paslanmaz çelik segmanları, dökme demir gömlek üzerinde çalıştırmışlardır. Yağlayıcı olarak E85 Etanol yakıtı (%85 etanol-%15 kurşunsuz benzinin karışımı) ve molibden ditiyokabamat içeren yağlar kullanılmıştır. Deneysel aşamasında, segman ile gömlek arasındaki sürtünme ve aşınma davranışlarını yağ ile E85 karışımı kullanıp, yakıt-yağ karışımında 60°C sıcaklık, sadece yağ ile ise 125°C sıcaklık baz alınıp farklı yükler altında araştırma yapmışlardır. 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. Nitrür kaplamalı segmanda kullanılan molibden içerikli yağlama yağı kullanılan organik yağlayıcıya daha iyi değerler vermişken, krom kaplı segmanlarda ise, organik yağlayıcı kullanıldığında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir[11].

Ronen ve Etsion, içten yanmalı otomotiv motorlarının bileşenlerinin tribolojik özelliklerini geliştirmek amaçlı olarak mikro yüzey doku yapısının kullanılabilirliği

üzerine bir çalışma yapmışlardır. Buradan içten yanmalı otomotiv motorlarında gömlek ve segman yüzey dokularının sürtünme kayıplarının azaltılmasında esas teşkil edebileceği görülmüştür[12].

Ma Yajun vd., nitrülenmiş segman ve dökme demir gömlek arasında yağlayıcı olarak ILSAC GF-2 ve GF-3 kategorisinde molibden ditiyokarbamatla formüle edilmiş motor yağları kullanarak laboratuvar ortamında bir deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, uzunca test süresince GF-3 ün sabit ve daha az sürtünme katsayısı ($\mu=0,03$) oluşturduğunu gösterirken, GF-2 ise daha çabuk bir sürtünme azalması göstermiştir. Aynı şartlar altında GF-3, GF-2 ile karşılaştırıldığında daha az aşınma oranlarına sahip olmuştur. Yine SEM-EDX analizlerinde; GF-3 kullanıldığında segman ve gömlekte daha az aşınma izleri görülmüştür[13].

Priest ve Taylor içten yanmalı motorların piston grubu, valf açma kapama mekanizması ve yataklarında karşımıza çıkan yüzey hallerini incelemişlerdir. Yüzey topografının muhtemel getirilerinin aşırı karmaşıklığıyla başa çıkmak için makine tribolojisine ait bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Yaptıkları bu araştırmaların sonucunda; yüzey etkileşimleri ve topografyası üzerine özel bir bakış yapıldığında makine bileşenlerinin ilgili sürtünme ve tribolojik tasarım hususunda güncel durumlar gözden geçirilmiştir. O zamana kadar yapılan çalışmalardan arda kalanların tümünün de gelecekte araştırması ve çalışılması önemli ve dikkate değer bir alan olduğu sonucuna varılmıştır[14].

Tung ve Huang, sıcaklığın, yükün, yağ bozulunun, yüzey pürüzlülüğünün ve malzeme özelliklerine bağlı olarak zamanla değişimi olmayan segman ile gömlek sistemi arasındaki abrazyon aşınma üzerine bir modelleme geliştirmişlerdir. Değişken şartlarda olmayan işletme süresince segman ve gömlek arasındaki abrazyon sürtünmeyi modellemek için laboratuvar simülasyonuna dayalı abrazyon aşınma modeli geliştirilmiştir. Burada amaç, abrazyon aşınma modelinin; sıcaklık, yük, yağ bozulumu, yüzey pürüzlülüğü ve malzeme özelliklerinin etkilerini incelemektir. Modelin uygulanabilirliği de sayısal örneklerle ortaya konulmuştur[15].

Douglas vd., alışlagelmişin dışında akustik yayılım (acoustic emission) metodu kullanarak dizel motorlardaki segman ve gömlek arasındaki etkileşime bağlı olarak ortaya konulan tribolojik davranışlar konusunda bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu

yöntem ile motorların normal çalışma şartlarında bile piston grubu üzerindeki tribolojik davranışların izlenebilirliği görülmüştür. Yağlama ve sürtünme hakkında farklı devirler, yükler ve yağlama şartları altında bile fikir sahibi olunabildiği görülmüştür[16].

Livanos ve Kyrtatos, gemi dizel motorları piston grubu için bir sürtünme modeli geliştirmişlerdir. Bu model motor geometrisi ve yağlayıcı hareketlerine bağlı olarak yağlama teorisine dayandırılmıştır. Böylece her boyuttaki motora uygulanabilirliği sağlanmıştır. Öncelikle orta devirli bir gemi dizel motoru üzerinde analizler yapılmış, devir ve yükün sürtünmeler üzerindeki etkileri incelenmiş ve yarı ampirik modellerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile jeneratör operasyonunda kullanılan sabit devirli sistemlerde ve değişken devirli sistemlerde sürtünmeler konusunda tahminler oluşturmuştur[17].

Tomanik, ağır devirli dizel motorlarından alınan 6 farklı şekilde honlanmış gömlek numunesi ve PVD kaplanmış segman numunesi karşılıklı olarak çalıştırmış ve test etmiştir. Mevcut honlama yöntemleri ve son zamanlarda kullanılan lazer işlemeyle geliştirilen yöntemlerle hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Numuneler değişik hız ve yüklerde test edilmiş ve yağlama rejimi sınır yağlama koşuluna yaklaştığında (hız ve yük sıfıra yaklaşması durumu) tüm işlenmiş gömlek numunelerinde sınır sürtünme katsayısı yaklaşık 0,11 olarak tespit edilmiştir. Şartlar hidrodinamik yağlama koşuluna geçtiğinde ise, lazerle işleme uygulamasının lazersiz bölgesinden alınan numunede, lazer uygulamasını takiben dikkat çekici şekilde daha küçük sürtünme katsayılarına rastlanmıştır[18].

Tan ve Ripin, iki zamanlı motorlarda pistonun ikincil hareketi esnasındaki segman sürtünme davranışlarını incelemek amaçlı çalışmalar yapmıştır. Piston hareketini ve eğim açısını keşfetmek için iki adet lazer deplasman sensörü kullanılmıştır. Bu çalışmalarında kullandığı parametreler; hız, yağ miktarı, yağ ve yakıt karışımı miktarı ve bu karışım oranları olmuştur. Kullanılan yağ miktarı artarken yüksek devirlerde ölü noktalar boyunda sürtünmelerde önemli azalmalar görülmüştür. Sürtünme kuvveti ile piston eğim açısı arasındaki münasebet, düşük hızlarda zayıf bir ilişki vermiştir. Fakat hızın artmasıyla artmalar görülmüştür[19].

Jensen vd., pin-on-disk (POD) test makinesi kullanarak bir gemi dizel motoruna ait gerçekçi aşınma karakteristikleri için simülasyon çalışması yapmışlardır. Burada POD düzeneğiyle gemi dizel motorlarında kullanılmak üzere yeni bir malzeme geliştirme amacı güdülmüştür. Bunun yanında bu çalışmayla, iki zamanlı dizel motorlarda gömlek yüzeyinde oluşan sıvama ve sürtünme gibi aşınma kaynaklarını önlemeye yönelik çözümler aranmıştır. Bu çalışmayla büyük hacimli iki zamanlı dizel motorlarında segman-gömlek sürtünmeleri konusunda simülasyon ile fikir sahibi olunabilmiştir. Numuneler üzerindeki çalışmalarla sürtünme mekanizması hususunda daha anlaşılır sonuçlar alınıp, aşınma sonuçları geliştirilebilir hale getirilebilmiştir[20].

Sjödin ve Olofsson, pistonlar üzerindeki segman boşlukları ile segmanlar arasındaki etkileşim sonucu oluşan aşınmalar üzerine bir deneysel çalışma gerçekleştirmiş, kütle kayıpları, formda ve yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen değişimler incelemişlerdir. Bu çalışmalar için geliştirilen test düzeneği ile strok sonlarında oluşan piston hareketlerine göz gezdirilmiştir. Sonuç olarak segman kanalında oluşan aşınmaların, segman yüzeylerinde oluşan aşınmalara nazaran 10 kat daha fazla olduğu keşfedilmiştir. Her iki yüzey için de baskın olan aşınma mekanizması yumuşak aşınma şeklinde olduğu ve segman kanal yapısının formunun aşınma oranını ciddi oranda etkilediği görülmüştür[21].

Truhan vd., ağır devirli dizel motor uygulamaları için geliştirdikleri bir test düzeneği üzerinde segman ve gömlek malzemelerinin aşınma ve sürtünmesinde yağlama yağı durumunun etkisini incelemişlerdir. Test düzeneği 10 Hz, 10 mm strok mesafesi ve 100 °C şartlarında çalışacak şekilde kurulmuştur. ASTM standart makine testlerinde kullanılan tam formüle edilmiş makine yağları da yağlayıcı olarak kullanılmıştır. Yağ içerisindeki kurum ve katı parçacıklar, oksidasyon parametre olarak alınmıştır. Sonuç olarak; viskozitenin sınır yağlama rejiminde segman-gömlek sürtünmesi için çok az bir etkisi olduğu görülmüş, yağın içerisinde bulunan kurum ve katı parçacıkların aşınma üzerinde büyük etkileri görülmüştür[22].

Skopp vd., karışık yağlama ve kuru çalışma şartlarında termal sprey titanyum suboksit kaplanmış segman ve gömlek çiftinin tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. Gri dökme demir malzemeler üzerine farklı formlarda kaplamalar yapılmış ve kaplama yapılmayan

numunelerle karşılaştırılmıştır. Yağlayıcı olarak estere ve poliglikole dayalı makine yağları kullanılmıştır. Yapılan bütün kaplama şartlarında sürtünme katsayıları aşağılara çekilmiş ve buna paralel olarak da aşınmalar azaltılmıştır[23].

Gara vd., yankı-yansıma metodu kullanarak tek silindirli bir dizel motor gömleğinde oluşan aşınmalar ve yüzey pürüzlülüğü üzerine çalışma gerçekleştirmiştir. Bunun için WYKO NT 1100 optik yüzey profilometresi kullanmışlardır. Çalışma süreci boyunca yüzey pürüzlülüğünün zamanla azaldığı ve pürüzlülük azalma oranının arttığı görülmüştür. Böylelikle yankı-yansıma metodu ile elde edilen gömlek aşınma sonuçlarının, dizel motorlarda yapılan farklı testlerdeki sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür[24].

Michalski ve Woś, silindir gömlek topografyasının segman ve gömlek çiftindeki abrazif aşınma üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmayı farklı honlamalardan kaynaklanan değişik pürüzlülük parametreleri ile gerçekleştirmişlerdir. 10 saatlik ilk çalışma periyodu sonunda oluşan maksimum yüzey çukur derinliğinin (topografyasının) segman-gömlek aşınması ile olan ilişkisi ortaya çıkarıldı. 21 saatlik tam yük şartları altında çalışma durumunda ise benzer güçlü sonuçlar alındı. Buradan yüzeydeki derinliklerin maksimum değerinin azalmasıyla aşınmaların azalacağı görülmüştür[25].

Olander vd., gemilerin emisyon düzenlemeleri gereği açık denizde kullandığı ağır yakıttan (HFO: Heavy Fuel Oil), hafif yakıta (MGO: Marine Gas Oil veya Natural Gas) geçmeleri durumunda motor segman ve gömleklerinde oluşan aşınma sorunlarını gözlemlemek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada ağır yakıt içerisindeki emisyon nedeni olan sülfürün rolü incelenmiştir. Aşınma görülen yüzeyler incelendiğinde sülfür içeren herhangi bir noktaya rastlanmamıştır. Kullanılmış silindir yağı ve temiz silindir yağı ile yapılan deneylerde ise kullanılmış silindir yağı ile çalışan numunelerde daha fazla sülfüre rastlanmıştır[26].

Priest vd., ilk başta bir dizel makineye ait segmanlar üzerindeki aşınmalara, yağlama ve dinamik tahminine ilişkin sayısal bir model geliştirmişlerdir. Böylelikle teorik çalışmalar ve deneysel çalışmalar arasındaki ilişkiyi değerlendirme amacı güdülmüştür. Bu amaçla bu model ile Caterpillar 1Y73 tek silindirli bir dizel motorda sabit devir ve yük altında yağlama performansları tahmin edilmek istenmiştir. Yine bu model aynı motorda üst

sıkıştırma segmanında yağlama ve aşınmaların tahminlerinde kullanılmıştır. Sonuç olarak bu model, segman profilinin zamana bağlı değerlendirilmesine, yağlama ile aşınma arasındaki karışık ilişkinin anlaşılmasına yardımcı olmuştur[27].

Kapsiz vd., gömlek ve segmanlar arasındaki sürtünme ve aşınma çalışmalarını Taguchi dizayn metodu kullanarak açıklamaya çalışmışlardır. Uygulamada parametre olarak; kayma hızı, yük ve yağ çeşidi kullanılmıştır. Yağ çeşidi ile kayma hızı arasındaki ilişki segman ağırlık kaybı üzerinde dikkate şayan bir etki göstermiştir. Teorik model ile deneysel sonuçlar arasında da oldukça iyi benzeşimler elde edilmiştir[28].

RYK vd., pistonlu otomotiv motor bileşenlerindeki sürtünmeyi azaltmak için yüzeylere lazer dokunuşları yapmışlardır. Yetersiz, zayıf yağlama şartları altında bile lazer işleme yöntemi incelenmiştir. Örnekteki, sürtünme azalması tahmini, teorik hesaplarla örtüşmüştür. Yöntem uygulanarak yapılan testlerde daha küçük sürtünme kuvvetlerine rastlanmıştır[29].

Hazar ve Öner, bir dizel motorunun silindir gömlek yüzeyini krom nitrür (CrN) kaplayarak aşınma davranışlarını incelemiştir. Motor, CrN kaplanmış gömlek ve kaplamasız gömleklerle farklı devir ve yükler altında, aynı şartlarda çalıştırılmıştır. Deneyler sonucunda gömleklerde mikro sertlik, SEM (Scanning Electron Microscopy), EDS (Energy Dispersive Spectrograph) ve yüzey pürüzlülüğü analizleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre kaplamalı gömleklerde daha az aşınma ve çizilmelere rastlanmıştır[30].

Çakır ve Akçay, içten yanmalı motorlardaki segman-gömlek sürtünmesinin motor performansı ile ilişkisi üzerine bir inceleme yapmış, literatür taraması gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak; segmanların gömlek üzerinde kayma hareketi sınır yağlama ve hidrodinamik yağlama rejimleri arasında sürekli bir geçiş söz konusu olduğundan, segman-gömlek arasında Stribeck Eğrisi'nin değişimi ile ilgili matematiksel bir model geliştirilebilir olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun yanında, iş zamanında iki yüzey arasında sınır yağlama ortamının oluştuğu, metal-metal teması neticesinde kuru sürtünme meydana geldiği ve adezif aşınma olayı oluştuğu, segman ve gömlek yüzeylerine uygulanabilecek farklı modifikasyonlar ve kaplamalar ile özellikle çevrimin iş zamanındaki aşınma araştırılabileceği, segman-gömlek temas açıları ve temas

alanlarının sürtünme, aşınma, ısı transferi ve motor performansı açısından değişimi araştırılabileceği, sonuçları da çıkarılmıştır[31].

Ryk ve Etsion, kısmen lazer yüzey işlemesi uygulayarak segmanların sürtünme testlerini yapmışlardır. Testler bir piston-silindir test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Lazer işleme uygulanmış numunelerle, işleme uygulanmamış numunelerin belirli bir çalışma periyodu sonrasında yapılan karşılaştırmalarda, lazer işleme uygulanmış numunelerde % 25 daha az sürtünme etkileri gözlenmiştir[32].

Abdullah vd., sıkıştırılmış doğal gazla çalışan bir motorda difüzyon krom kaplamalı segmanlar kullanımının sürtünme azalmasına etkilerini incelemiştir. Çalışma sonrasında kaplamalı segmanların sürtünme katsayısının ve aşınmaların azalmasında etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır[33].

Sutaria vd., tek silindirli, bir içten yanmalı motorda segmanların sürtünme modelleri için simülasyonlar gerçekleştirmiştir. Burada, geliştirilmiş olan Hoshi, Yukio ve Sharma isimli üç ayrı model için sonuçlar almıştır. Sonuçlarda; her üç modelde de sürtünmelerin hız ile arttığı gözlenmiştir. Sharma modelinde her bir hız basamağında maksimum sürtünme değeri verilirken, Hoshi modelinde minimum sürtünme ile karşılaşılmıştır. Yukio modeli ise bu ikisi arasında değerler vermiştir[34].

Keller vd., malzemenin kimyasal yapısı ve mekanik özellikleri ile malzeme yüzey dokusunun ağır dizel motorlara ait silindir gömleği aşınmaları üzerindeki etkilerini incelemek için bir araştırma yapmışlardır. Üç farklı katmanlı (lamellar) gri dökme demir malzeme kullanılmış, bazılarında honlama uygulanmış ve testler yapılmıştır. Sonuç olarak yüzey topografyasının aşınma direnci üzerinde çok önemli bir etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır[35].

Johansson vd., düşük yağ sarfiyatları için geliştirmek istedikleri silindir gömlek yüzeyi için, segman ve gömlek yüzey topografyası ve dokusal yapısının yağ filmi kalınlığı ve sürtünme üzerindeki etkilerini simülasyonla ve deneysel olarak test etmişlerdir. "Glide honed" ismini verdiği bir yöntemle hazırlanan gömlek yüzeyi düşük aşınma karakteristikleri göstermiştir. Dolayısı ile de düşük sürtünme sonuçları alınmıştır[36].

Srivastava vd., ateşlemesiz bir makine simülatöründe gömlek yüzey özelliklerinin aşınma ve sürtünme üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneyler boyunca gömlek

üzerinde farklı noktalarda, aşınma ve yüzey özelliği davranışları değerlendirildi. İlk çalıştırma sonrasında gömlek yüzeyinin plato honlanmış gibi bir durum gösterdiği bulunmuştur. Sürtünme katsayıları SRV aşınma test cihazı kullanılarak değerlendirilmiş ve segman-gömlek arasındaki sürtünme katsayısının, gömlekteki ortalama yüzey pürüzlülüğünün artması ile arttığı görülmüştür[37].

Papadopoulos vd., yumuşak ve sert aşınma mekanizmasını tanımlamak için, gerçek bir motordan alınmış segman ve gömlek numuneleri ile metalürji ve metroloji görüş odaklı segman-gömlek araştırması sistemi araştırması yapmışlardır. Çalışmada Plint TE77 yüksek frekanslı sürtünme makinesi kullanılmıştır. Metroloji analizlerini profilometre temaslı iğneyle, metalürji analizlerini ise JOEL JSM-6400, SEM (Scanning Electron Microscope) cihazı kullanarak yapmışlardır. Kullanılan iki çeşit segman numunesinden CKS-36'nın, Molibden kaplamalı olana göre daha iyi bir aşınma direncine sahip olduğu görülmüştür. Molibden kaplamalı segmanlara karşı çalışan gömlek numunelerinde abrazyon aşınma baskın olarak görülmüştür. CKS-36 segmana karşı çalışan gömleklere ise plastik deformasyonlara ve yüzey çatlakları meydana gelmiştir. Segmanların hiçbirinde plastik deformasyon veya abrazyon aşınma belirtisi görülmemiştir. Sadece Molibden kaplamalı segmanda çatlaklar görülmüştür[38].

Keller vd., bir başka çalışmalarında, malzemenin kimyasal bileşenlerinin ve mikro yapısının ağır dizel motorlara ait silindir gömleği aşınmaları üzerindeki etkilerini incelemek için araştırma yapmışlardır. Gri dökme demirin iki çeşit katmanlı (lamellar) ile çalışılmıştır. Bunlar klasik gri dökme demir ve mikro alaşımlı gri dökme demirdir. Cameron Plint test düzeneğinde gömlek numunelerinin, çelik top altında aşınma deneyleri yapılmıştır. Yağlayıcı olarak dizel makineler için üretilen 5W30 ticari sentetik yağ kullanılmıştır. Tribokimyasal film uygulamasından sonra aşınma oranlarında azalma meydana gelmiştir. Bunun yanında mikro alaşımlı gri dökme demirde, klasik olana nazaran daha iyi bir aşınma direncine rastlanmıştır[39].

Hwang vd., gemi dizel motorlarına ait segman ve gömlek numunelerine uygulanacak plazma sprey kaplamanın tribolojik davranışlarını incelemiştir. Kaplama malzemesi olarak Cr_2O_3-NiCr , $Cr_2O_3-NiCr-Mo$ ve $Cr_3C_2-NiCr-Mo$ kullanılmıştır. DOP (Disc-on-plate) yöntemi, yani bir numune üzerinde başka bir numune hareketi ile testler yapılmıştır.

Sonuç olarak; segmanda Cr_3C_2 -NiCr-Mo, gömlekte Cr_2O_3 -NiCr-Mo kaplaması ile yapılan deneylerde en iyi aşınma karşıtı performans elde edilmiştir. Molibdenin aşınma karakteristikleri için oldukça faydalı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yağlamasız, kuru çalışma şartlarında metal transferi sebebiyle adeziv aşınma baskın aşınma mekanizması olarak görülmüştür[40].

Xu vd., katı yağlama kaplamalarının yüzey karakteristiklerini ve tribolojik özellikleri düşük sıcaklıklarda araştırmışlardır. 1045 çeliğinden imal edilmiş silindir gömleği üzerine iki kat molibden iyon kaplanmış ve sülfürlenmiştir. Dizel motorda katı yağlama ile sürtünme ve aşınma karakteristikleri incelemiştir. Deney sonuçlarına göre, iki kat molibden iyon kaplanmış ve sülfürlenmiş gömlekte sadece iyon kaplanıp-sülfürlenmiş numuneye göre daha az sürtünme durumu ve daha sınırlı aşınmalar elde edilmiştir[41].

Uras, yaptığı doktora çalışmasında içten yanmalı motorlarda piston-segman donanımı sürtünmelerini ölçebilmek için bir IMEP metodu geliştirmiştir. Deneylerde Chevrolet 1.8 Litre L-4 ve 5.0 Litre V-8 motorlar tek silindir çalışacak şekilde modifiye edilmiştir. Kullanılan yağlar ise SAE 30, 50 ve molibden içeren SAE 30'dur. Ölçümler değişik yüklerde, dakikada 1640'a kadar çıkabilen devirlerde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar segman sürtünmelerinin, düşük devirlerde güçlü bir şekilde karışık yağlama, yüksek devirlerde de hidrodinamik yağlama karakteristiklerini gösterdiğini ortaya koymuştur. Piston hızının strok ortasında en üst seviyelerine ulaştığına ve bu noktalarda sürtünmelerin minimum olduğuna ulaşılmıştır. Ölü noktalarda karışık, strok ortalarında ise hidrodinamik yağlama rejimleri görülmüştür[42].

Cesur, çalışmasında segman-silindir çifti arasındaki sürtünme ve aşınmayı davranışlarını incelemek için bir aşınma cihazının tasarım ve imalatı yapmış, %100 yağ, %100 dizel, %50 dizel+%50 yağ, %100 Tütün Tohumu Metil Esteri ve %100 Ayçiçeği Yağı Metil Esterini yağlayıcı olarak kullanmıştır. Böylece segman-silindir çifti arasındaki sürtünme ve aşınmayı, değişik yük ve devirlere bağlı olarak deneysel olarak incelemiştir. Sonuç olarak, biyodizellerin kullanılmasıyla sürtünme katsayılarının daha düşük olduğu ve dizel yakıtına göre yağlama özelliğinin daha iyi olduğu anlaşılmış, aşınmalarda ise %100 yağa göre iki kat artış gözlenmiştir[43].

1.2 Tezin Amacı

Piston segmanları ile silindir gömleği tribolojisinin önemi anlamak için; literatürde yapılan çalışmaların sayısından anlayabiliriz. Şüphesiz pistonlu makineler günümüzde normal yaşamın yok sayılamayacak bir unsurudur. Bu gün trafikteki neredeyse bütün araçlarda motor olarak, jeneratörlerde alternatörü çevirici kısım olarak hep pistonlu motorlar tercih edilir. Yapılan literatür çalışmaları sonucunda, piston segmanları ile silindir gömleği arasındaki sürtünmeler ve sürtünmelerden kaynaklanan aşınmaların henüz hedeflenen seviyelere ulaşmadığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada imal edilen deney düzeneğiyle Piston segmanları ile silindir gömleği arasındaki sürtünme kayıpları farklı yük, farklı sıcaklık, farklı devir sayıları, farklı yağlayıcılar baz alınarak incelenmiştir. Buna bağlı olarak alınan sürtünme kuvveti değerleri ile doğru orantılı çıkacağı tahmin edilen segman ve silindir gömleği aşınma oranları tespit edilmiştir. Sonrasında motorda segman ile gömlek düzeneğinde minimum sürtünme kaybı ve aşınma oranları için optimum şartlar belirlenmiştir. Yağlayıcı olarak kullanılan olan yağ ve yağ-yakıt karışımlarının sisteme etkileri optimize edilmiştir. Optimizasyon çalışmalarında Taguchi deneysel tasarım yaklaşımından faydalanılmıştır.

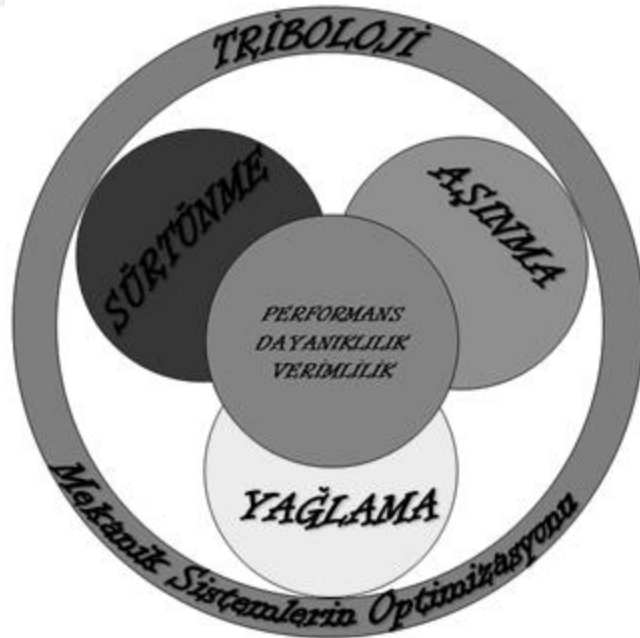
Belirlenen optimum şartlar ile malzeme kayıplarında azalma ve motora yakıtla giren enerjinin maksimum iş olarak motordan alınması amaçlanmaktadır.

1.3 Hipotez

Dizel motorlarda silindir gömleği-segman çifti arasındaki sürtünmelerin motor performansı ve yakıt tüketimi açısından önemi bilinmektedir. Yağlayıcı çeşidi, segmanların silindire olan temas kuvveti, motor gövde sıcaklığı ve motor devrinin uygun seçilmesi durumunda sürtünme katsayıları ve aşınma oranlarının azalacağı öngörülmektedir.

TRİBOLOJİNİN ESASLARI VE İÇTEN YANMALI MOTORLARDA TRİBOLOJİ

Triboloji; birbirlerine göre hareket eden ve temas halinde bulunan yüzeylerdeki sürtünme, aşınma ve yağlama gibi konularla ilgilenen bilim dalıdır. Triboloji biliminin amacı; karşılıklı çalışan yüzeylerin sürtünmeleri durumunda sürtünme ve aşınma sebebiyle oluşan kayıpları mümkün olan bir şekilde en aza indirmenin hatta yok etmenin yollarını aramaktır. Bu amaçla triboloji bilimi ile sistemlerde kayıpları azaltılarak maksimum performans ve malzeme kayıplarının önüne geçilerek maksimum tasarruf sağlamak amaçlanır.

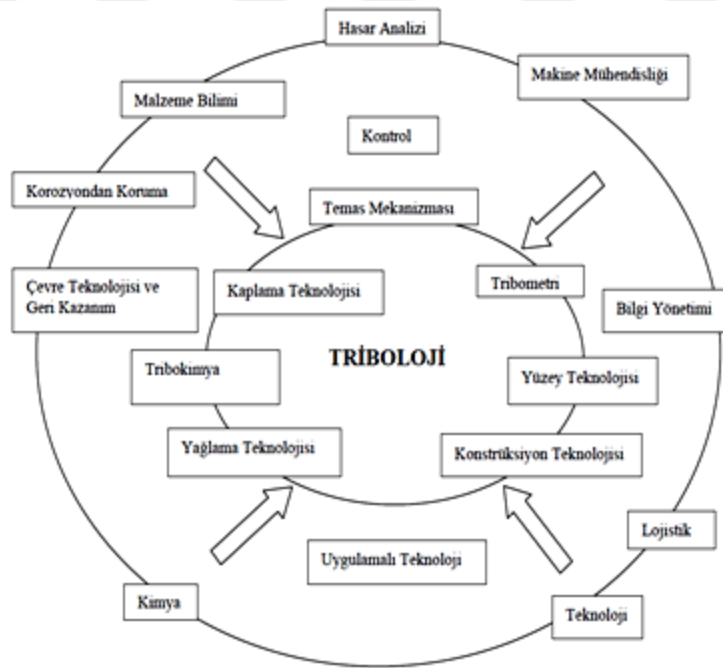


Şekil 2.1 Tribolojik Sistem

Şekil 2.1’de sistemsel olarak gösterilen Triboloji, enerji tasarrufu gelişimi ve makinelerdeki sürtünmeyi azaltma konuları üzerine çalışır. Öyle ki ülkelerin ekonomik

kayıplarında etkisi oldukça büyüktür. 1982 yılında Amerikan Ulusal Teknoloji Enstitüsü'nün yaptığı bir araştırmada, korozyon ve aşınmadan kaynaklanan zararın, gayri safi milli hâsılanın %6'sını yani yaklaşık olarak 178,5 milyar dolar gibi bir bütçe oluşturduğu görülmüş ve bu yöndeki çalışmalara önem verilmesi gerektiği vurgulanmıştır[44]. 1966 yılına bakıldığında ise bu değer yaklaşık olarak 200 milyar dolara ulaşmakta olup dünyadaki enerji kaynaklarının yaklaşık üçte birine tekabül etmektedir. Peter Jost'un 1974'da yaptığı çalışmaya göre, Birleşik Krallık triboloji alanında yaptığı iyileşmeler ile yıllık yaklaşık 1285 milyon dolar ve Birleşik Devletler ise yaklaşık 16 milyar dolar kazanç sağlanmıştır[45]. Türkiye'de ise sürtünme ve aşınmanın neden olduğu toplam ekonomik kayıplara bakıldığında; yaklaşık olarak gayri safi milli hâsılanın %4'üne ulaşmaktadır. Dolayısı ile ülkemizin 2004 yılında gayri safi milli hâsılanın 269 milyar dolar olduğu biliniyorsa; sürtünme ve aşınma kayıpları yaklaşık 11 milyar dolara karşılık gelmektedir[46].

Triboloji bilimi; sürtünme, aşınma ve yağlama konularını içerirken Şekil 2.2'deki gibi birçok sistemle de doğrudan ilişkilidir.



Şekil 2.2 Tribolojinin diğer bilimlerle olan ilişkisi[47]

Triboloji, yüzeylerin birbirine göre hareketinde sürtünme, yağlama ve aşınma mekanizmalarının ve olaylarının incelenmesi olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir

ifadeyle sürtünme, yağlama, aşınma konularını ve bunlara bağlı olan olayları inceleyen bilim dalıdır.

Bir tribolojik bir sistemden söz edebilmek için sistemin bazı gereksinimleri vardır. Aşınma ve sürtünme özelliklerinin inceleneceği ana malzeme olan **“temel sürtünme elemanı”**, temel sürtünme elemanının çalışma süresince temas halinde olduğu **“karşı sürtünme elemanı”**, bu iki eleman arasında bulunan **“ara madde”**, sürtünme sırasındaki ortamın sıcaklığı, nemi veya vakumlu olduğunun ifadesi olan **“çevre”**, sürtünme ve aşınmanın büyüklüğünü ifade edecek **“yük”** ve sürtünme elemanları arasındaki kayma, yuvarlanma veya kaymalı-yuvarlanma şekillerinde ifade edilen **“hareket”** tribolojik sistemin olmazsa olmazlarıdır[48].



Şekil 2.3 Tribolojik sistem ve unsurları[49]

Şekil 2.3'te şematik olarak tribolojik sistem ve unsurları resmedilmiştir. Triboloji doğrudan; sürtünme, aşınma ve yağlama konuları ile ilgilendiğinden bu başlıkları daha iyi anlamada fayda olacaktır.

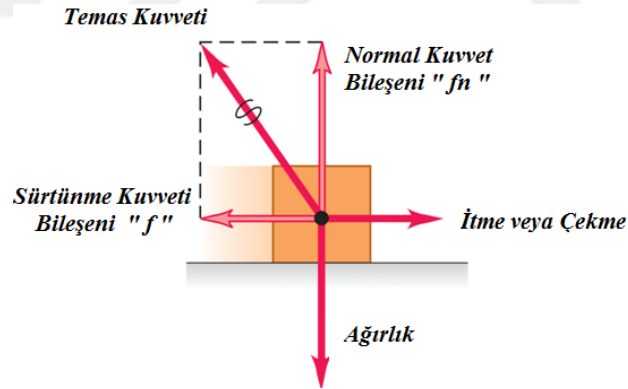
2.1 Sürtünme

2.1.1 Sürtünmenin esasları

Sürtünme; kaymaya karşı koyan kuvvettir. Neredeyse her zaman, sabit olarak ve her malzeme için özel olan bir katsayının olarak da tarif edilir. Bu basit kavram karmaşası

özellikle de salınım hareketi yapıyorsa, kayan sistemlerde birçok probleme neden olmaktadır[50]. Ya da sürtünme, temas halinde olan ve birbirine göre hareketi olan elemanlar arasında, yapılmak istenen harekete karşı ortaya konan direnç şeklinde tanımlanabilir. DIN 50281'e göre ise sürtünme; birbiri üzerinde kayan, yuvarlanan veya kaymalı yuvarlanan elemanların izafi hareketlerini yavaşlatan veya engelleyen mekanik direnç olarak tanımlanır. Sürtünme genelde olumsuz bir etki gibi görünürken bazı durumlarda da olması arzu edilen bir durumdur. Örneğin araçlarda fren, motorlarda kavrama mekanizmalarında sürtünmenin olması istenilen bir durumdur[47].

Sürtünme sayısal olarak bazen çok küçük değerlerle ifade edilse de pratik olarak devamlı olarak var olan bir gerçektir. Sürtünme direncini meydana getiren parametreler oldukça fazla olmakla beraber, etkileri bu direnç üzerinde büyük farklılıklar göstermektedir. Temas halindeki elemanlar arasındaki hareketin türü, fiziksel durumları, aralarında bir ara maddenin var olup olmadığı, ortam şartları gibi parametreler ve bu parametrelerin kendi içerisindeki karmaşıklıklar sistemi de çok karmaşık hale getirmektedir[51]. Aşağıda Şekil 2.4'te sürtünme kuvveti şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.4 İtme veya çekme ile cisimde, sürtünme kuvvetinin şematik gösterimi[52]

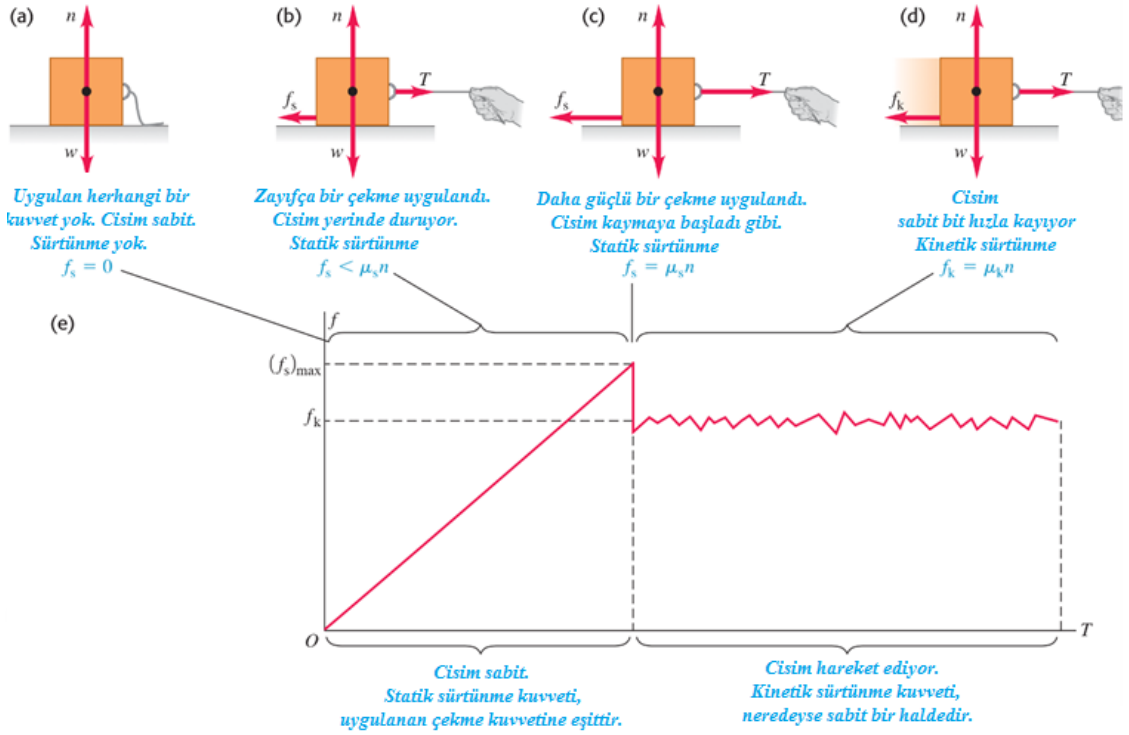
Sürtünme kuvvetinin yönü, birbirlerine göre bağıl hareket yapan iki yüzeyin hareket yönünün ters istikametindedir. Bir yüzey üzerinde hareket halinde olan cisme uygulanan sürtünme kuvveti "**kinetik sürtünme kuvveti**" olarak adlandırılır. Kinetik ifadesi, iki yüzeyin birbirine göre bağıl olarak hareket ettiğinin ifadesidir. Kinetik sürtünme kuvvetinin şiddeti normal kuvvetin artmasıyla artacaktır. İçi kitap dolu bir kutu yerde sürüklenmek istenirse, kutuda ne kadar fazla kitap olursa sürüklemek o

kadar zor olacaktır. Kitapların ağırlığı normal kuvvetin fazla olmasını ifade ederken, normal kuvvetin artmasıyla da sürtünme kuvveti artacaktır. Dolayısı ile normal kuvvet ile sürtünme kuvveti arasında şöyle bir ilişki kurmak mümkündür[52].

$$f_k = \mu_k \times f_n \quad (2.1)$$

Burada f_k kinetik sürtünme kuvveti, μ_k , kinetik sürtünme katsayısı ve f_n ise normal kuvvet olarak adlandırılır. μ_k normal kuvvet ile kinetik sürtünme kuvveti büyüklüklerinin birbirine oranı olduğu için birimsizdir. Kayganlaşan yüzeylerde bu katsayı daha da küçülür. Bir katı cisim başka bir katı cisim üzerinde kayma hareketi yaparken, sürekli olarak bu iki yüzey arasında bağlar oluşup, kopmaktadır. Oluşan bu bağların sayısı her zaman değişkendir. Bu nedenle de kinetik sürtünme kuvveti ve de kinetik sürtünme katsayısının sabit olması beklenemez[52].

Sürtünme kuvveti, iki yüzey arasında birbirlerine göre hareket olmasa da var olabilirler. Herhangi bir cismi, bir yüzeyde kaydırmaya çalıştığımızda cisim hareket etmeyebilir. Çünkü yüzey ile cisim arasında, bizim uyguladığımız kuvvete denk, belki daha büyük olan zıt yönlü bir sürtünme kuvveti vardır. Buna “**statik sürtünme kuvveti**” adı verilir ve f_s ile gösterilir.



Şekil 2.5 Statik sürtünme ve Kinetik sürtünme [52]

Şekil 2.5a' da gösterilen cismin ağırlığı ve normal kuvvet etkisi altında dengededir. Normal kuvvet cisme yer tarafından uygulanan kuvvet olup, cismin ağırlığına eşittir. Cisim b'de gösterildiği gibi artan bir kuvvet ile çekiliyor. Başlangıçta cisim durağan haldeyken, çekme kuvveti arttıkça statik sürtünme kuvveti f_s de artmaya devam eder. Bir yerden sonra çekme kuvveti, statik sürtünme kuvveti f_s 'den daha büyük olduğunda cisim serbest kalır ve kaymaya başlar. Çekme kuvvetiyle kritik noktaya c'de ulaştığı görülür ve bu kritik noktayı aştığı anda cisim artık denge durumundan çıkar. Son olarak d'de görüldüğü üzere, cisim kaymaya başladığı anda sürtünme kuvveti de azalır ve sabite yakın bir şekilde kalır. Cismi hareket halinde tutmak için gerekli olan kuvvet, cismi harekete geçirmek için gerekli olan kuvvetten daha az olduğu görülür. Bu nedenle statik sürtünme katsayıları kinetik sürtünme katsayılarından büyüktür[52]. Fikir sahibi olunması açısından aşağıda Çizelge 2.1'de bazı malzemelere yönelik statik ve kinetik sürtünme katsayıları verilmiştir.

Çizelge 2.1 Yaklaşık Sürtünme Katsayıları[52]

Malzeme	Statik Sürtünme Katsayısı (μ_s)	Kinetik Sürtünme Katsayısı (μ_k)
Çelik üzerinde çelik	0,74	0,57
Çelik üzerinde alüminyum	0,61	0,47
Çelik üzerinde bakır	0,53	0,36
Çelik üzerinde pirinç	0,51	0,44
Dökme demir üzerinde çinko	0,85	0,21
Dökme demir üzerinde bakır	1,05	0,29
Cam üzerinde cam	0,94	0,40
Cam üzerinde bakır	0,68	0,53
Teflon üzerinde teflon	0,04	0,04
Çelik üzerinde teflon	0,04	0,04

Birbirlerine göre hareket eden yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde olup, olmaması ve bu yağlayıcı durumuna göre sürtünme olayı kuru sürtünme, sınır sürtünme ve yarı sıvı sürtünme (karışık sürtünme) ve sıvı sürtünme (hidrodinamik sürtünme) olmak üzere dört başlık altında incelenebilir.

2.1.2 Sürtünme türleri

2.1.2.1 Kuru sürtünme

Birbirlerine göre hareket eden yüzeyler, aralarında herhangi bir yağlayıcı madde olmaksızın birbirine doğrudan doğruya temas halinde olursa, bu sürtünme olayı kuru sürtünme olarak ifade edilir. Şekil 2.6'da kuru sürtünme örneği görülmektedir.



Şekil 2.6 Kuru sürtünme mekanizması

2.1.2.2 Sınır sürtünme

Birbirlerine göre hareket eden yüzeyler arasındaki yağlamanın en düşük seviyede tutulduğu, bu yüzeylerin neredeyse birbirine değecek halde çalıştığı durumda meydana gelen sürtünme şeklidir. Şekil 2.7 'de sınır sürtünme mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Sınır sürtünme mekanizması

2.1.2.3 Yarı sıvı sürtünme (Karışık sürtünme)

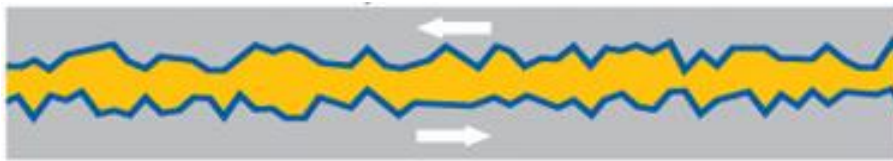
Birbirlerine göre hareket eden yüzeyler arasında yağlamanın kısmi olarak yapıldığı durumlarda ortaya çıkar. Sıkça yüzeylerin ilk harekete başladığı anlarda, rastlanılan bir durumdur. Şekil 2.8'de gösterilen yarı sıvı sürtünme mekanizması, normal çalışma başlayınca sıvı sürtünmeye dönüşür.



Şekil 2.8 Yarı sıvı sürtünme mekanizması

2.1.2.4 Sıvı sürtünme (Hidrodinamik sürtünme)

Birbirlerine göre hareket eden yüzeyler arasında doğrudan bir sürtünme meydana gelmemekte ve yüzeyler her zaman çok ince bir yağ filmi ile kaplanmış haldedir. Şekil 2.9'da gösterilen sıvı sürtünmede yüzeylerin tüm pürüzleri yağlayıcı dolmuş halde olduğundan, sürtünme yüzeyler yerine sıvı tabakalar arasında olur. Sıvı sürtünmede yüzeylerin hareketine karşı gösterilen direnç kuru sürtünmeye nazaran oldukça azdır.



Şekil 2.9 Sıvı sürtünme mekanizması

Otomobil motorlarında, ilk hareket esnasında yataklarda, piston-segman ve silindir cidarları arasında yarı sıvı sürtünme veya sıvı sürtünme oluşması mümkündür. Çünkü motor durmuş halde olduğu durumda yağlama yağının büyük bir kısmı, yüzeylerden akarak ve parça yüzeylerinde ince bir yağ filmi bırakır.

İlk çalışma esnasında motordan hareket alan yağ pompasının hareket eden tüm yüzeylere yeterli yağı iletmesi için bir zaman gerekeceğinden bu durumda, sıvı ve yarı sıvı sürtünmesi görmek kaçınılmazdır. Motor çalışmaya başladıktan sonra motordan hareket alan yağ pompasını yeterli basınç ve debide gönderdiği yağlama yağı ile sıvı sürtünme mekanizması oluşturulmuş olur.

Bir elektrik motoru ile beslenen bir yağ pompası kullanıp motor çalışmadan belli bir zaman önce, sistemin yağlanması sağlanırsa, ilk çalışma esnasında sıvı sürtünme mekanizmasına imkân tanınabilir.

2.1.3 İçten yanmalı motorlarda sürtünme

İçten yanmalı makinelerde sürtünmeler yağ filmindeki hidrodinamik gerilmelerden ve metal metale olan temaslardan kaynaklanmaktadır. Sürtünme kayıplarının içten yanmalı motorlardaki güç kaybını dikkate değer bir kısmını oluşturmasının fark edilmesiyle, sürtünme kayıplarının azaltılması makine tasarımı ve operasyonunda büyük önem arz etmiştir[53].

İçten yanmalı makinelerde sürtünme kayıpları üç kategoriye ayrılabilir. Bunlar mekanik sürtünme, pompalama ve aksesuar işi kayıplarıdır. Mekanik sürtünme kayıpları; makedeki krank şaft, piston, segmanlar, valf mekanizması gibi parçaların hareketleri esnasında oluşan kayıplardır. Pompalama işi kayıpları; silindir içerisine temiz hava alımı ve yanma sonrasında oluşan egzoz gazlarının dışarı atılımı sırasında oluşan kayıplardır. Aksesuar işi kayıpları ise yağ pompası, tatlı su pompası, yakıt pompası, alternatör, fan gibi donanımlarının hareketlerini makineden alması sebebiyle oluşturdukları kayıplardır[53].

2.1.3.1 İçten yanmalı motorlarda sürtünme ölçüm yöntemleri

İndike ortalama efektif basınç, fren ortalama efektif basınç farkı

İlk önce silindirlere alınan indikatör diyagramları ile makineye indike ortalama efektif basıncı (IMEP) bulunur. Ardından makinenin çıkış gücü yani fren ortalama efektif basıncı (BMEP), çıkış şaftına bağlanan bir dinamometre yardımıyla ölçülür.

Ortalama efektif basınç (MEP) makinenin her bir deplasman hacmi üzerindeki yükü ifade eder. Bununla birlikte basınç-hacim diyagramlarının entegral hesabıyla, yanma ve silindir içi basıncın yaptığı toplam işlerin hesaplanması mümkündür. Burada sonuç bize indike ortalama efektif basıncı (IMEP) verir[54].

$$IMEP = \int_0^{360 \times i} \left(\frac{P}{i \times V \times x} \right) dV \quad (2.2)$$

Burada;

P ; Silindir içi maksimum basıncı

V ; Silindir hacmi

n ; Motor devri

i ; Her bir çevrim için devir sayısı (2 zamanlı motor için 1, 4 zamanlı motor için 2 alınır.)

z ; Silindir sayısı

Makineden ne kadar enerji elde edildiğinin göstergesi fren ortalama efektif basınç (BMEP) değeridir ve şu şekilde hesaplanır[54].

$$BMEP = \left(\frac{BP \times i}{V \times z \times n} \right) \quad (2.3)$$

BP ; Fren gücü

V ; Silindir hacmi

n ; Motor devri

i ; Her bir çevrim için devir sayısı (2 zamanlı motor için 1, 4 zamanlı motor için 2 alınır.)

Mekanik sürtünme enerji kayıpları sürtünme ortalama efektif basıncı (FMEP) olarak ifade edilir. İndike ortalama efektif basıncı (IMEP) ve fren ortalama efektif basınç (BMEP) ile aşağıdaki doğrudan ilişkilidir[54].

$$IMEP = BMEP + FMEP \quad (2.4)$$

$$FMEP = IMEP - BMEP \quad (2.5)$$

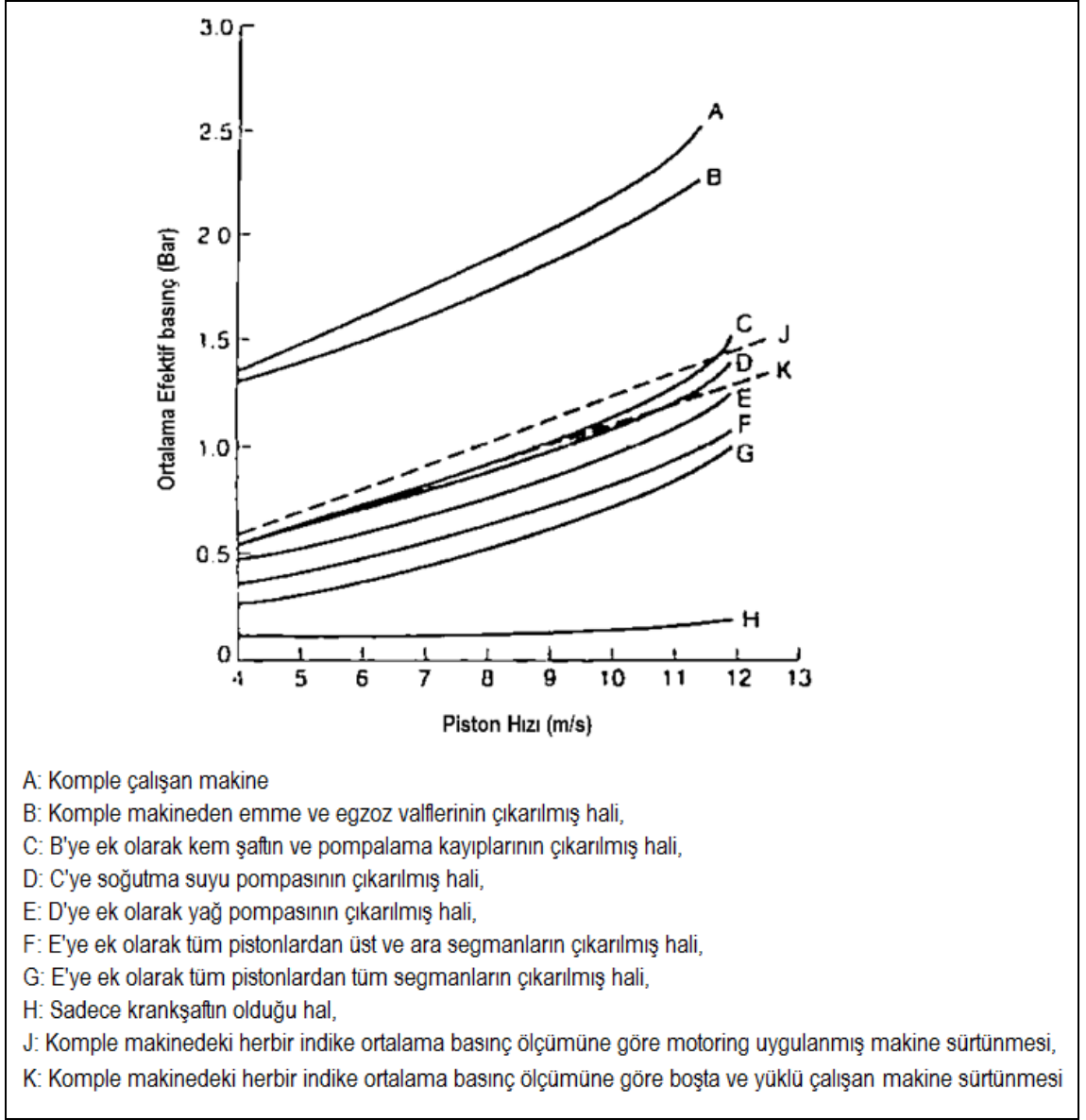
Silindir içi basınç bilgileri olmadığında ise fren özgül yakıt sarfiyatı (BSFC) silindir sürtünme güç kayıplarını hesaplamada kullanılabilir. İki konfigürasyon arasındaki fren özgül yakıt sarfiyatı (BSFC) farkı sürtünme değişimlerini hesaplamaya olanak sağlar. Bununla birlikte silindir sürtünme kayıpları makine çıkış gücüne oranla oldukça küçüktür. Bu nedenle hesaplanması güçtür.

Motoring sürtünme ölçüm yöntemi

Bu yöntem kolay olması sebebiyle en sık yöntemlerden biridir. Testlerde motor bir dinamometre ile tahrik edilir. Sabit devri sağlamak için gerekli tork kaydedilir. Kaver çıkarılır ve motor dinamometre ile aynı devire çıkacak şekilde tahrik edilir. Aynı devre çıkıldığında tork kaydedilir. Daha sonra segmanlar teker teker çıkartılır ve motor aynı devre çıkacak şekilde tekrar tekrar tahrik edilir. Ölçülen torklar kaydedilir. Torktaki değişim ile bileşenlerin sürtünmeye olan etkileri saptanır. Son olarak piston-biyel birlikte çıkartılır ve motor tekrar tahrik edilir. Torktaki değişim piston ve biyelin sürtünmeye etkisini gösterir.

Bu ölçümdeki olumsuzluklar, silindir içi basıncın etkisinin ölçülmemesi, testin motorun normal çalışma sıcaklığında yapılmaması, her bileşenin ayrı ayrı etkisinin doğru olarak belirlenememesi (örneğin bir segman çıkartıldığında, diğer segmanlara daha fazla yağ

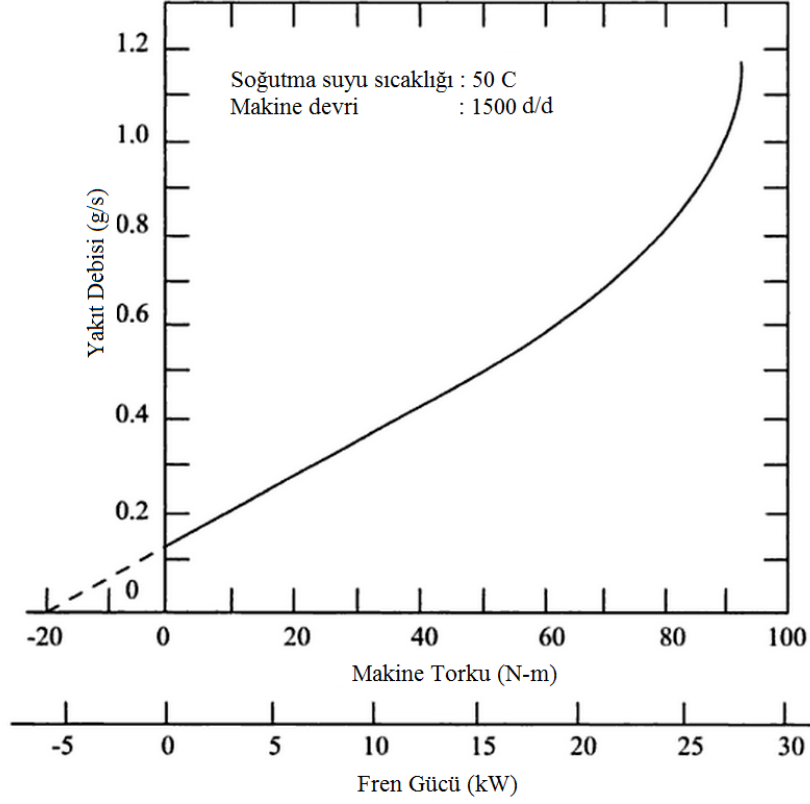
akışı olması ve bunun toplam sürtünmeyi azaltması gibi) şeklinde sıralanabilir[55, 57]. Şekil 2.10'da parçaların çıkarılmasıyla sürtünmeye olan etkiler gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Belli parçaların çıkarılmasıyla sürtünmeye olan etki[53].

Willians çizgi yöntemi

Sabit bir makine devrinde farklı yüklerle karşı gelen yakıt sarfiyatları bir grafikte gösterilir. Bulunan bu noktalara göre bir doğru elde edilir. Bu doğrunun Şekil 2.11'deki gibi ekstrapolasyonla koordinat eksenlerinde ikinci bölgeye doğru uzatılıp x eksenine eksi tarafta kesiştirilmesiyle sürtünme kayıpları belirlenir[57]. Burada 0 ile -20 aralığı belirlenen sabit devirdeki güç kaybını, yani sürtünme kayıplarını ifade eder[56].



Şekil 2.11 Willians çizgi metodu[56].

Morse yöntemi

Çok silindirli motorlara uygulanabilen bir yöntemdir. Motor normal şartlarda çalıştırılır ve gücü not edilir. Daha sonra bir silindirin ateşlemesi kesilir ve motor devri bir önceki devre tekrar getirilerek güç tekrar ölçülür. İlk durum ile ikinci durum arasındaki fark, ateşlemesi kesilen silindire ait gücü verir. Bu fark o silindirde yanma ve pompalama kayıplarının olmamasından kaynaklanır. Bu işlem her silindir için ayrı ayrı yapıldığında tüm silindirlere ait güçler bulunmuş olur ve piston segman grubu sürtünmelerine ait fikir sahibi olunabilir[56,57].

2.2 Aşınma

2.2.1 Aşınmanın esasları

Aşınma, katı haldeki cisimlerin yüzeylerinde, çeşitli etkenler altında oluşan malzeme kayıpları veya yer değiştirme olarak ifade edilebilir[58,59]. 1979'da DIN 50320'ye göre

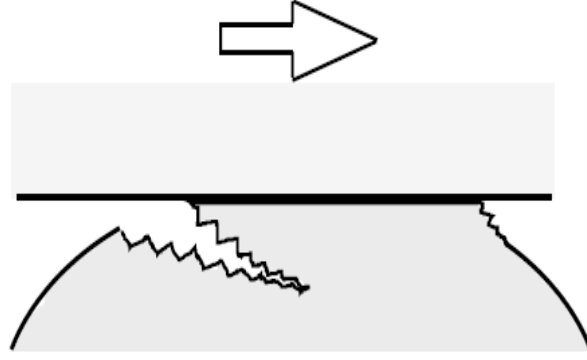
ise aşınma, kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı, gaz) teması sonucunda, mekanik etkileşimle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu ortaya çıkan yüzeysel bozulmalardır[60]. Dinamik kuvvetler artarak, gürültü ve titreşimlerin oluşumuna sebep olur böylece verim de azalır. Sonuç olarak karşılıklı çalışan yüzeylerde oluşacak aşınmalarla yüzeylerden beklenen performans da alınamaz[58].

Aşınma, hayatımızın her karesinde kullandığımız en basit aletlerden, en gelişmiş cihazlara kadar her yerde oluşabilecek ve istenmeyen bir malzeme sorunu olmaktadır. İstatistiklere göre, aşınma makine parçalarının yaklaşık %70'inin kullanılamaz hale gelmesindeki en büyük etkenlerden birisi olduğundan, günümüzde malzeme kaynaklı oluşan maliyetlerin azaltılması için aşınmadan kaynaklanan sorunların da en düşük seviyelerde tutulması zorunluluğu doğurmuştur. Dolayısıyla, aşınmaya dayanıklı yeni malzemeler ve bilinen malzemelere uygulanabilecek yeni yüzey işlemleri ile aşınma problemlerini minimize etme çabası sürekli var olan bir çalışma alanı doğurmuştur[61,62]. Yapılan bir çalışmada aşınmadan dolayı Kanada ekonomisinde yıllık 3,9 milyar dolar kayıp olduğu ve bu tutarın 2,5 milyar dolarlık kısmının yalnız abrasif aşınmadan kaynaklandığı açıklanmıştır[63]. Yine bir çalışmaya göre Almanya'da da abrasif aşınmadan dolayı oluşan zararın yıllık 5 milyar DM'dan fazla olduğu belirtilmiştir. Bu maliyetlerin linyit ve antrasit madenciliğinde 1,5 milyar DM, metalürji dallarında 2 milyar DM, plastik imalat sanayinde 0,5 milyar DM ve öğütme, ziraat, inşaat gibi diğer iş kollarında ise 1 milyar DM olarak dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Aşınmadan dolayı meydana gelen ekonomik kaybın ABD'de Gayri Safı Milli Hasıla'nın (GSMH) %2,5'ni, Almanya'da ise %4,5'ni oluşturduğunu ortaya konulan başka bir rapordur[64,65].

2.2.2 Aşınma türleri

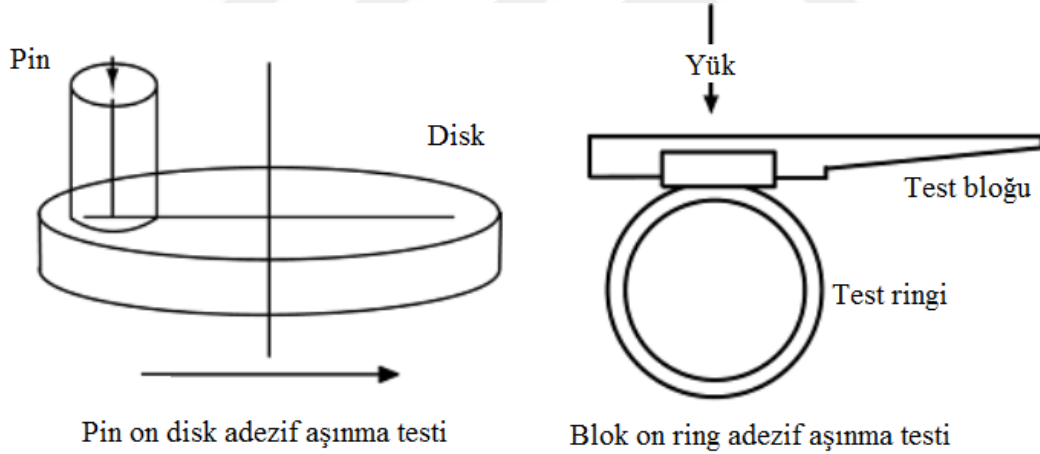
2.2.2.1 Adezif aşınma

Adezyon olarak da ifade edilen adezif aşınma sıklıkla şiddetli aşınma olarak tanımlanır. Adezif aşınma, moleküler kuvvetlerin etkisiyle temas yüzeylerinde bölgesel kaynak bağlarının kırılması sonucuyla oluşan malzeme kaybıdır[61, 66, 67, 68]. Şekil 2.12'de adezif aşınma şekli verilmiştir.



Şekil 2.12 Adezif aşınma[66]

Karşılıklı çalışan metal yüzeyleri ne kadar hassas işlenmişse de yüzeyler asla moleküler düzgünlükte değildirler. Cisimlerin yüzyelerindeki bu pürüz tepeleri birbirleriyle temas ettikleri anda moleküler adezyon ile kaynama olayını meydana gelir. Malzeme kendi ağırlığı veya herhangi bir kuvvet etkisiyle çok küçük olan pürüz tepelerine basınç uygulayacak ve bu kuvveti taşıyamayan pürüzler plastik deformasyona uğrayacaklardır[61, 66, 67, 68].



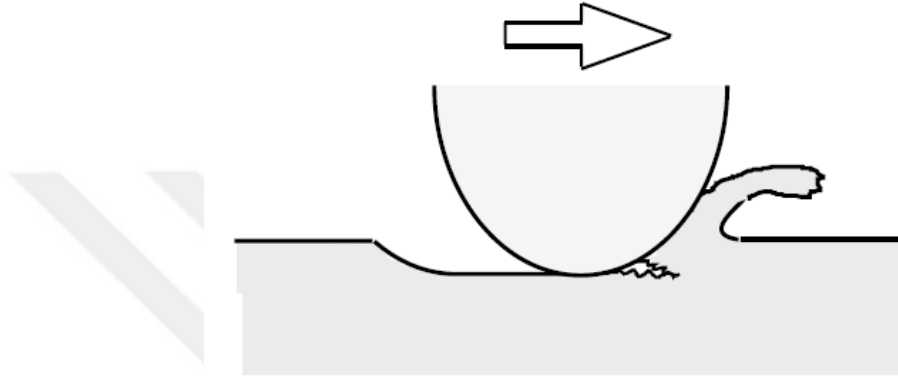
Şekil 2.13 Adezif aşınma testleri[67].

Yüzeyde absorbe halde olan sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları bu basınç parçalanarak ve malzemelerin moleküllerinin direkt temas haline geçmelerine olanak sağlar. Böylelikle bölgesel kaynak bağları meydana gelir. Bu sırada malzemelerin birbirine göre hareketi de söz konusu ise yüzeydeki sıcaklık yükselir hatta ergime noktasına kadar ulaşabilir ve böylece kaynama yerinden veya metal yüzeyden bir miktar parçacık kopar. Bu metalik parçacıklar, ara yüzeyde serbest halde dolaşabilecekler veya metallerden birisine bağlanabilirler. Burada arada aşınma,

herhangi farklı bir malzeme olmaksızın sadece karşılıklı çalışan iki eleman arasındadır. Bu aşınmanın test işlemi yukarıda Şekil 2.13'te gösterilmiştir[61, 67, 68].

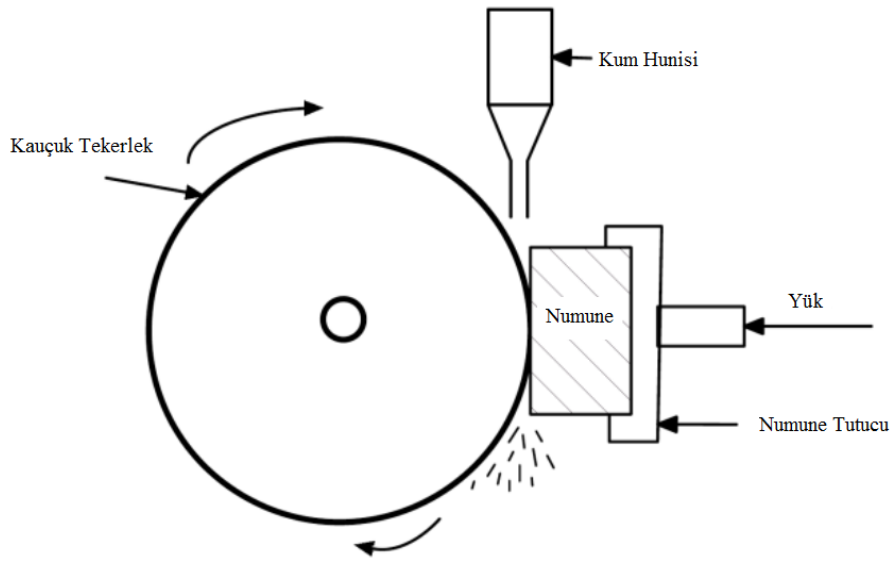
2.2.2.2 Abrazif aşınma

Abrazif aşınmada en büyük etken birbirlerine göre hareket eden malzemeler arasında, kayma veya yuvarlanma hareketi yapan sert, üçüncü bir malzemedir. Abrazif aşınma Şekil 2.14'te gösterilmiştir.



Şekil 2.14 Abrazif aşınma[66]

Bu üçüncü malzeme, karşılıklı hareket eden iki malzemenin herhangi birinden kopacak aşınma veya oksit parçacıkları gibi bir iç kaynaklı malzeme veya dışarıdan sisteme dâhil olan toz veya mineraller gibi dış kaynaklı bir malzeme olabilir[61, 66, 67, 68].

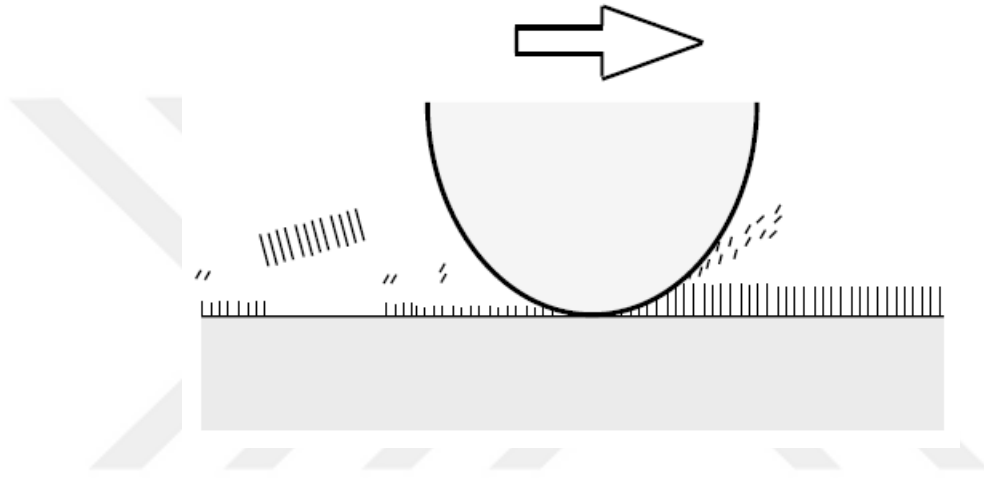


Şekil 2.15 Kauçuk tekerlekle abrazif aşınma testi[68]

Dış kaynaklı parçacık nedeniyle oluşan abrazyif aşınma oranları genelde, iç kaynaklı parçacık nedeniyle oluşan abrazyif aşınma oranlarından daha düşüktür[61, 67, 68]. Abrazyif aşınmaya ait bir test düzeneği Şekil 2.15 gösterilmiştir.

2.2.2.3 Korozyif aşınma

Korozyif aşınma, aşınma partiküllerinin hava veya sıvı korozyif kimyasallar ile temasları sonucu oluşan bir aşınma türüdür. Daha çok metallerin oksidatif aşınmalarını, yani paslanmasını temsil etmektedir. Korozyif aşınma Şekil 2.16'da gösterilmiştir[61, 67, 68].

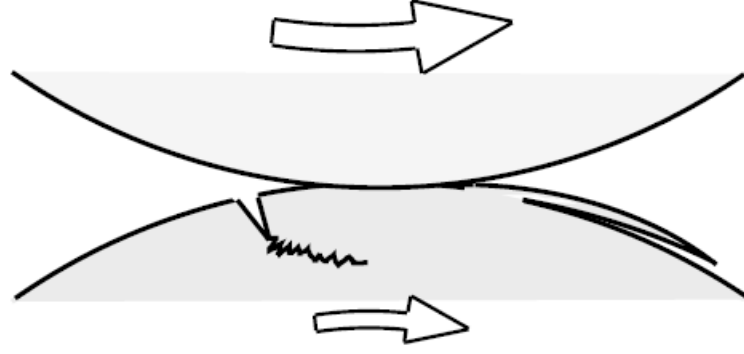


Şekil 2.16 Korozyif aşınma[66]

Bilindiği üzere metallerin kararlı hallerinin bileşik haline dönme eğilimi oldukça yüksektir ve buldukları ortamlarda orta elemanları ile tepkimeye girerek önce iyonik hale geçer ve farklı elementler ile birleşerek bileşik haline geçerler. Böylece kimyasal olarak değişime uğrayıp bozunurlar. Demirin oksijenle tepkimeye girip demiroksiti yani pası oluşturması buna örnek olarak verilebilir[61, 67, 68].

2.2.2.4 Yorulma aşınması

Temas halindeki malzemelerde var olan tekrarlı dönümler adezyif veya abrazyif aşınma açısından aşınma parçacıklarının oluşuna imkân vermemektedir. Bu şekilde temas halinde olan yüzeylerde farklı bir tür olarak yorulma aşınmaları görülür. Yorulma aşınması Şekil 2.17'de görülmektedir[61, 67, 68].



Şekil 2.17 Yorulma aşınması[66]

Bu tür aşınmalar dolayısıyla genelde dönerik sürtünen malzemeler üzerinde olmaktadır. Temas yüzeylerinde zamanla ezilmeyle metal yorgunluğu, dolayısı ile de çatlaklar ve kırılmalar oluşur[61, 67, 68].

2.2.3 İçten yanmalı motorlarda aşınma

Motorlarda yağlama yağları; yağ filmi oluşturarak yataklarda, silindir-segman çifti arasında metal metale teması önlemeyi amaçlar. Sürtünmeler ve aşınmalar azaltıldığında motorlarda güç kaybının ve malzeme zararlarının önüne geçilebilir. Fakat aşınma ve sürtünme asla yok edilemez. Motorlarda meydana gelen aşınmaların %75'lik bir kısmının ilk çalışma sürecinde, yani motor gövdesinin soğuk olduğu zaman gerçekleşmektedir. İlk çalışma esnasında yağlama yağı henüz motor karterinde bulunduğu için, yağın sisteme aktarılması sırasında geçen süre aşınmalarda en büyük etkenlerdendir[62].

Bu amaçla gemilerde ilk çalıştırma öncesi ceket soğutma suyu ısıtılarak motor gövdesinin de ısınması sağlanır. Diğer taraftan da motorlara çalıştırılmadan önce ön yağlama işlemi uygulanıp, bir elektrik motoru vasıtasıyla düşük devirde bir hareket verilerek yağlama yağının motorun çalışan tüm yüzeylerine ulaştırılması amaçlanır[69].

Motorlarda kullanılan dökme demir silindir gömleklerinin yapısal özellikleri, yüzey pürüzlülüğü ve sertliğin yetersiz olması silindir gömleği yüzeylerinde büyük ölçülerde aşınmalara neden olmaktadır. Silindir içerisinde yanma etkisi ile oluşan kuvvetler segmanları silindirlere doğru yaslar. Bu yaslanma kuvveti ile segman ve silindir arasında

sürtünme kuvvetleri oluşur ve bu da yüzeylerde aşınmalara neden olur. Silindirlerde üst ölü noktaya doğru yağlama diğer bölgelere göre daha düşüktür. Bu bölgelere yağlama yağı daha az ulaştığı ve yanma etkisi ile yandığından aşınmaların silindir içinde en yoğun görüldüğü kısımlardır[62].

Silindir gömleğinde yoğun bir şekilde görülen aşınma türleri korozif aşınma ve abrazif aşınmadır. Korozif aşınmaya neden olan önemli iki kimyasal bileşen vardır. Bu bileşenler sülfürik asit (H_2SO_4) ve hidroklorik asittir (HCl). Silindir içerisinde sülfürik asit oluşumuna neden olan etkenler; su damlacıkları, su sızıntıları, soğuk silindir yüzeyleri, temizleme katkı malzemeleri ve yağ filmi kusurları şeklinde sıralanabilir. Hidroklorik asit oluşumuna neden olan etkenler ise emme havası içerisindeki tuz, yakıtta karışan deniz suyu, silindir yağlama yağına karışan deniz suyu, hava soğutucusundaki kaçaklar ve yağ filmi kusurları şeklinde sıralanabilir[69].

Abrazif aşınmalar ise iki şekilde görülür. İlk şekli karıncalanma şeklindedir. Bunun nedenleri yağ filmi kusurları, elemanlara ait malzeme, tasarım, uyuşum sorunları, mekanik yük, termal yük, segman tansiyonunun bozulması, segmanların takılması sırasında deformasyon, yanlış segman ayarı, çok yüksek silindir yağı dozajı, su damlacıkları, temizleme katkı malzemeleri şeklinde sıralanabilir. İkinci abrazif aşınma şekli ise çizilmelerdir. Bunun da nedenleri, yakıtta kirlilik, emme havasında kirlilik ve aşınma parçacıkları şeklinde sıralanabilir[69].

2.2.4 Aşınma ölçüm yöntemleri

Malzemede olan hacimsel kayıp olarak ifade edilen aşınmaların ölçümü, temas halinde olan parçalardan herhangi birinin veya her ikisinin de son halinin ilk haline olan kıyası ile mümkündür. Dört farklı yöntem ile aşınma ölçümleri yapılabilir.

2.2.4.1 Ağırlık farkı yoluyla ölçme

Bu yöntemin tercih edilmesindeki en önemli neden ekonomik bir ölçme tekniğı olmasıdır. Ölçüm için 1 mg, 0,1 mg veya 0,01 mg hassasiyetinde teraziler kullanılabilir. Her numune için metre veya kilometre olarak tespit edilen sabit bir yol belirlenir. Deney öncesi ve sonrası numuneden birer tartım alınır ve aradaki tartım farkı

hesaplanıp aşınma miktarı olarak tanımlanır. Aşınma miktarı gram veya miligram cinsinden, sürtünme yoluna göre birim yola (km veya m) karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı ile ifade edilir. Aşınma birim alan ve birim hacim için de ifade edilebilir[43, 48].

2.2.4.2 Kalınlık ölçme yöntemi

Sürtünme sonucunda oluşan aşınmayla ortaya çıkan boyut değişikliğinin ölçümü, başlangıçtaki değerle karşılaştırılma sonucunda elde edilir. Kalınlık olarak tespit edilen değer ile hacimsel hesap yapılarak birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır. Kalınlık ölçümü 1 µm duyarlıktaki hassas ölçme aletleri ile yapılabilir[43, 48].

2.2.4.3 İz değişiminin ölçülmesi yöntemi

Sürtünmeye maruz kalacak alan üzerine, plastik deformasyon yoluyla geometrisi belirli bir iz oluşturulur. Deney süresince bu ize ait karakteristik bir boyutun, örneğin çapının değişimi ölçülerek aşınma miktarları ortaya konulur. Bu tip ölçümlerde en fazla tercih edilen ölçüm aleti Vickers veya Brinell ismi ile anılan sertlik ölçme aletleridir. Bu aletlerle, bilye veya elmas pramatın tarafından sürtünme yüzeyine bırakılan izin çapındaki değişim mikroskop yardımıyla ölçülerek aşınma hesabı yapılır[43, 48].

2.2.4.4 Radyoizotoplarla ölçme yöntemi

Bu yöntemde aşınma ölçümü; proton nötron veya yüklü atom parçacıklarının aşınmış yüzeye bombardıman edilip, radyoaktif hale getirilmesi ile mümkündür. Bu yöntemin avantajlı yanı, aşınmaların yüksek hassasiyetlerle ölçülebilmesi ve sistem içerisindeki çalışma şartlarının değiştirilmeden ölçü alınabilmesidir. Dezavantajı ise ekonomik olmamasıdır. Bu sebeple özel problemlerin çözümü dışında sık kullanılan bir aşınma ölçüm yöntemi değildir[43, 48].

MATERYAL VE METOT

Gerçek şartlarda motorların çalışması esnasında yağlama yağı içerisine farklı özelliklerde yakıt karışabilmekte, zaman zaman da farklı çalışma yüklerinden dolayı yüzey sıcaklıkları değişmektedir. Bu değişken şartlar özellikle yağ filminin incelendiği düşük motor devri ve piston hızlarında segman-silindir çifti arasındaki sürtünme ve aşınma davranışlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Yukarıda bahsedilen şartların sürtünme ve aşınmaya olan etkilerinin deneysel olarak araştırmak amacıyla lineer hareketli bir aşınma cihazı tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır. Bu çalışmada segman-silindir çifti arasındaki sürtünme ve aşınma davranışlarına etki eden optimum parametreler Taguchi metoduna göre belirlenmiştir.

3.1 Yağlayıcılar ve yakıtlar

Optimum parametrelerin belirlenmesi amacıyla tasarlanan aşınma cihazında, iki zamanlı kroşetli ağır devirli motorlarda silindir yağlama yağı olarak kullanılan Exxon Mobil MobilGard 570 kullanılmıştır.

Çizelge 3.1 Silindir yağlama yağı özellikleri[70]

ÖZELLİKLER	ASTM	DEĞER
SAE derecesi	-	50
Özgül Ağırlık (15°C)	-	0,937
Parlama Noktası, °C	92	256
Akma Noktası, °C	97	-9
Viskozite cSt, 40 °C	445	229
Viskozite cSt, 100 °C	445	21
Viskozite İndeksi	2270	104
TBN, mg KOH/g	2896	70

Yağlama yağının özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Deneylerde iki farklı yakıt türü yakıt kullanılmış olup özellikleri Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.2 Marine Diesel Oil özellikleri[71]

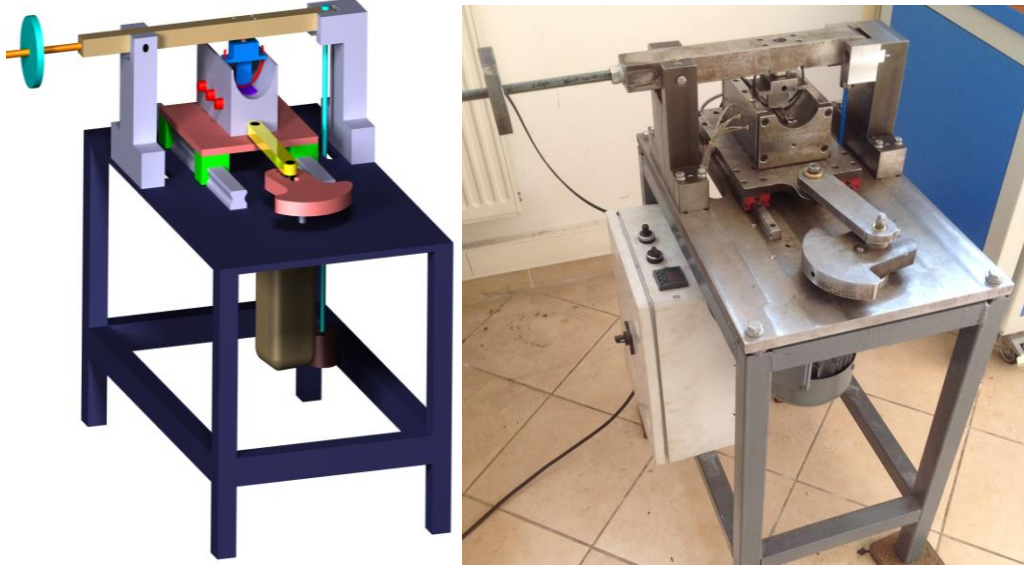
Özellik	Değeri	ISO	ASTM
Özgül Ağırlık (15°C)	0,880	3675	D 1298/85
Viskozite cSt, 40 °C	6-11	3104	D 445/96
Setan İndeksi	50	4264	D 976/91
Parlama Noktası, °C	60	2719	D 93/97
Sülfür, % (m/m)	0,4	8754	D 4294/90
Su, % (v/v)	0,3	3733	D 1744
Toplam Sediment, % (m/m)	0,1	10307-2	-
Akma Noktası (Kış), °C	0	3016	D 97/96
Akma Noktası (Yaz), °C	6	3016	D 97/96
Kül İçeriği, %	0,01	6245	-
Karbon Artığı, % (m/m)	0,1	6615	D 189 / 97
Total Asitlik Sayısı, (TAN), mg KOH/g	0,5	6618	D 974-97
Alt Isıl Değeri, kcal/kg	9800	8217	-

Çizelge 3.3 Intermediate Fuel Oil özellikleri[72]

Özellik	Değeri	ISO	ASTM
Özgül Ağırlık (15°C)	0,950	3675	D 1298/85
Viskozite cSt, 50 °C	380	3104	D 445/96
Parlama Noktası, °C	90	2719	D 93/97
Sülfür, % (m/m)	1	8754	D 4294/90
Su, % (v/v)	0,5	3733	D 1744
Toplam Sediment, % (m/m)	0,1	10307-2	-
Akma Noktası, °C	30	3016	D 97/96
Kül İçeriği, %	0,1	6245	-
Karbon Artığı, % (m/m)	-	14597	-
Vanadyum, mg/kg	-	10478	-
Alt Isıl Değeri, kJ/kg	9500	8217	-

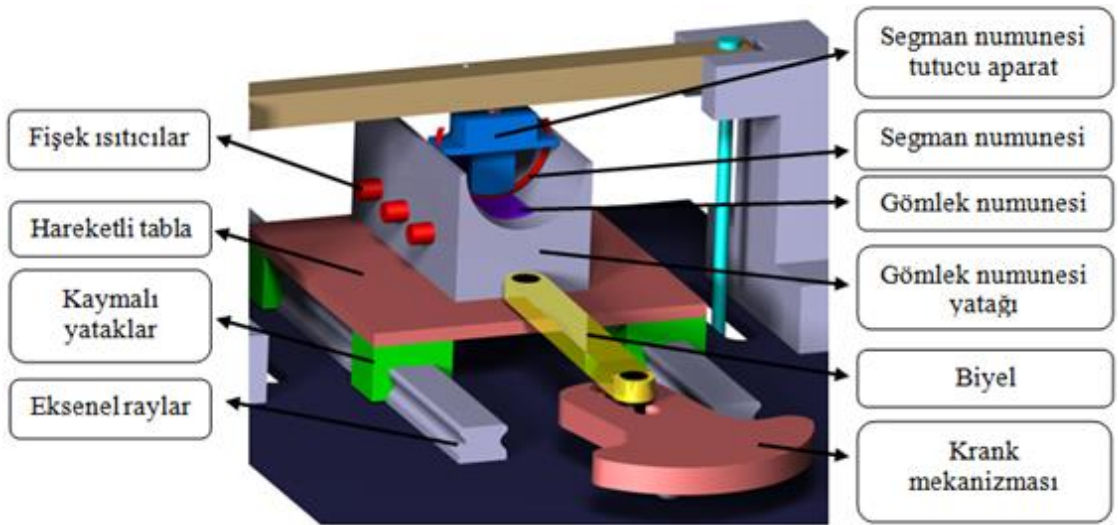
3.2 Deney düzeneği

DeneySEL çalışmalarda kullanılmak üzere tasarlanan aşınma cihazı düzeneğinin katı modeli ve imal edilmiş hali aşağıda Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Lineer hareketli aşınma cihazı katı modeli ve imal edilmiş hali

İmal edilen aşınma cihazının detaylı görünümü Şekil 3.2'deki katı modelde görülmektedir. Model üzerinde görüleceği üzere cihaz, 0,75 kW Volt marka VM 90S-6 model elektrik motorundan hareket alan krank mekanizması ile kaymalı yataklar üzerinde hareket eden bir tabladan oluşmaktadır. Tabla üzerinde aşınma testlerinde kullanılan gömlek numunesi tutucusu bulunmaktadır. Elektrik motoru tahrikiyle hareket eden tabla üzerindeki gömlek numunesi doğrusal olarak git-gel hareketi yapmaktadır. Cihazın üst kısmında ise segman tutucu, üç eksenli bir kuvvet sensörü ve yükleme kolu bulunmaktadır. Cihazın imal edilmiş hali detaylı olarak Şekil 3.3'te görülmektedir.

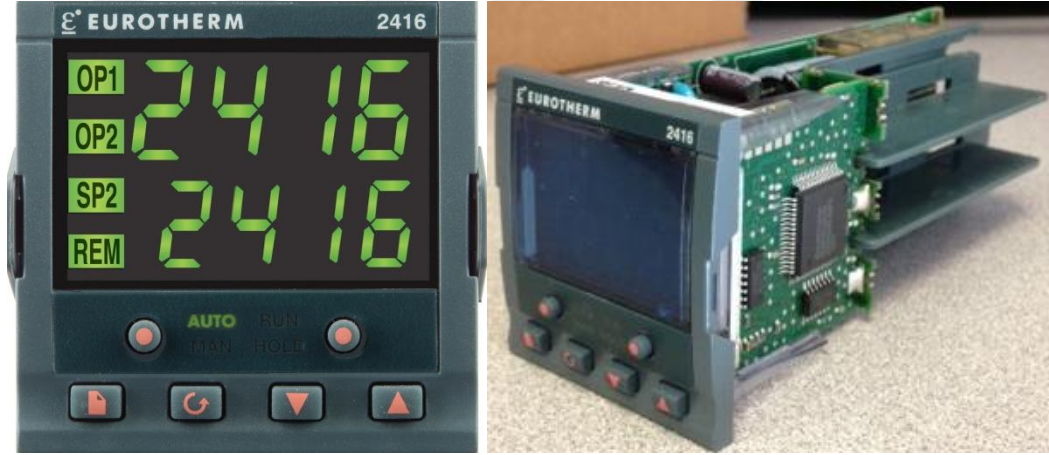


Şekil 3.2 Aşınma cihazı detaylı katı modeli



Şekil 3.3 Cihazın imal edilmiş detaylı görünüm

Yüzey sıcaklığının aşınma ve sürtünme davranışları üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla Şekil 3.2'de de görüldüğü üzere, gömlek numunesi tutucusu altına her birinin ısıtıcı gücü 250 Watt olan üç adet fişek tipi ısıtıcı yerleştirilmiştir. Silindir yüzey sıcaklıklarını kontrol edebilmek için Şekil 3.4'de gösterilen Eurotherm marka 2416 model sıcaklık kontrol ünitesi kullanılmıştır.



Şekil 3.4 Eurotherm sıcaklık kontrol ünitesi

Devir değişiminin aşınma ve sürtünme davranışlarına etkisini incelemek amacıyla elektrik motoru, Şekil 3.5'te gösterilen ABB marka ACS150 model inverter (frekans dönüştürücü) ile değişken devirlerde çalışabilir hale getirilmiştir.

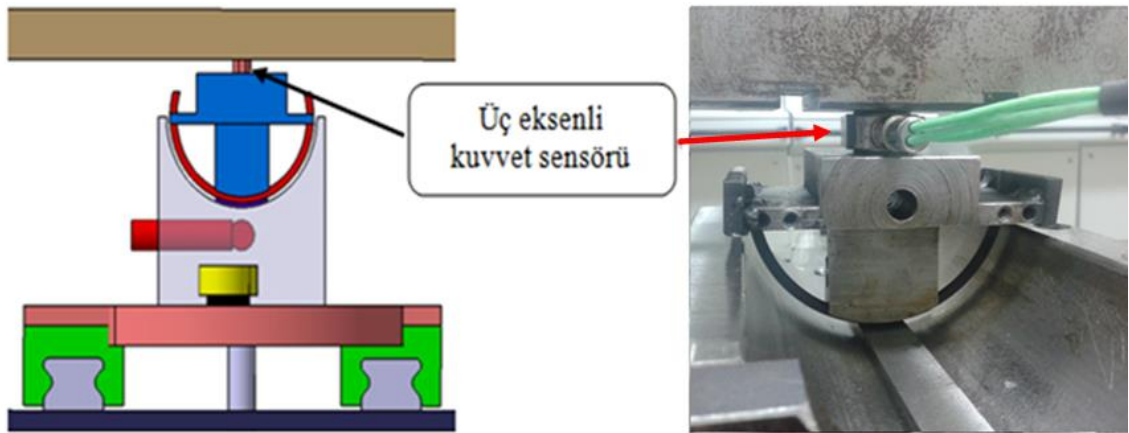


Şekil 3.5 ABB ACS150 İnverter

Silindir içerisinde yanmadan kaynaklanan gazların segman silindir yüzeyinde oluşturmuş olduğu kuvvetlerin aşınma ve sürtünme davranışlarını belirlemek amacıyla yük değişimine imkân sağlayan bir moment kolu imal edilerek aşınma cihazına bağlanmıştır. Moment kolu üzerindeki terazi düzeneğiyle aşınma ve sürtünme davranışlarının farklı yüklerle test edilme olanağı sağlanmıştır.

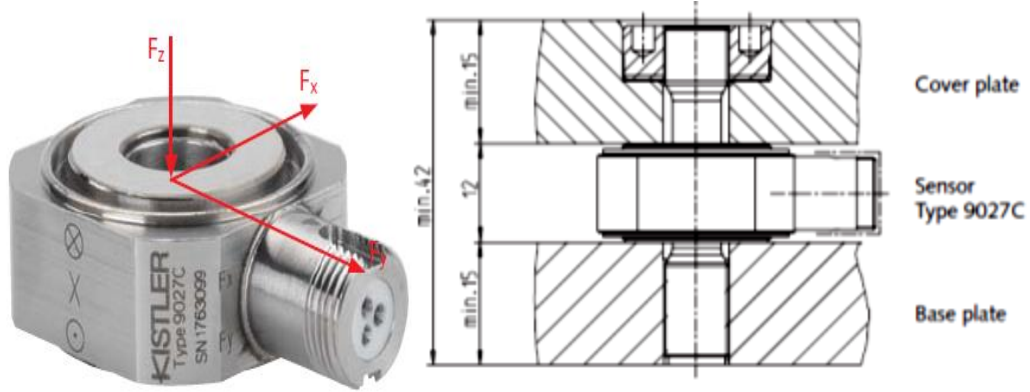
3.3 Sürtünme katsayılarının belirlenmesi

Sürtünme katsayılarının belirlenmesi için, Kistler 9027C üç eksenli bir kuvvet sensörü kullanılmıştır. Segman ve gömlek numuneleri arasındaki sürtünme kuvvetlerini ölçecek olan sensör sisteme Şekil 3.6'daki gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 3.6 Üç eksenli kuvvet sensörü

Üç eksenli kuvvet sensörünün çıkışlarından bir tanesiyle normal kuvvet ölçülürken, diğer bir çıkışından ise sürtünme kuvvetine ait değerler alınabilmektedir. Deneylerde kullanılan kuvvet sensörü görünümü Şekil 3.7’de görülmektedir.



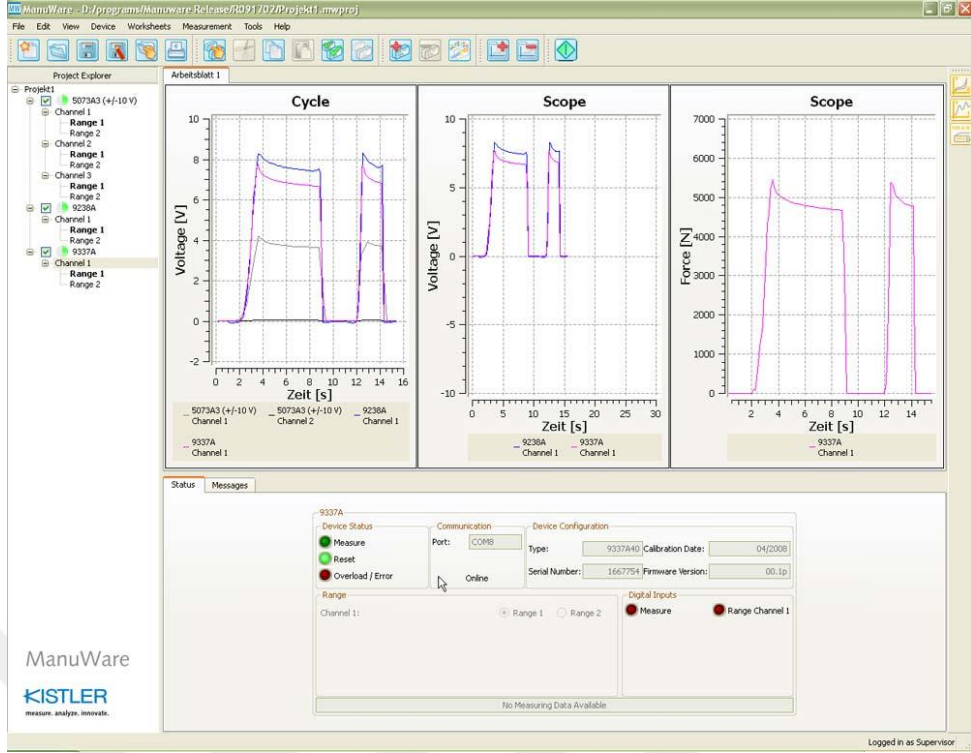
Şekil 3.7 Kistler 9027C Üç eksenli kuvvet sensörü ve montajı

Deney düzeneğinde sensör çıkış uçlarından pC (picocoulomb) seviyesinde alınan analog değerler Şekil 3.8’deki gibi Kistler 5073 model bir şarj amplifikatörü ile yükseltilmektedir.



Şekil 3.8 Şarj amplifikatörü

Şarj amplifikatöründe yükseltelen dijital veriler RS-232 protokol vasıtasıyla PC üzerindeki ManuWare yazılımına aktarılmaktadır. Yazılım arayüzü Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Kistler ManuWare yazılımı

3.4 Aşınma kayıplarının ölçülmesi

Aşınma kayıpları ölçümünde “Ağırlık Farkı Metodu” kullanılmıştır. Ağırlık ölçümlerinde Şekil 3.10’da gösterilen AND marka $\pm 0,0001$ gr hassasiyetinde bir terazi kullanılmıştır.



Şekil 3.10 Hassas Terazi

Numunelere deneylerden önce etanol ile temizleme işlemi uygulanmıştır. Etanol ile temizleme işlemi 3.11’de gösterilen Protech marka ultrasonik banyo aracılığıyla 50 °C sıcaklıkta 30 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.11 Ultrasonik Banyo

Yıkama işlemi sonrasında, numune üzerinde kalan etanol ve nemin uzaklaştırılması için Şekil 3.12’de görülen Nüve marka EV018 vakumlu fırın kullanılmıştır. Kurutma işlemi 105 °C’de 120 dakika süresince gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.12 Vakumlu Fırın

Temizlenip kurutulan numunelerin nemsiz ortamda oda sıcaklığına kadar soğutulması için Şekil 3.13’ da görülen bir desikatör kullanılmıştır. Desikatörlerde soğutma işlemi uygulanırken alt kısımlarına konulan silika ile nemin tutulması sağlanmıştır.



Şekil 3.13 Desikatör

3.5 Deney tasarımı ve Taguchi metodu

Deneysel çalışmalarda maliyetleri en düşük seviyelerde tutabilmek için yapılacak deneylerin minimum sayıda tutulması önemlidir. Bu amaçla çok parametrelili olan ve birden çok deney yapma gereksinimi duyulan durumlarda Japon bilim adamı Genichi Taguchi'nin geliştirmiş olduğu "Taguchi Yöntemi" büyük önem arz etmektedir[73].

Ürün ve üretim performansını daha da iyileştirmek amacıyla kullanılan Taguchi metodu, sisteme etki eden parametrelerin, parametrelere ait etkinlik derecelerinin ve sisteme ait faktörlerin etkileşim durumlarını tayin etmeye yönelik olarak sistem optimizasyonlarında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Sistem optimizasyonu için güçlü bir yöntem olarak kabul edilen bu metod, sistemde kalite kaybına sebep olan etkenler ortaya konularak sistemin optimizasyonuna imkân sağlamaktadır. Kolay bir şekilde kayıp fonksiyonunu hesap etmeye yarayan Taguchi, proseste görülen değişiklikleri ölçmek için kayıp formülünü kullanılmaktadır. Taguchi kayıp fonksiyonunu üçe ayırmaktadır. Çizelge 3.4'te kayıp fonksiyonlar ve denklemleri verilmiştir[74,75].

Daha küçük – daha iyi kayıp karakteristiği için sürtünme katsayısı ile aşınma oranı, daha yüksek – daha iyidir kayıp karakteristiği için ise, çekme mukavemeti, sertlik ve yakıt tasarrufu örnek olarak verilebilir[75].

Çizelge 3.4 Kayıp fonksiyonu tipleri[74,75]

Karakteristik Tipi	Kayıp
Daha yüksek daha iyi	$k (1/y^2)$
Nominal en iyi	$k (y-m)^2$
Daha düşük daha iyi	$k (y)^2$

3.5.1 Ortogonal diziler

Taguchi metodunda, deneysel ortogonal diziler oluşturularak tanımlanır. Ortogonal deney dizileri hazırlanarak, faktör seviyelerinin tek tek değiştirmesi yerine, faktör seviyelerinin eş zamanlı olarak değişimine olanak sağlanır. Örneğin 3 seviyesi 5 faktörü bir deneyde tüm kombinasyonlar kullanıldığında $5^3 = 625$ tane deney yapılması gereklidir. Fakat Taguchi metodunda geliştirilen ortogonal tablolar vasıtasıyla bu sayı 36'ya düşmektedir[75].

Çizelge 3.5 Ortogonal dizilerden L₄ ve L₉[75]

L4 ORTOGONAL DİZİSİ			
Deney No	Sütun		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

L9 ORTOGONAL DİZİSİ				
Deney No	Sütun			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Taguchi deneysel metodu için oluşturulan bu ortogonal dizilerde faktörler genellikle 2, 3 ve 4 seviyeli olmakla beraber, bir takım metotlar ile arttırılabilir. Deneysel çalışmalarda en fazla karşılaşılan ortogonal diziler L₄, L₈, L₁₆, L₉, L₁₈ ve L₂₇ dizileridir. Çizelge 3.5'te L₄ ve L₉ ortogonal dizileri görülmektedir[75,76]

3.5.2 Sinyal / gürültü oranı

Taguchi metodunda kalite karakteristiğini tanımlayan sinyal/gürültü (S/N) oranı bir performans ölçütü olup, kayıp fonksiyonu ile doğrudan ilgilidir. Kayıp fonksiyonun daha önceden de belirtilen tipleri ile ilişkili olarak 3 adet S/N oranı mevcuttur[75, 76, 77].

Daha büyük daha iyi (Larger the better)

Daha küçük daha iyi (Smaller the better)

Nominal en iyisi (Nominal the best)

Performans karakteristiğinin daha küçük – daha iyi olduğu durumda;

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3.1)$$

Daha büyük - daha iyi olduğu durumda;

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3.2)$$

Nominal – en iyi olduğu durumda;

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_i^{-2}}{s^2} \right) \quad (3.3)$$

Taguchi deneysel tasarımında daha güvenilir sonuçların alınabilmesi için güçlü bir kalite ölçütü olan S/N oranlarının kullanılması önerilir[75,76].

3.5.3 Taguchi metodunda etkileşimlerin incelenmesi

Taguchi deneysel metodunda etkileşim, tasarımda yer alan faktörlerin karşılıklı etkileşim durumlarını ifade etmektedir. A x B şeklinde gösterilen bir tasarım, A ve B faktörlerinin etkileşim durumunu ifade eder. Her ikisinin de varlığı durumunda sistem üzerinde etkiye sahip olması durumunu ifade eder. Deneysel çalışmalarda etkileşim faktörlerinin önceden tespiti oldukça zordur. Taguchi deneysel tasarımında karşılıklı etkileşimin belirlenebilmesi, ortogonal seri üzerinde bir karşılıklı etkileşim sütununun tanımlanması ve hesaplara dâhil edilmesiyle mümkündür [75,76].

3.5.4 Varyans analizi

Deneysel çalışmalarda sistemi etkileyen faktörlerin belirlenmesine ve sistem üzerinde olumsuz etkiye sahip faktörlerin negatif etkilerinin yok edilmesine çalışılır. Yani sistem üzerine etki eden tüm faktörlerinin kontrolü oldukça önemlidir. Taguchi tasarımında faktörlerin etkinlik derecelerini belirlemek ve deneysel verilerin yorumlanması varyans (ANOVA) analizleri metodu ile mümkündür. Varyans analizlerinde, kareler toplamı, serbestlik derecesi, karelerin ortalaması gibi matematiksel niceliklerden faydalanılmaktadır. Bu matematiksel nicelikler aşağıda ifade edilmiştir [75,78].

3.5.4.1 Kareler toplamı (Varyasyon)

A ve B faktörleri ve A x B etkileşimleri dikkate alınarak toplam varyasyon denklem;

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AxB} + SS_e \quad (3.4)$$

$$SS_T = \left[\sum_{i=1}^N yi^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (3.5)$$

A faktörü için varyans denklemi;

$$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{K_A} \left(\frac{Ai^2}{n_{A_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad (3.6)$$

ANOVA tablosunda yer alan hata varyasyonu denklemi;

$$SS_e = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AxB} \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilir[75].

3.5.4.2 Serbestlik derecesi

ANOVA tablolarının hazırlanmasında gerek duyulan diğer bir nicelik serbestlik derecesidir. Toplam serbestlik derecesi deneme sayısının bir eksiğine eşit olup, aşağıdaki formül ile ifade edilir[75].

$$v_T = N - 1 \quad (3.8)$$

A ve B faktörünün serbestlik derecesi faktör seviyelerinin bir eksiğidir ve şöyle ifade edilmektedir;

$$v_A = k_A - 1, v_B = k_B - 1 \quad (3.9)$$

Etkileşimlerin serbestlik dereceleri iki faktörün serbestlik derecelerinin çarpımına eşit olup şu şekilde ifade edilmektedir;

$$v_{AXB} = (v_A)(v_B) \quad (3.10)$$

Hata serbestlik derecesi ise,

$$v_e = v_T - v_A - v_B - v_{AXB} \quad (3.11)$$

toplam serbestlik derecesinden faktörlerin serbestlik derecelerinin çıkarılması ile elde edilir[75].

3.5.4.3 Varyans

ANOVA tabloları için gerekli olan bir diğer nicelik ise hata varyans değeridir ve aşağıda verilen formül ile hesaplanır.

$$V_e = \frac{SS_e}{v_e} \quad (3.12)$$

Her bir faktörün ise varyans değeri, faktörün varyasyonunun serbestlik derecesine bölünmesi olarak ifade edilir. Aşağıda A faktörüne ait varyans formüle edilmiştir[75].

$$V_A = \frac{SS_A}{v_B} \quad (3.13)$$

3.5.4.4 F testi

ANOVA tablolarında faktörlerin etkinliklerini görmemize yarayan F test değeri; faktörün varyansının hata varyansına bölünmesi ile elde edilir. Aşağıda A faktörüne ait F test formülü gösterilmiştir.

$$F_A = \frac{V_A}{V_e} \quad (3.14)$$

ANOVA tablosunda yer alan niceliklerin yorumunu yapmak gerekirse; Her faktör için hesaplanan F test değerleri F tablo değerleri ile karşılaştırılır. Hesaplanan F test değeri tablolardaki F (F tablo) değerinden büyük ise faktörün proses ve ürün üzerinde bir etkiye sahip olduğu, F (F tablo) değerinden küçük ise de faktörün proses ve ürün üzerinde önemli bir etkisi olmadığı sonucu çıkarılır. Tablolarda ki F tablo değeri de F tabloları üzerinde, hatanın serbestlik derecesi ile faktörün serbestlik derecelerinin kesiştiği yerdeki değerdir[75,76].

ANOVA tablolarında gözden kaçırılmaması gereken diğer bir husus da etkinliği çok düşük olan faktörlerin "Pooling" (V_{ep}) yani "Hata" olarak kabul edilebilmesidir. Bu şekilde pooling yapılan faktörün varyasyonu ve hata varyasyonu iptal edilerek değerlendirme yeniden yapılır[75,76, 78].

3.5.4.5 Faktörlerin toplam değişime etkilerinin yüzdesi

Faktörlerin toplam değişime olan etkilerinin hesaplanması aşağıdaki formüller ile yapılabilmekte ve bu sayede sisteme etki eden faktörlerin etkinlik yüzdeleri de çıkarılabilmektedir[75].

$$SS'_A = SS_A - (V_e)(v_A) \text{ (A faktörü için)} \quad (3.15)$$

$$P = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100 \text{ (A faktörü için)} \quad (3.16)$$

3.5.4.6 Doğrulama deneyleri

Taguchi tasarımında olmazsa olmaz niceliklerden biri de doğrulama deneyleridir. Hesaplamalar sonucunda faktörler grafiksel olarak gösterilerek proses için en uygun şartlar belirlenir. Belirlenen en uygun şartlar göz önüne alınarak tahmini ortalama kalite karakteristiği değerleri ve güven aralığı elde edilir. En uygun koşullar dikkate alınarak yapılan doğrulama deneylerinin ardından, alınan kalite karakteristik değerinin hesaplanan güven aralığında olup olmadığı gözlemlenir. Değerin hesaplanan güven aralığında olması yapılan deneyin doğruluğunu, güven aralığının altında veya üstünde olması durumu ise deneylerde veya tasarımda hata yapıldığını ifade eder. Bu durumda deneyin ve tasarımın tekrar gözden geçirilmesi ve hatanın bulunarak düzeltilmesi gerekir[75,78].

3.6 Deneysel parametreler ve deney planı

Aşınma testleri 2000 m'lik sabit bir yol altında, dört farklı yağlayıcı tipi, dört farklı motor devri, dört farklı segman yükü ve dört farklı gömlek sıcaklığını seçilerek yapılmıştır. Aşınma testleri için seçilen deney parametreleri ve onların seviye değerleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 Parametreler ve seviyeleri

Parametreler	Seviyeler			
Yağlayıcı Çeşidi	%100 Yağ	%50 Yağ ve %50 Dizel Oil karışımı	%50 Yağ ve %50 Fuel Oil karışımı	%100 Dizel Oil
Yük (N)	60	80	100	120
Devir sayısı (d/d)	60	90	120	150
Sıcaklık (°C)	60	80	100	150

Yapılan çalışmada en düşük sürtünme ve ağırlık kaybı için optimum koşulların tespit edilmesi için bütün deney kombinasyonların yapılması gerekmektedir. Bu da 4 parametre ve 4 seviye için toplamda $4^4=256$ adet deney yapılmasını ön görmektedir.

Çizelge 3.7 Deneyleerde kullanılacak L16 ortogonal dizisi

L16 ORTOGONAL DİZİSİ				
Deney No	Sütunlar			
	A	B	C	D
	Yağlayıcı Çeşidi	Yük (N)	Devir sayısı (d/d)	Sıcaklık (°C)
1	1	1	1	4
2	1	2	2	1
3	1	3	3	2
4	1	4	4	3
5	2	1	2	2
6	2	2	1	3
7	2	3	4	4
8	2	4	3	1
9	3	1	3	3
10	3	2	4	2
11	3	3	1	1
12	3	4	2	4
13	4	1	4	1
14	4	2	3	4
15	4	3	2	3
16	4	4	1	2

Çok sayıda deney yapmak maliyetler ve zaman kayıplarının yanında çok sayıda deneysel hata yapılmasına da neden olmaktadır. Bu hatalar sonuçların tespitini

zorlaştırmaktadır. Bu sorunlar göz önünde bulundurularak yapılan bu çalışmada Taguchi deneysel yaklaşımından faydalanılmıştır.

Dört parametre ve dört seviye için olan L_{16} ortogonal dizilimi seçilmiştir. Bu sayede deney sayısı 254'den 16'ya düşürülmüştür. Bu şekilde parametreler ve seviyeleri eş eksenli olarak değiştirme imkânına sahip olunmuş ve hatalar ve kontrol edilmeyen faktörlerin etkileri de işleme dâhil edilebilmiştir. Deneyler için seçilen L_{16} ortogonal dizilimi Çizelge 3.7'de verilmiştir.

L_{16} ortogonal diziye göre her bir deney için Çizelge 3.8'deki gibi deney reçeteleri hazırlanmıştır.

Çizelge 3.8 Deney planı

DENEY PLANI				
Deney No	Sütunlar			
	A	B	C	D
	Yağlayıcı Çeşidi	Yük (N)	Devir sayısı (d/d)	Sıcaklık (°C)
1	%100 Yağ	60	60	150
2	%100 Yağ	80	90	60
3	%100 Yağ	100	120	80
4	%100 Yağ	120	150	100
5	%50 Yağ + %50 Dizel Oil	60	90	80
6	%50 Yağ + %50 Dizel Oil	80	60	100
7	%50 Yağ + %50 Dizel Oil	100	150	150
8	%50 Yağ + %50 Dizel Oil	120	120	60
9	%50 Yağ + %50 FuelOil	60	120	100
10	%50 Yağ + %50 FuelOil	80	150	80
11	%50 Yağ + %50 FuelOil	100	60	60
12	%50 Yağ + %50 FuelOil	120	90	150
13	%100 Dizel Oil	60	150	60
14	%100 Dizel Oil	80	120	150
15	%100 Dizel Oil	100	90	100
16	%100 Dizel Oil	120	60	80

DENEYSEL SONUÇLAR

4.1 Aşınma kaybı sonuçları

Ağırlık kayıplarının tespit edilmesi için her bir deney numunelerinin deney öncesi ve deney sonrasında ağırlıkları ölçülmüştür. Ölçümler sonrasında her bir deney için elde edilen ortalama ağırlık kaybı (aşınma) miktarları mg cinsinde elde edilmiştir. Taguchi yaklaşımına göre faktörlerin etkinlik derecelerinin belirlenmesi amacı ile “smaller the better” performans (sinyal/gürültü) ölçütü kullanılmıştır.

Çizelge 4.1 Ortalama ağırlık kaybı miktarı

Deney No	Yağlayıcı Çeşidi	Yük (N)	Devir sayısı (d/d)	Sıcaklık (°C)	Aşınma Kaybı (mg)	S/N Oranı
	A	B	C	D		
1	%100 Yağ	60	60	150	6,1	-1,57
2	%100 Yağ	80	90	60	4,39	-1,28
3	%100 Yağ	100	120	80	4,1	-1,23
4	%100 Yağ	120	150	100	1,9	-0,56
5	%50 Yağ + %50 Dizel Oil	60	90	80	5,49	-1,48
6	%50 Yağ + %50 Dizel Oil	80	60	100	41,81	-3,24
7	%50 Yağ + %50 Dizel Oil	100	150	150	18,3	-2,52
8	%50 Yağ + %50 Dizel Oil	120	120	60	17,88	-2,50
9	%50 Yağ + %50 Fuel Oil	60	120	100	5,33	-1,45
10	%50 Yağ + %50 Fuel Oil	80	150	80	4,24	-1,25
11	%50 Yağ + %50 Fuel Oil	100	60	60	28,24	-2,90
12	%50 Yağ + %50 Fuel Oil	120	90	150	76,8	-3,77
13	%100 Dizel Oil	60	150	60	2,15	-0,66
14	%100 Dizel Oil	80	120	150	108,9	-4,07
15	%100 Dizel Oil	100	90	100	47,04	-3,34
16	%100 Dizel Oil	120	60	80	57,57	-3,52

Çizelge 4.1’de her bir deney için hesaplanan ortalama ağırlık kaybı miktarları ve onların sinyal/gürültü (S/N) oranları deney reçeteleri ile birlikte verilmiştir. Burada ağırlık kaybı miktarlarının 1,9 mg ile 108,9 mg arasında değişim gösterdiği görülmektedir. En yüksek ağırlık kaybının % 100 Dizel Oil ile 80 N yük altında, 120 d/d hızında ve 150 °C sıcaklık altında yapılan 14. deney numunesinde görülmüştür. Buna karşın en düşük ağırlık kaybı değeri % 100 yağ ortamında, 120 N yük altında ve 150 d/d devir sayısında ve 100 °C’de yapılan 4. deney numunesinde gözlemlenmiştir.

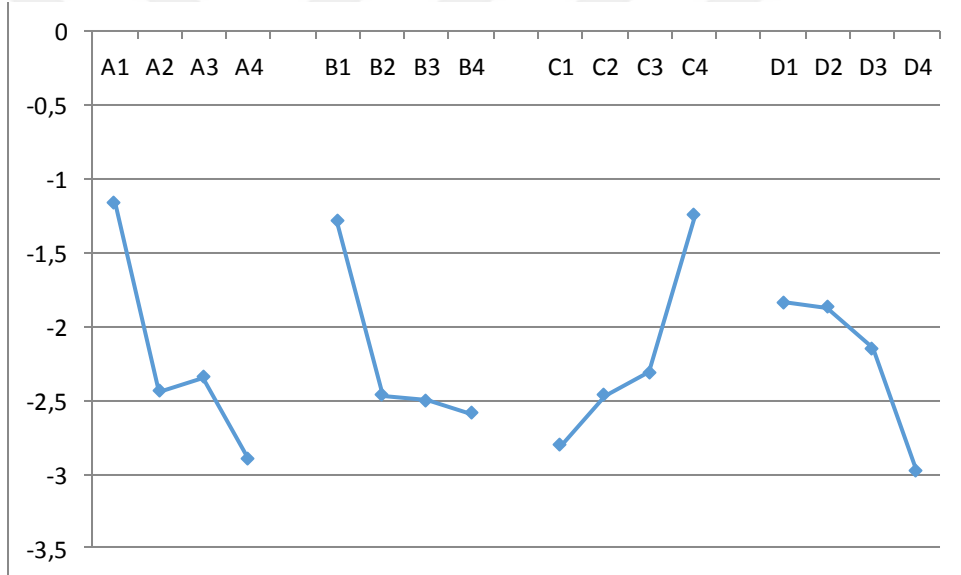
Çizelge 4.1’de faktörlerin ağırlık kayıpları üzerine etki eden parametrelerin ve bunlarının etkinlik derecelerinin belirlenmesi amacı ile “smaller the better” performans ölçütü kullanılarak hazırlanmış ANOVA analiz tablosu görülmektedir. Tabloda aşınma miktarları üzerinde $\alpha=0,01$ anlamlılık düzeyi için faktörlerin hepsinin etkili olduğu görülmektedir. En etkili faktörün 411,98 F değeri ile yağlayıcı çeşidi (A) olduğu onu sırası ile 338,81 F değeri ile devir sayısı (C), 282,99 F değeri ile yük (B) ve 214,01 F değeri ile sıcaklık (D) takip etmiştir. Ayrıca tabloda ağırlık kayıpları üzerine en etkili parametrenin % 33 ile yağlayıcı çeşidi olduğu tespit edilmiştir. Ağırlık kayıpları üzerinde diğer parametrelerin etkileri ise; devir sayısı için %27, Yük için %23 ve sıcaklık için %17 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.2 Ağırlık kayıpları için Varyans Analizi sonuçları

Değişim Kaynağı	Sütun	Kareler Toplamı (S)	Serbestlik Derecesi (f)	Kareler Ortalaması	Teorik F F (hesap)	P, %
Yağlayıcı çeşidi	A	6,60	3	2,20	411,98	33
Yük	B	4,54	3	1,51	282,99	23
Devir sayısı	C	5,43	3	1,81	338,81	27
Sıcaklık	D	3,43	3	1,14	214,01	17
Toplam		20,00	12,00	1,67		
e		0,02	3	0,01		0,08
0,99 güven düzeyi için F(tablo) değeri 21,00						

Aşınma deneylerinde kontrol edilemeyen faktör ve sistemden kaynaklanan hataların toplam etkisi ise % 0,08 oranındadır. Bu sonuçta bize kontrol edilemeyen faktörün olmadığını ve aşınma deneylerini etkileyecek düzeyde deneysel hata yapılmadığını göstermektedir.

Taguchi yaklaşımına göre en düşük ağırlık kaybı için optimum deney parametrelerinin belirlenmesi amacı ile faktör seviyelerinin oranlamaları kullanılarak her bir parametre için değişim grafikleri hazırlanmıştır. Grafikler üzerinde en yüksek değeri gösteren parametre seviyesi o parametre için optimum seviyesini göstermektedir. Şekil 4.1’de en düşük ağırlık kaybı için optimum deney seviyelerini belirlemek amacı ile hazırlanmış parametrelerin grafikte gösterimi verilmiştir



Şekil 4.1 Ağırlık kayıpları için parametrelerin grafiksel görünümü

Şekil 4.1’de optimum deney şartlarının A1B1C4D1 olduğunu göstermektedir. Grafikte en düşük aşınma kaybının % 100 yağ ile, 60 N yük, 150 d/d ve 60 °C sıcaklıkta yapılan deney şartlarında elde edilebileceğini göstermektedir. Ayrıca grafiklerde faktör seviyeleri arasında en büyük farkın yağlayıcı çeşidi ve devir sayısı parametrelerinin olduğu, onları yük parametresinin izlediği görülmektedir. En az farkın ise sıcaklık parametresinde olduğu görülmektedir. Artan devir sayısı ile aşınmaların arttığı azaldığı, buna karşılık olarak yük ve sıcaklığın artmasıyla arttığı görülmektedir. Devir artışına karşın yük artışıyla aşınma kaybının fazla artmaması, yüksek devirlerde yağ film

kalınlığının artması ve rölatif hareket eden parçalar arasında hidrodinamik sürtünmenin daha etkin hale gelmesiyle açıklanabilir. Benzer şekilde sıcaklık arttıkça aşınma kaybının çok hızlı bir artış gösterdiği görülmektedir. Bunun nedeni ise viskozitenin sıcaklığın bir fonksiyonu olmasıdır. Yağ sıcaklığı arttıkça yağ filminin viskozitesi artmakta; buna karşılık yük artışıyla yağ film kalınlığı gittikçe azalmaktadır. Bu durum doğal olarak aşınma kayıplarını da artırmaktadır.

Tasarım metoduna göre yapılan “deneysel tasarım metodunun” doğru uygulanıp uygulanmadığını kontrol etmek amacı ile doğrulama deneylerinin yapılması gerekmektedir. Doğrulama deneyleri iki aşamadan oluşmaktadır. Birincisi belirlenen optimum şartlara göre tahmini güven aralığının bulunması, ikinci aşama ise belirlenen optimum şartlara göre ilave bir deney daha yapılmasıdır. Yapılan deneysel metodun doğru olduğu, yapılan ilave deney sonucunda alınan değer, önceden belirlenen tahmini güven aralığı içerisinde olması ile anlaşılır. Alınan sonucun, güven aralığının dışında kalması durumunda, sistem üzerinde kontrol edilemeyen faktörlerin olduğu ve deneysel tasarım metodunun gözden geçirilmesi ya da deneylerin tekrarlanması gerektiği sonucunu verir.

Çizelge 4.3'te belirlenen optimum şartlara (A1B1C4D1) göre yapılan doğrulama deneyi sonuçları, bu deneysel şartlara göre tahmini güven aralığı, ortalama ağırlık kayıpları ve S/N oranlarına göre verilmiştir.

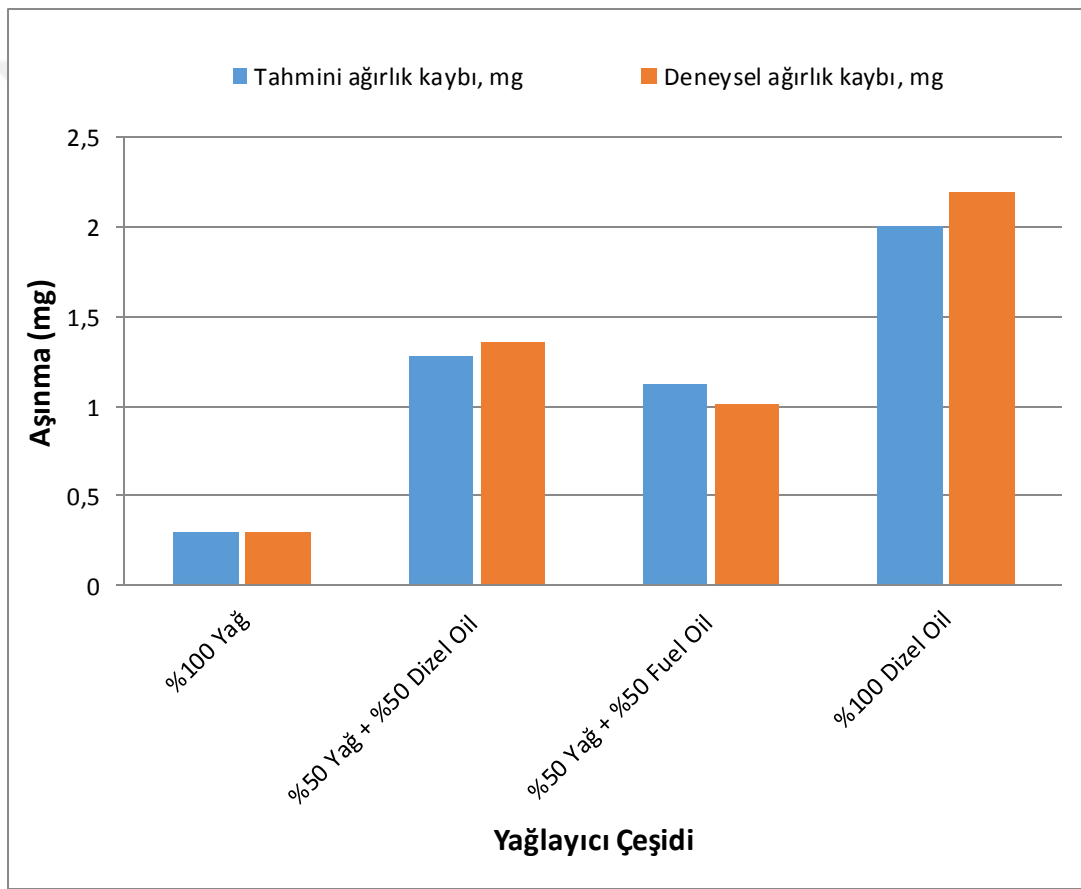
Çizelge 4.3 Ağırlık kayıpları için doğrulama deneyi sonuçları ve tahmini güven aralığı

Nicelik	S/N oranı	Ağırlık Kaybı, mg
Optimum Şartlar	A1B1C4D1	A1B1C4D1
Ortalama değer, μ	1,05	0,30
$\alpha=0,01$ için güven aralığı	$0,92 < \mu < 1,08$	$0,2884 < \mu < 0,3467$

Çizelge 4.3'te optimum deney şartlarına göre yapılacak doğrulama deneyinde ağırlık kayıpları için alınacak sonuçların 0,2884 mg ile 0,3467 mg arasına değişeceği görülmektedir. S/N oranları için ise sonuçların 0,92 ile 1,08 arasında değişmesi gerektiği görülmektedir. Çizelge 4.3'ten A1B1C4D1 şartlarında yapılan deney sonucunda ortalama ağırlık kaybının 0,30 mg ve S/N oranının 1,05 değerinde olduğu görülmektedir. Bu değer $\alpha=0,01$ için hesaplanan tahmini güven aralığı sınırları içerisinde

kalmıştır. Bu sonuç optimizasyon için kullanılan “tasarım metodunun” doğru uygulanmış olduğunu göstermektedir.

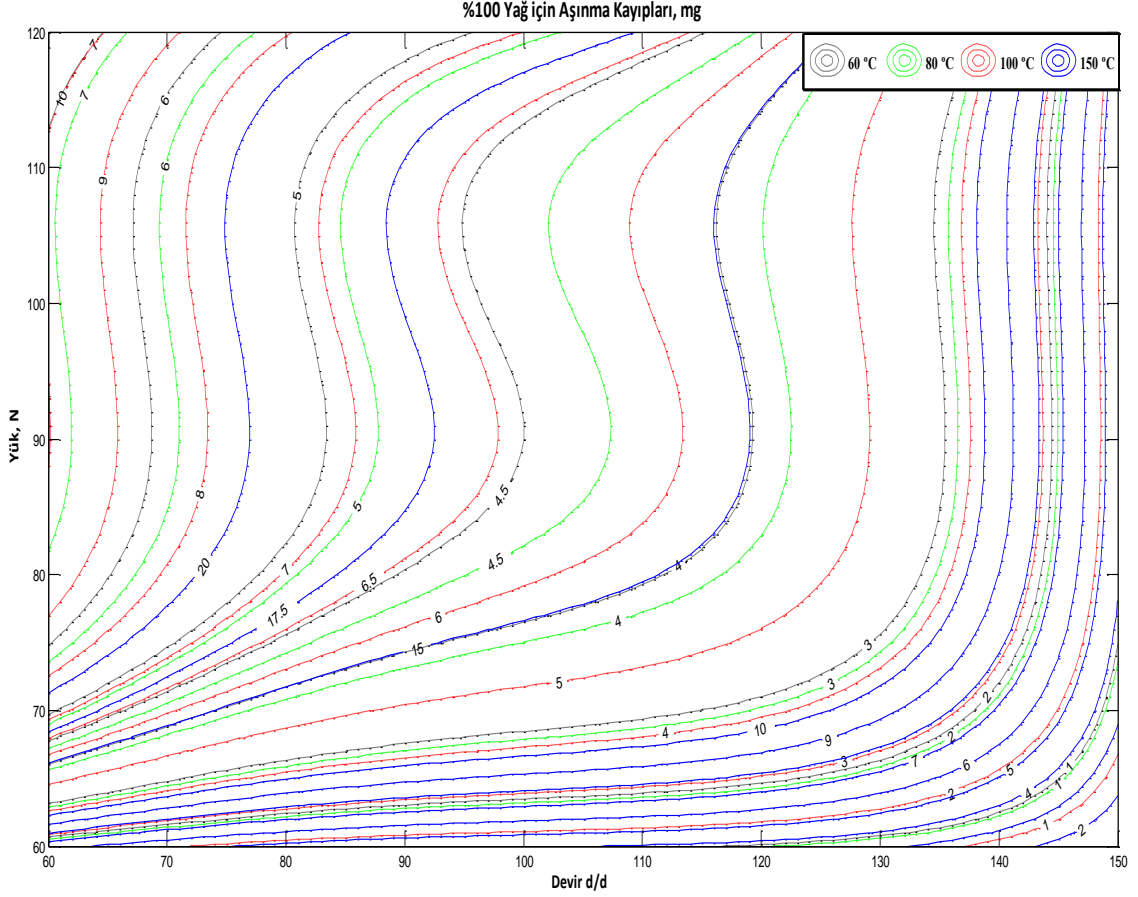
Yapılan çalışmada yağlayıcı tiplerinin etkilerini daha belirgin bir şekilde ortaya koymak amacı ile optimum (60 N yük altında, 150 d/d devir sayısında ve 60 C’de yapılan) deney koşullunda diğer yağlayıcı çeşitleri de kullanılarak ilave deneyler yapılmıştır. Alınan sonuçlar Taguchi deneysel yaklaşımına göre alınan tahmini sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.2’de optimum deney koşullarında yapılan ilave deney sonuçları için ölçülen ağırlık kaybı değerleri ve tahmini ağırlık kaybı değerleri grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 4.2 Optimum deney şartlarına göre farklı yağlayıcı ortamında yapılan ilave deney sonuçları ve tahmini değerleri

Şekil 4.2’de Taguchi deneysel tasarımı ile elde edilen tahmini ağırlık kayıpları ile deneysel olarak elde edilen ağırlık değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Grafikte en düşük ağırlık kaybının % 100 yağ ortamında yapılan deneyde yaklaşık 0,3 mg civarlarında olduğu, en fazla ağırlık kaybının ise % 100 Dizel Oil

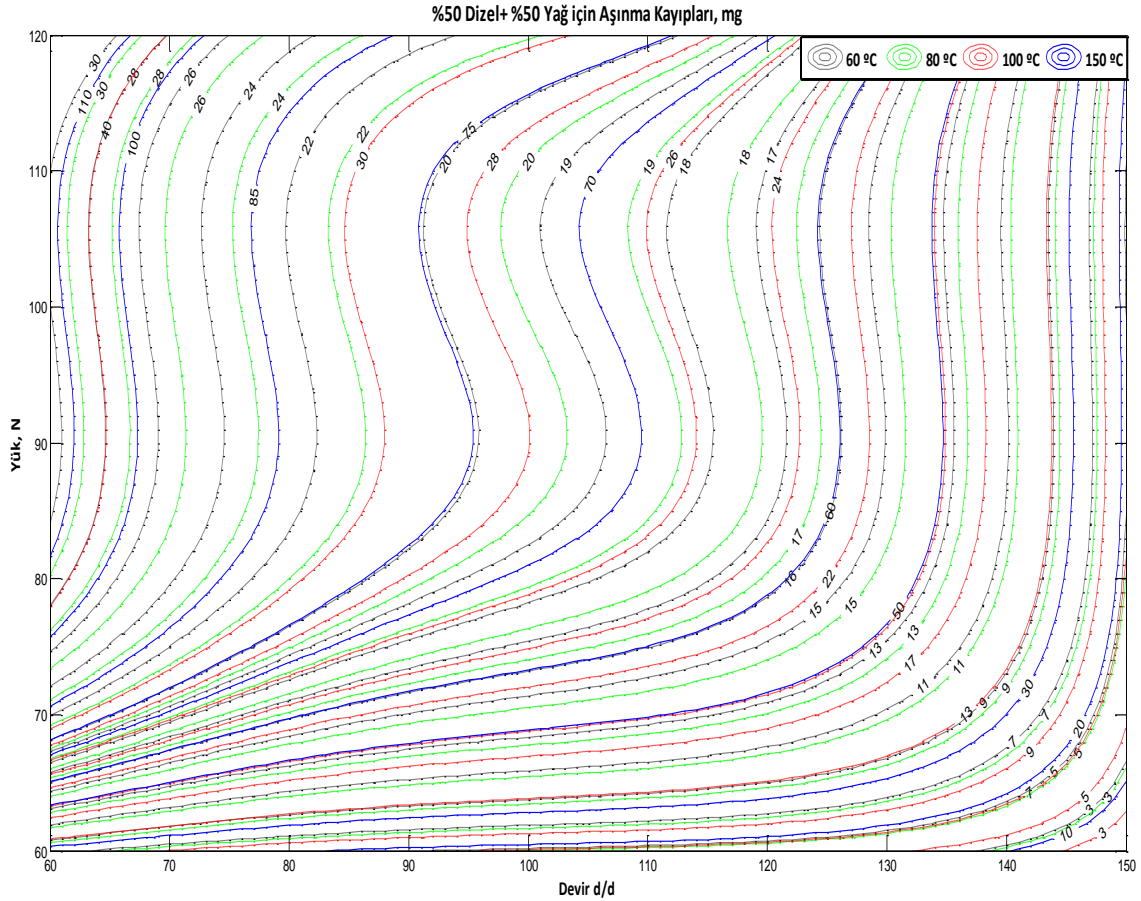
yağlayıcı ortamda yapılan deneyde 2,00 mg civarında olduğu görülmektedir. Grafikte ayrıca yağa karışan yakıt miktarının segman-silindir çiftinin arasında gelişen aşınma miktarını önemli oranda artırdığı göze çarpmaktadır. % 100 safiyetteki yağa % 50 oranında karışan Dizel Oil ve Fuel Oil yakıtları aşınma miktarlarını önemli orada artırmış olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3 %100 Yağ kullanımında sıcaklığa bağlı aşınma kayıpları

Şekil 4.3' te %100 yağ kullanılması durumunda sıcaklık değişimine bağlı olarak silindir yüzeyinde meydana gelen aşınma kayıplarının yük ve devir sayısına göre değişimi gösterilmiştir. Aşınma kayıplarının yüksek yük, düşük devir ve yüksek sıcaklıklarda maksimum değerlere ulaştığı, düşük yük, yüksek devir ve düşük sıcaklıklarda ise minimum değerlerde kaldığı görülmüştür. 120 N yük, 60 d/d ve 150 °C şartlarında aşınma kaybı 28,57 mg ile maksimum iken; 60 N yük, 150 d/d ve 60 °C şartlarında ise aşınma kaybı 0,29 mg ile minimum değerdedir. Sıcaklık artışıyla aşınma kaybındaki artış çok belirgin hale gelmektedir. Bu etki özellikle 150 °C için çok belirgindir. Bu sıcaklıkta

en düşük aşınma kaybının (0,29 mg) olduğu yüksek devir-düşük yük bölgesinde meydana gelen aşınma değerine, diğer sıcaklıklarda çok daha düşük devir ve yüksek yüklerde ulaşabilmektedir. Bu durum yüksek sıcaklık etsiyle aşınma kayıplarının 4 kata kadar arttığını göstermektedir.

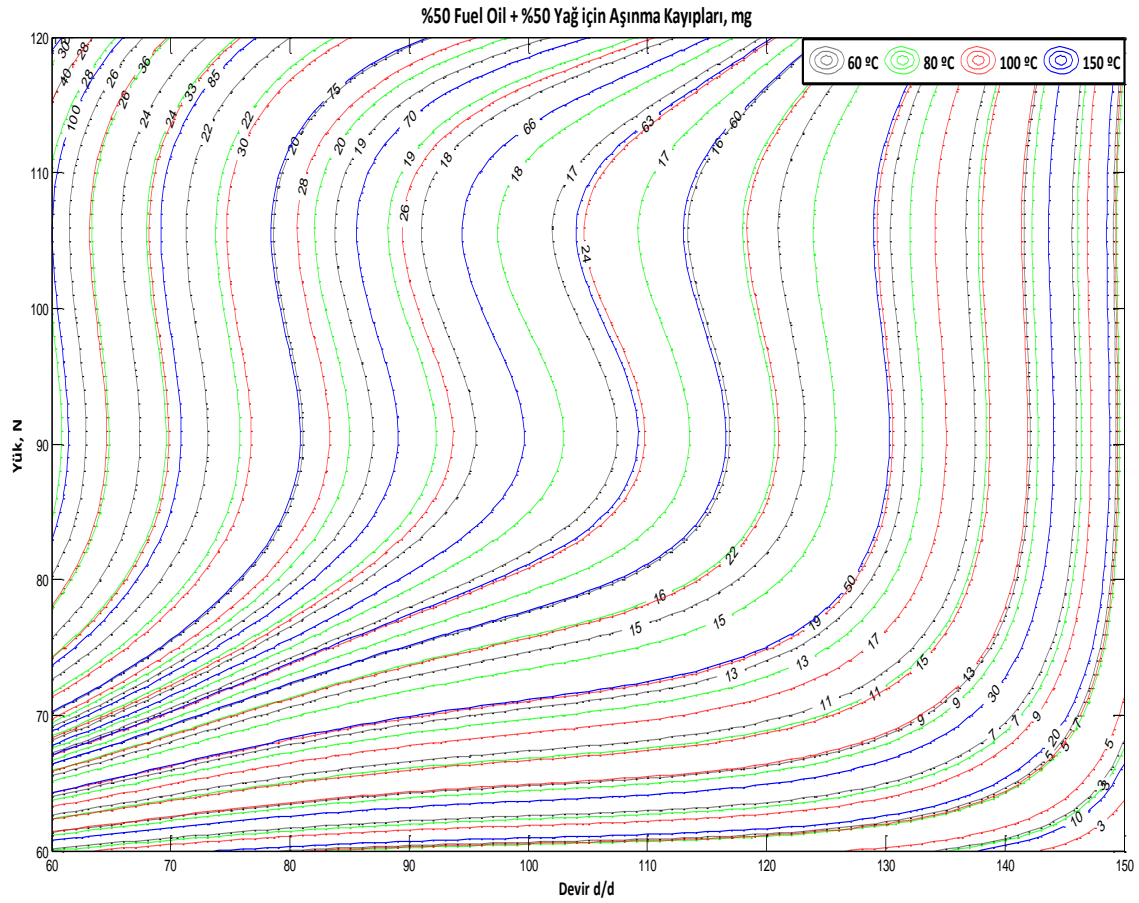


Şekil 4.4 %50 Yağ + %50 Dizel Oil kullanımında sıcaklığa bağlı aşınma kayıpları

Şekil 4.4' te %50 Yağ + %50 Dizel Oil kullanılması durumunda sıcaklık değişimine bağlı olarak silindir yüzeyinde meydana gelen aşınma kayıplarının yük ve devir sayısına göre değişimi gösterilmiştir. 120 N yük, 60 d/d ve 150 °C şartlarında aşınma kaybı 124,47 mg ile maksimum iken; 60 N yük, 150 d/d ve 60 °C şartlarında ise aşınma kaybı 1,24 mg ile minimum değerdedir.

Yağ içerisinde dizel yakıt karışığında tüm sıcaklık değerlerinde aşınma miktarlarının aynı sıcaklık değerlerinde bile 4 kata yakın arttığı görülmektedir. Bu artışın nedeni dizel yakıt viskozite değerinin yağa göre düşük olmasıdır. Ancak sıcaklık arttıkça aşınma kaybındaki bu artış çok daha etkili hale gelmektedir. En düşük aşınmanın meydana geldiği yüksek devir düşük yük bölgesinde bile aşınma miktarı aynı sıcaklık değeri için

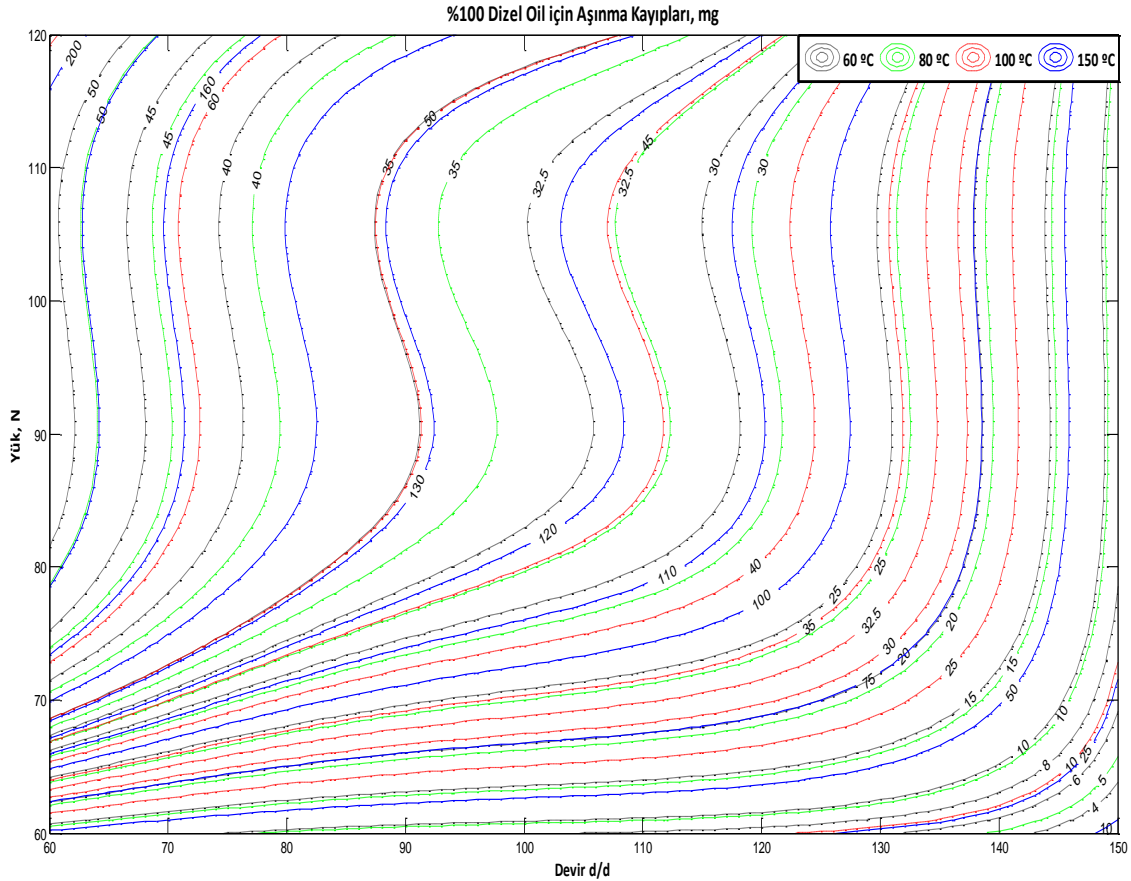
(150 °C) 4,3 kat artmıştır. Bu durum motor düşük aşınma bölgesinde bile çalıştırılrsa aşınmanın yağlayıcı etkisi ile 4,3 kat daha fazla olacağı anlamına gelmektedir.



Şekil 4.5 %50 Yağ + %50 Fuel Oil kullanımında sıcaklığa bağlı aşınma kayıpları

Şekil 4.5' te %50 Yağ + %50 Fuel Oil kullanılması durumunda sıcaklık değişimine bağlı olarak silindir yüzeyinde meydana gelen aşınma kayıplarının yük ve devir sayısına göre değişimi gösterilmiştir. 120 N yük, 60 d/d ve 150 °C şartlarında aşınma kaybı 111,87 mg ile maksimum iken; 60 N yük, 150 d/d ve 60 °C şartlarında ise aşınma kaybı 1,12 mg ile minimum değerdedir. Aşınma kayıplarının yağın içerisine %50 Fuel Oil karışması durumunda, %100 yağ kullanımına göre yaklaşık olarak 4 kat arttığı görülmüştür. Yağ içerisine Ağır yakıt (HFO) karıştığında meydana gelen aşınma miktarının aynı oranlarda dizel yakıt karışımına göre daha düşük olmuştur. Bunun nedeni HFO ün viskozitesinin dizel yakıtı göre çok daha yüksek olmasıdır. Yakıt sıcaklığı 150 °C ye ulaştığında meydana gelen aşınma dizel yakıtın viskozite değerine yaklaşmaktadır. Bu durumda HFO, yağ içerisine karıştığında viskozite artırıcı bir katkı maddesi gibi davranmaktadır. Ancak Fuel Oilin yağlama özelliği, yağlama yağına göre daha düşük olduğu için %100

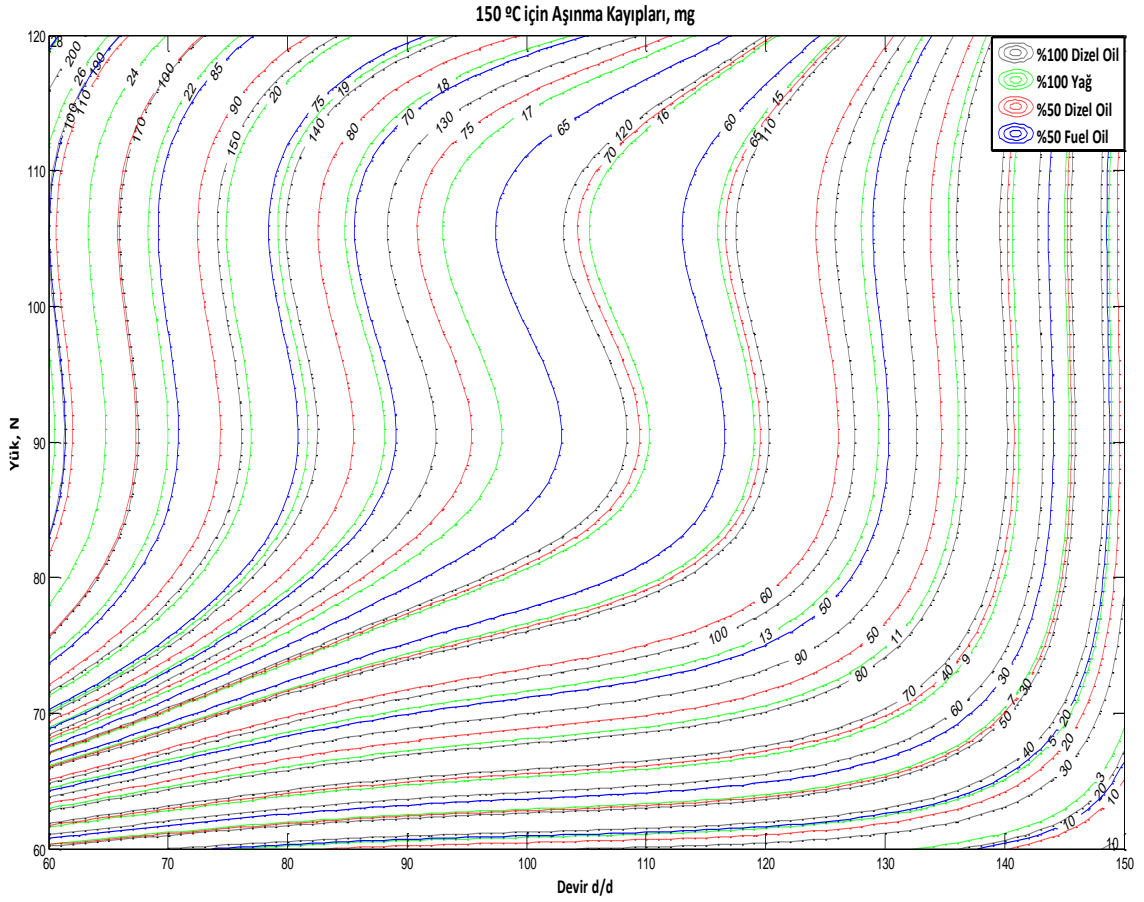
yağ ile çalışmaya göre daha fazla aşınmaya neden olmaktadır. Gerçek şartlarda Fuel Oil içerisindeki yüksek kükürt içeriğinin yüksek sıcaklık etkisiyle meydana getireceği korozif etki de dikkate alındığında bu aşınma değerlerinin çok daha fazla artacağı söylenebilir.



Şekil 4.6 %100 Dizel Oil kullanımında sıcaklığa bağlı aşınma kayıpları

Şekil 4.6' da yağlayıcı olarak %100 Dizel Oil kullanılması durumunda sıcaklık değişimine bağlı olarak silindir yüzeyinde meydana gelen aşınma kayıplarının yük ve devir sayısına göre değişimi gösterilmiştir. 120 N yük, 60 d/d ve 150 °C şartlarında aşınma kaybı 212,16 mg ile maksimum iken; 60 N yük, 150 d/d ve 60 °C şartlarında ise aşınma kaybı 2,12 mg ile minimum değerdedir. Aşınma kayıplarının %100 Dizel Oil kullanılması durumunda, %100 yağ kullanımına göre yaklaşık olarak 7,3 kat arttığı görülmüştür.

Şekil 4.7' de 150 °C sıcaklıkta, dört farklı yağlayıcı kullanımı durumunda, yük ve devir sayısına göre aşınma kaybı değişimleri gösterilmiştir. Deneyler sonucunda en yüksek aşınma kaybının yağlayıcı olarak %100 Dizel Oil kullanılması durumunda; 150 °C sıcaklıkta, 60 d/d ve 120 N yükte meydana geldiği ve bu değer 212,16 mg olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.7 150 °C'de farklı yağlayıcılar için aşınma kayıpları

Ayrıca aşınma kayıplarının %100 Dize Oil kullanılması durumunda, %100 yağ kullanımına göre yaklaşık olarak 7,3 kat, yağın içerisine %50 Fuel Oil karışması durumunda, %100 yağ kullanımına göre yaklaşık olarak 3,9 kat ve yağın içerisine %50 Dize Oil karışması durumunda, %100 yağ kullanımına göre yaklaşık olarak 4,3 kat arttığı görülmüştür. Sıcaklık arttıkça da aşınma miktarının arttığı, özellikle 150 °C de tüm karışım oranlarındaki aşınma miktarında önemli bir artışlar meydana gelmektedir.

Sonuç olarak; yukarıdaki grafikler göz önüne alındığında yüksek devir-düşük yük bölgelerinde aşınma kayıpları minimumdur. Aynı şekilde düşük devir-yüksek yük bölgelerinde ise aşınma kayıplarındaki değişim miktarı maksimum seviyelerdedir.

Yüksek devir-yüksek yük bölgelerinde oluşan hidrodinamik sürtünme nedeniyle yük artsa bile sürtünme kayıplarının sabit devirlerde sabit kaldığı görülmektedir. Bu etki özellikle 120 d/d dan itibaren tüm çalışma parametrelerinde yük artışına bağlı olarak benzer karakter göstermektedir.

4.2 Sürtünme katsayısı sonuçları

Sürtünme katsayılarının tespit edilmesi için üç eksenli kuvvet sensörünün Z eksenini (Net kuvvet) ve Y ekseninden (Sürtünme kuvveti) alınan ölçümler oranlanmış ve sürtünme katsayıları çıkarılmıştır. Taguchi yaklaşımına göre faktörlerin etkinlik derecelerinin belirlenmesi amacı ile “smaller the better” performans (sinyal/gürültü) ölçütü kullanılmıştır. Sürtünme katsayılarına etki eden parametrelerin ve en düşük sürtünme katsayısı için optimum şartların tespit edilmesi amacı ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen sürtünme grafiklerinden ortalama sürtünme katsayıları alınmıştır. Her bir deney için elde edilen ortalama sürtünme değerleri ve onların Sinyal/Gürültü oranları Çizelge 4.4’te görülmektedir.

Çizelge 4.4 Deneyler sonrasında elde edilen ortalama sürtünme katsayıları

Deney No	Yağlayıcı Çeşidi	Yük (N)	Devir sayısı (d/d)	Sıcaklık (°C)	Sürtünme katsayısı	S/N Oranı
	A	B	C	D		
1	%100 Yağ	60	60	150	0.0596	2.45
2	%100 Yağ	80	90	60	0.0449	2.70
3	%100 Yağ	100	120	80	0.0434	2.73
4	%100 Yağ	120	150	100	0.01758	3.51
5	%50 Yağ + %50 Dizel Oil	60	90	80	0.057	2.49
6	%50 Yağ + %50 Dizel Oil	80	60	100	0.53925	0.54
7	%50 Yağ + %50 Dizel Oil	100	150	150	0.1832	1.47
8	%50 Yağ + %50 Dizel Oil	120	120	60	0.186	1.46
9	%50 Yağ + %50 Fuel Oil	60	120	100	0.0581	2.47
10	%50 Yağ + %50 Fuel Oil	80	150	80	0.03648	2.88
11	%50 Yağ + %50 Fuel Oil	100	60	60	0.304	1.03
12	%50 Yağ + %50 Fuel Oil	120	90	150	0.7273	0.28
13	%100 Dizel Oil	60	150	60	0.0212	3.35
14	%100 Dizel Oil	80	120	150	1.0269	-0.02
15	%100 Dizel Oil	100	90	100	0.526	0.56
16	%100 Dizel Oil	120	60	80	0.638	0.39

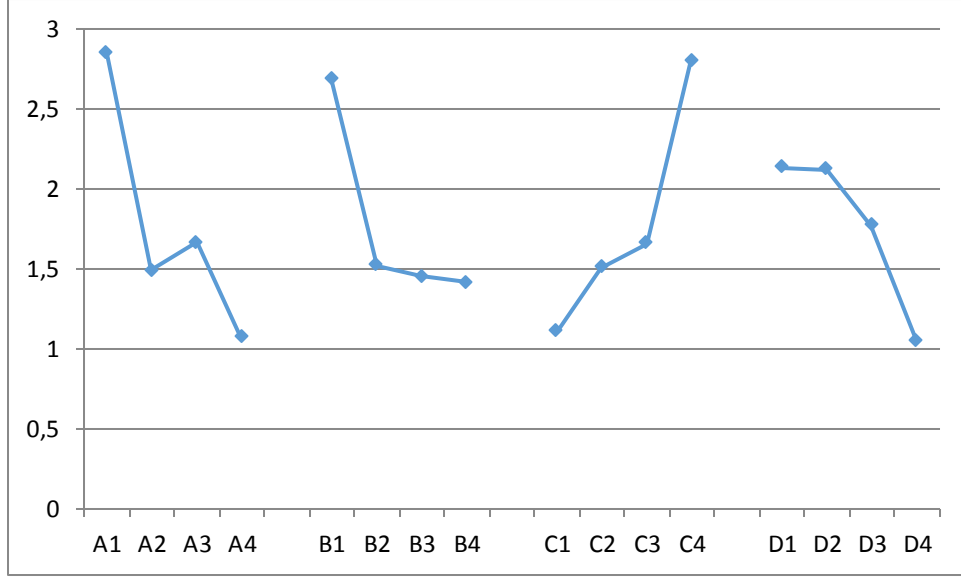
Çizelge 4.4’te deney numunelerinden alınan ortalama sürtünme katsayılarının 0,1758 ile 1.0269 arasında değiştiği görülmektedir. En düşük sürtünme katsayısı ağırlık kaybı miktarlarında olduğu gibi 4. deneyde en yüksek sürtünme katsayısı ise 14. deneyde gözlenmektedir.

Çizelge 4.5 Sürtünme katsayısı için Varyans Analizi sonuçları

Değişim Kaynağı	Sütun	Kareler Toplamı (S)	Serbestlik Derecesi (f)	Kareler Ortalaması	Teorik F F (hesap)	P, %
Yağlayıcı çeşidi	A	6,95	3	2,32	242,79	33
Yük	B	4,56	3	1,52	159,35	22
Devir sayısı	C	6,37	3	2,12	222,56	30
Sıcaklık	D	3,13	3	1,04	109,25	14
Toplam		21,01	12,00	1,75		
e		0,03	3	0,01		0,13625
0,99 güven düzeyi için F(tablo) değeri 21,00						

Çizelge 4.5'te % 99.99 anlamlılık düzeyi için bütün faktörlerin sürtünme katsayısı üzerine etkili olduğu görülmektedir. En etkili parametre yağlayıcı cinsi ve devir sayısı olduğu ve onarı sırası ile yük ve sıcaklık parametrelerin izlemektedir. Grafikte sürtünme katsayıları üzerine en çok % 33 oranı ile yağlayıcı çeşidi, onu sırası ile % 30 oranı ile devir sayısı, % 22 ile yük ve % 14 ile sıcaklık faktörlerinin izlediği görülmektedir. Deneilerde hata ve kontrol edilemeyen parametrelerin toplamda sürtünme katsayıları üzerinde yaklaşık % 0,01 oranında etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Şekil 4.8'de sürtünme katsayıları için optimum deney şartlarının belirlenmesi amacı ile hazırlanmış parametrelerin grafiksel gösterimi yapılmaktadır. Grafikte en yüksek seviye değerleri arasında farkın yağlayıcı türünün ve devir parametrelerinin olduğu, en düşük farkın ise sıcaklık parametresinde olduğu görülmektedir. Grafikten yine ağırlık kayıplarında olduğu gibi en düşük sürtünme katsayısı için optimum deney şartlarının; % 100 yağlayıcı ortamında, 60 N yük altında, 150 d/d dönme hızında ve 40 C gömlek sıcaklığında (A1B1C4D1) olduğu görülmektedir.



Şekil 4.8 Sürtünme katsayıları için parametrelerin grafiksel görünümü

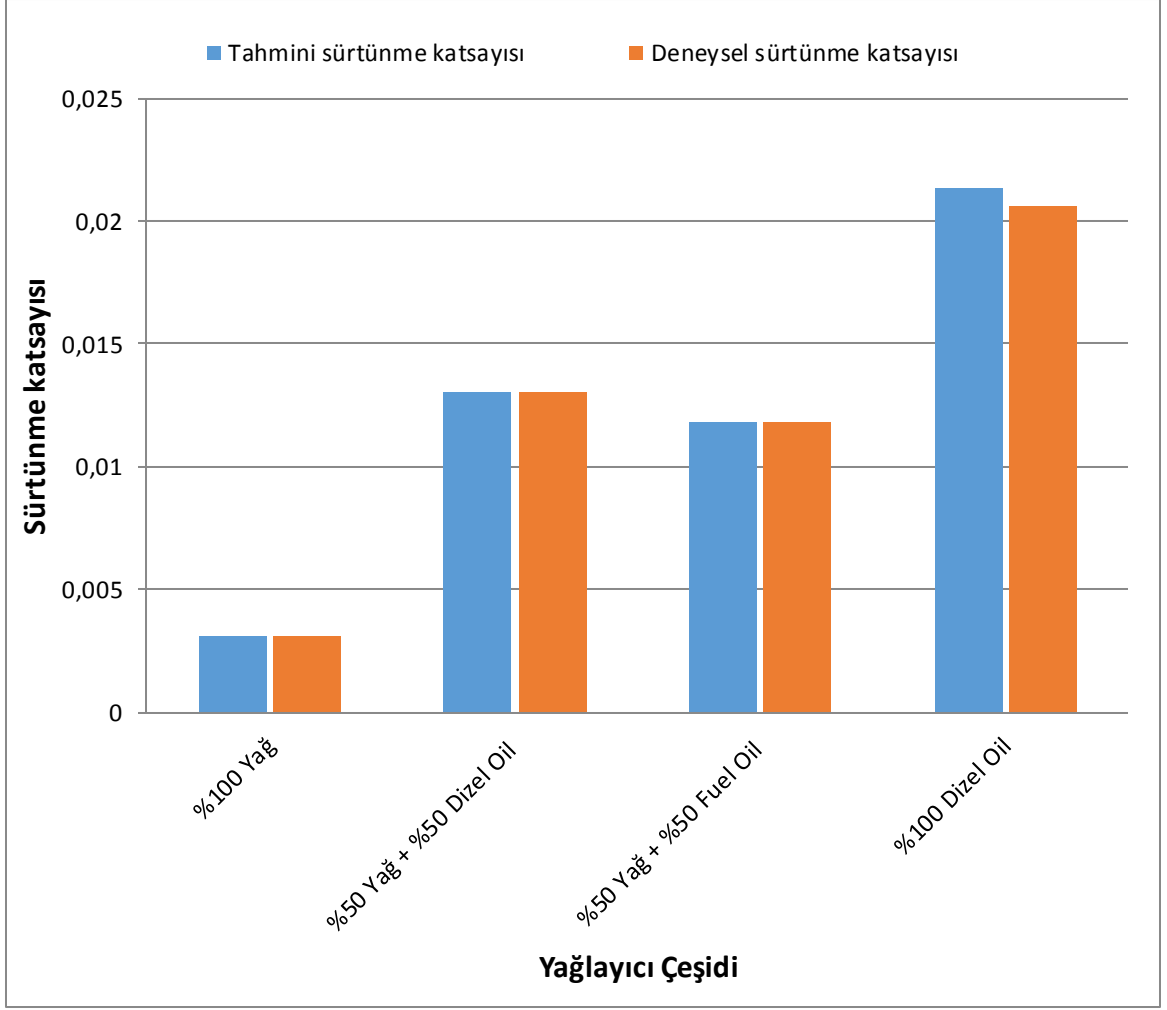
Şekil 4.8’de devir sayısının artması ile sürtünme katsayılarının düştüğü, artan sıcaklık ve yüklerle sürtünme katsayılarının arttığı görülmektedir. Yağlayıcı çeşidinin değişmesi ile birlikte sürtünme katsayılarında yaklaşık 2 katlık değişim gözlenmektedir.

Çizelge 4.6’da sürtünme katsayıları için yapılan doğrulama deney sonuçları ve tespit edile optimum deney şartları için beklenen tahmini güven aralığı S/N değerleri ile birlikte verilmiştir.

Çizelge 4.6 Sürtünme katsayıları için doğrulama deneyi sonuçları ve tahmini güven aralığı

Nicelik	S/N oranı	Sürtünme katsayısı
Optimum Şartlar	A1B1C4D1	A1B1C4D1
Ortalama değer,	5,015	0,00311
0,01 için güven aralığı	$4,95 < \mu < 5,36$	$0,00336 < \mu < 0,00201$

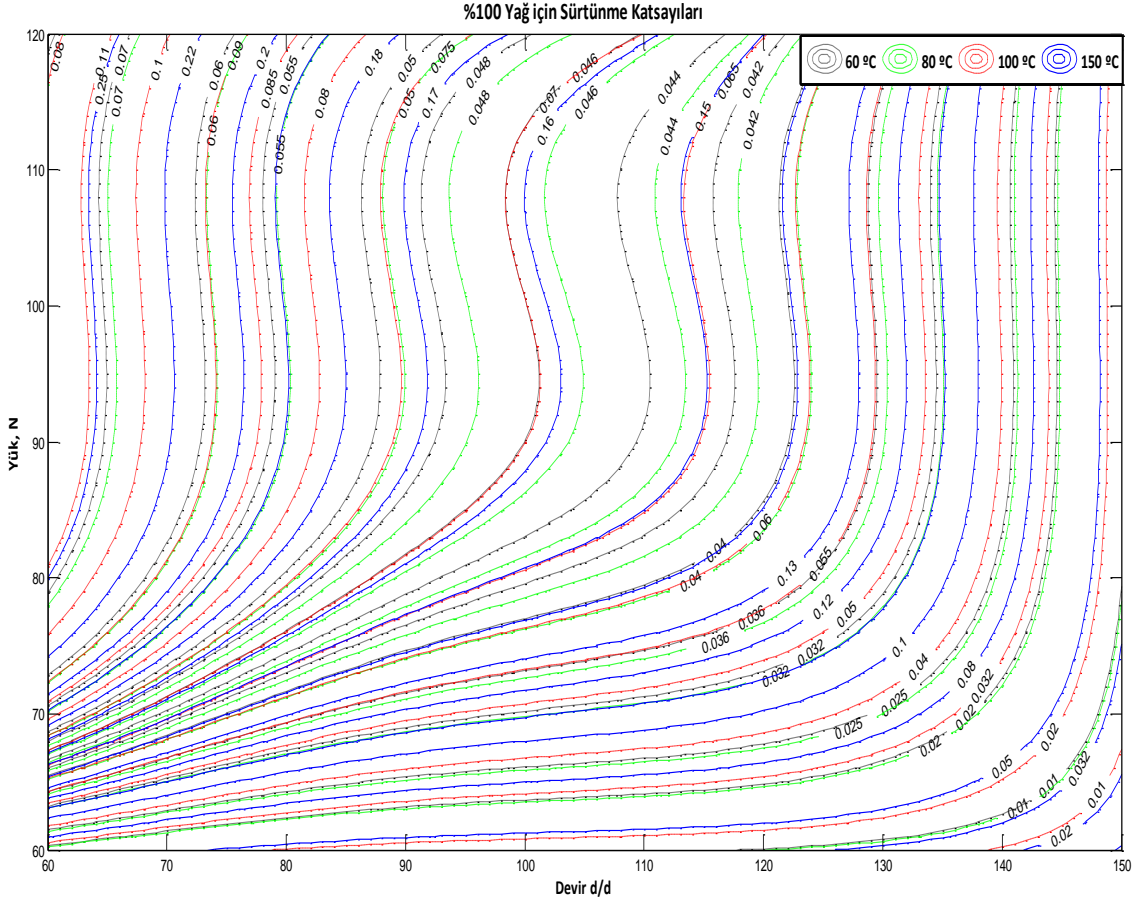
Çizelge 4.6’da deneysel tasarım metoduna göre optimum deney şartlarına göre hesaplanan tahmini güven aralığının $0,00336 < \mu < 0,00201$ olduğu, yapılan doğrulama deneyi sonrasında ise ölçülen sürtünme katsayısının ortalama 0,00311 olduğu görülmektedir. Doğrulama deneyi sonrasında alınan sürtünme katsayısı değerinin tahmini güven aralığı sınırları içerisinde kalmıştır. Bu da kullanılan “Tasarım metodunun” sürtünme katsayıları için de doğru yapıldığını göstermektedir.



Şekil 4.9 Sürtünme katsayıları için optimum deney şartlarına göre farkı yağlayıcı ortamında yapılan ilave deney sonuçları ve tahmini değerleri

Şekil 4.9'da Taguchi deneysel tasarımı ile elde edilen tahmini sürtünme katsayıları ile deneysel olarak elde edilen değerlerinin bir birine çok yakın olduğu görülmektedir. Grafikte en düşük sürtünme katsayısının % 100 yağ ortamında yapılan deneyde yaklaşık 0,003 civarlarında olduğu, en fazla sürtünme katsayısının ise % 100 Dize Oil yağlayıcı kullanılan ortamda 0,021 civarında olduğu görülmektedir.

Şekil 4.10' da %100 yağ kullanılması durumunda sıcaklık değişimine bağlı olarak segman-silindir çifti arasında meydana gelen sürtünme katsayılarının yük ve devir sayısına göre değişimi gösterilmiştir.

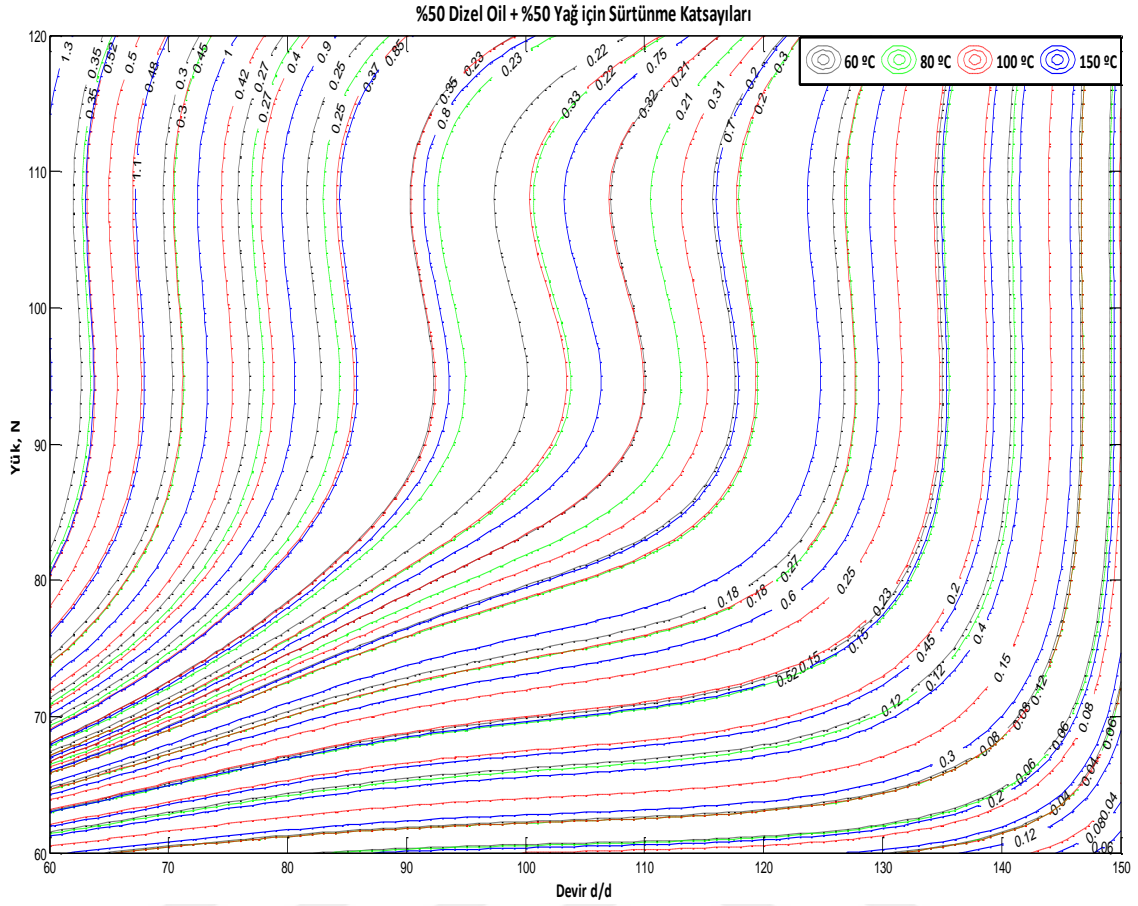


Şekil 4.10 %100 Yağ kullanımında sıcaklığa bağlı sürtünme katsayıları

Sürtünme katsayılarının yüksek yük, düşük devir ve yüksek sıcaklıklarda maksimum değerlere ulaştığı, düşük yük, yüksek devir ve düşük sıcaklıklarda ise minimum değerlerde kaldığı görülmüştür. 120 N yük, 60 d/d ve 150 °C şartlarında sürtünme katsayısı 0,2846 ile maksimum iken; 60 N yük, 150 d/d ve 60 °C şartlarında ise sürtünme katsayısı 0,0026 ile minimum değerdedir.

Sıcaklık artışının aşınma kaybı artışıdaki etkisi çok belirgin ortaya konulmuştur. Bu etki özellikle 150 °C için oldukça belirgin olup, bu sıcaklıkta en düşük sürtünme katsayılarının elde edildiği yüksek devir-düşük yük bölgesindeki sürtünme katsayısı değerlerine, diğer sıcaklıklarda çok daha düşük devir ve yüksek yüklerde ulaşılabilir. Bu duruma göre yüksek sıcaklık etkisi ile segman-silindir çifti sürtünmelerinin yaklaşık olarak 3,5 kata kadar arttığını göstermektedir.

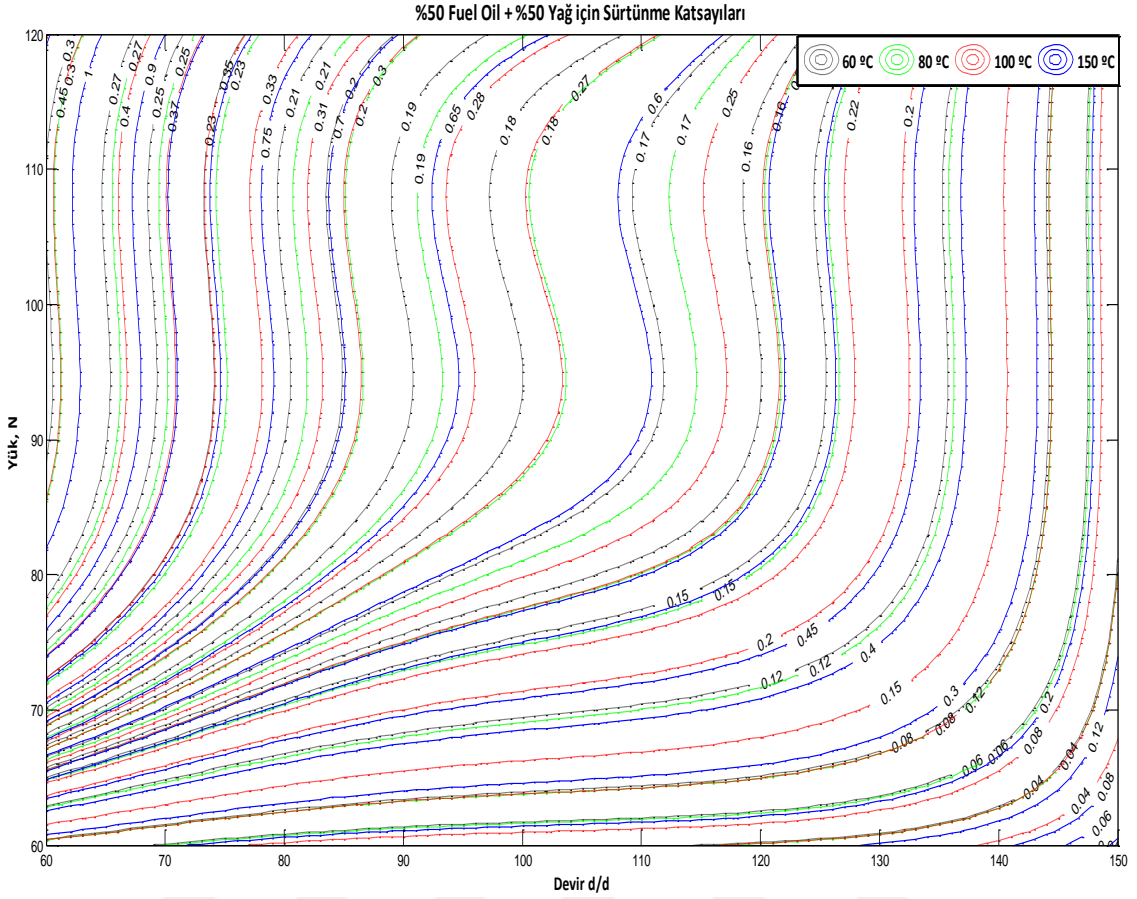
Şekil 4.11' de %50 Yağ + %50 Dizel Oil yağlayıcı olarak kullanıldığında sıcaklık değişimine bağlı olarak elde edilen sürtünme katsayılarının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.11 %50 Yağ + % 50 Dizel Oil kullanımında sıcaklığa bağlı sürtünme katsayıları Yük ve devir sayısına göre değişim göz önüne alındığında 120 N yük, 60 d/d ve 150 °C şartlarında sürtünme katsayısı 1,3547 ile maksimum iken; 60 N yük, 150 d/d ve 60 °C şartlarında ise sürtünme katsayısı 0,0125 ile minimum değerdedir.

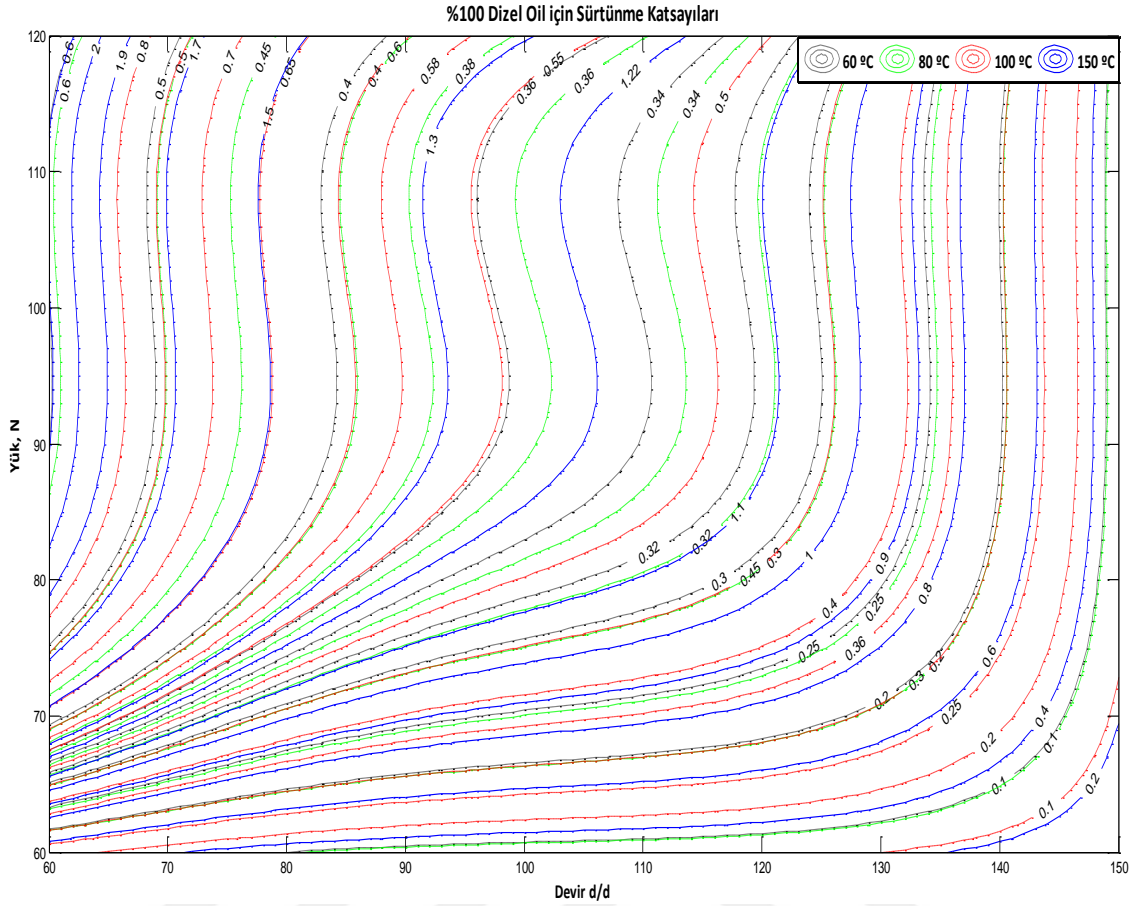
Yağ içerisinde dizel yakıt karıştığında tüm sıcaklık değerlerinde sürtünme katsayılarının aynı sıcaklık değerlerinde bile 4 kate yakın arttığı görülmektedir. Bu artışın nedeni dizel yakıt viskozite değerinin yağa göre düşük olmasıdır. Ancak sıcaklık arttıkça sürtünme katsayısındaki bu artış çok daha etkili hale gelmektedir. En düşük sürtünme katsayılarının elde edildiği yüksek devir düşük yük bölgesinde bile sürtünme katsayısı aynı sıcaklık değeri (150 °C) için yaklaşık 4,5 kat artmıştır. Bu durum motorun düşük sürtünme katsayısı bölgesinde çalıştırılması durumunda bile, katsayıların yağlayıcı etkisi ile 4,5 kat daha fazla olacağı anlamına gelmektedir.

Şekil 4.12' de %50 Yağ + %50 Fuel Oil kullanılması durumunda sıcaklık değişimine bağlı olarak meydana gelen sürtünme katsayılarının değişimi gösterilmiştir.



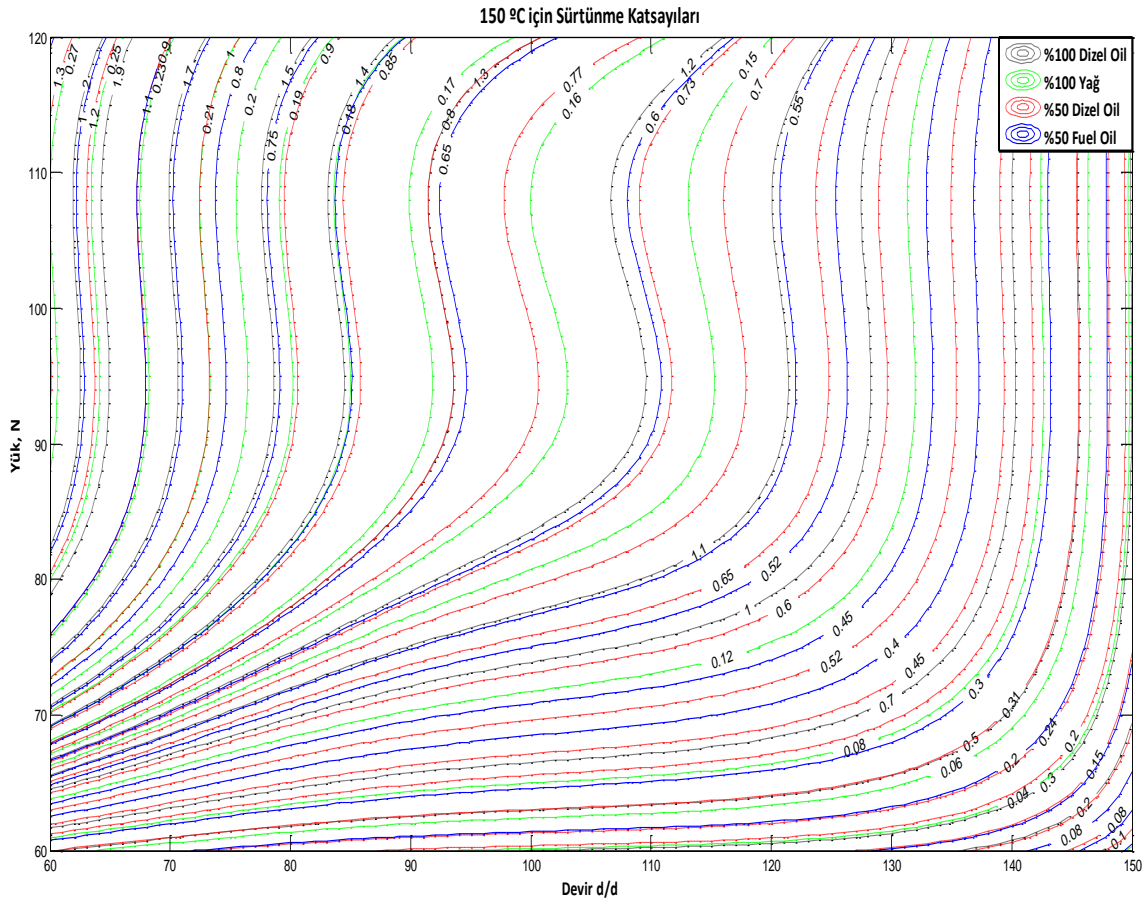
Şekil 4.12 %100 Yağ + %50 Fuel Oil kullanımında sıcaklığa bağlı sürtünme katsayıları 120 N yük, 60 d/d ve 150 °C şartlarında sürtünme katsayısı 1,1079 ile maksimum iken; 60 N yük, 150 d/d ve 60 °C şartlarında ise sürtünme katsayısı 0,0102 ile minimum değerdedir. Sürtünme katsayılarının yağın içerisine %50 Fuel Oil karışması durumunda, %100 yağ kullanımına göre yaklaşık olarak 3,9 kat arttığı görülmüştür.

Yağlama yağı içerisine ağır yakıt karıştığında sürtünme katsayılarının aynı oranlarda dizel yakıt karışımına göre daha düşük olmuştur. Bunun nedeni Fuel Oil'in viskozitesinin dizel yakıtı göre çok daha yüksek olmasıdır. Yakıt sıcaklığı 150 °C ye ulaştığında Fuel Oil viskozitesi, Dizel Oil viskozite değerine yaklaşmaktadır. Bu durumda Fuel Oil, yağ içerisine karıştığında viskozite artırıcı bir katkı maddesi gibi davranmaktadır. Ancak Fuel Oilin yağlama özelliği, yağlama yağına göre daha düşük olduğu için %100 yağ ile çalışmaya göre daha fazla sürtünmeye neden olmaktadır.



Şekil 4.13 %100 Dizel Oil kullanımında sıcaklığa bağlı sürtünme katsayıları

Şekil 4.13' da yağlayıcı olarak %100 Dizel Oil kullanılması durumunda sıcaklık değişimine bağlı olarak segman-silindir çifti arasında meydana gelen sürtünme katsayılarının yük ve devir sayısına göre değişimi gösterilmiştir. 120 N yük, 60 d/d ve 150 °C şartlarında sürtünme katsayısı 2,215 ile maksimum iken; 60 N yük, 150 d/d ve 60 °C şartlarında ise sürtünme katsayısı 0,0203 ile minimum değerdedir. Sürtünme katsayılarının yağın içerisine %50 Fuel Oil karışması durumunda, %100 yağ kullanımına göre yaklaşık olarak 7,8 kat arttığı görülmüştür.

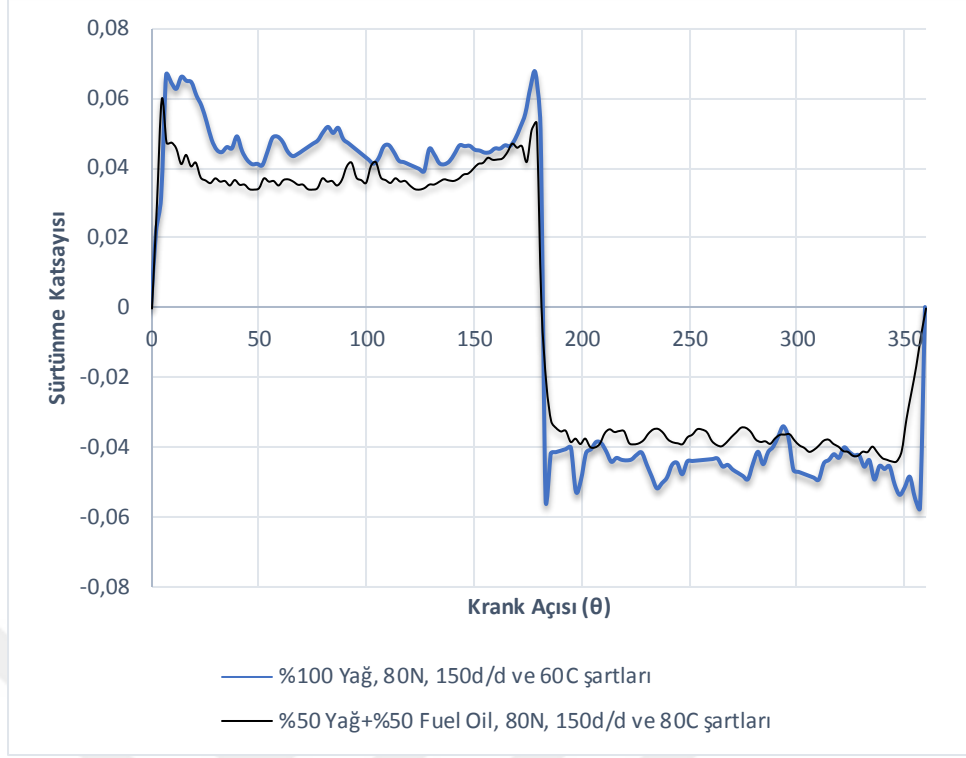


Şekil 4.14 150 °C’de farklı yağlayıcılar için sürtünme katsayıları

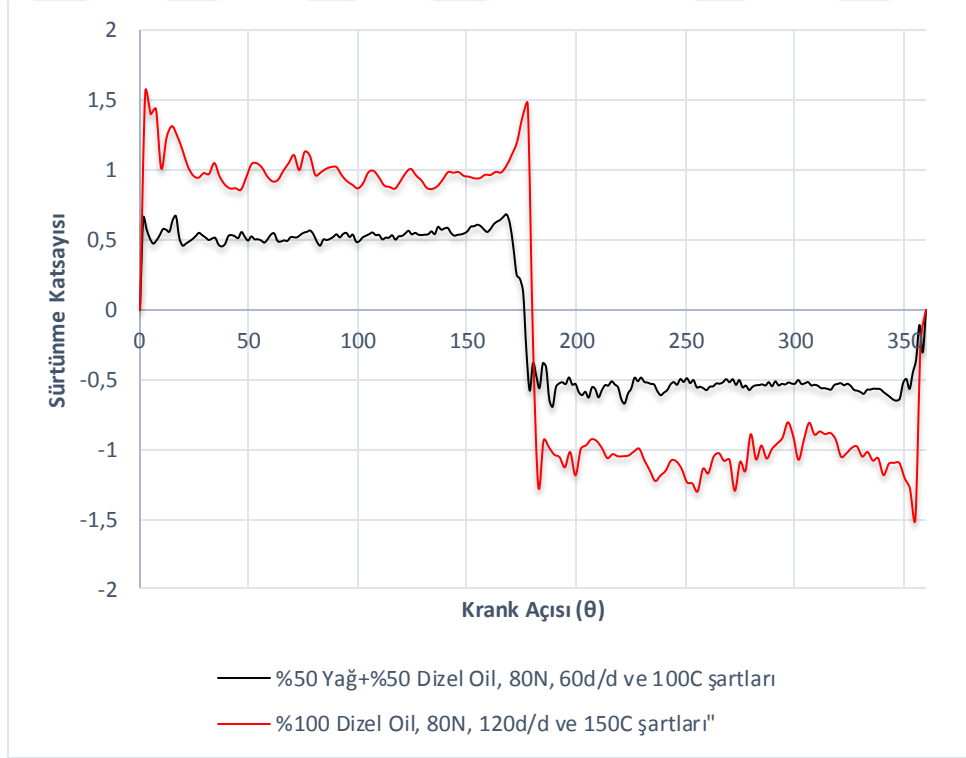
Şekil 4.14’ de 150 °C sıcaklıkta, dört farklı yağlayıcı kullanımı durumunda, yük ve devir sayısına göre sürtünme katsayılarının değişimleri gösterilmiştir. Deneyle sonuçunda en yüksek sürtünme katsayısının yağlayıcı olarak %100 Dizel Oil kullanılması durumunda; 150 °C sıcaklıkta, 60 d/d ve 120 N yükte meydana geldiği ve bu değer 2,2015 olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca sürtünme katsayılarının %100 Dizel Oil kullanılması durumunda, %100 yağ kullanımına göre yaklaşık olarak 7,8 kat, yağın içerisine %50 Fuel Oil karışması durumunda, %100 yağ kullanımına göre yaklaşık olarak 3,9 kat ve yağın içerisine %50 Dizel Oil karışması durumunda, %100 yağ kullanımına göre yaklaşık olarak 4,8 kat arttığı görülmüştür.

4.3 Anlık sürtünme katsayısı sonuçları

Kullanılan üç yönlü kuvvet sensörü vasıtasıyla, bir çevrim boyunca alınan anlık sürtünme katsayısı değerleri verilmiştir.

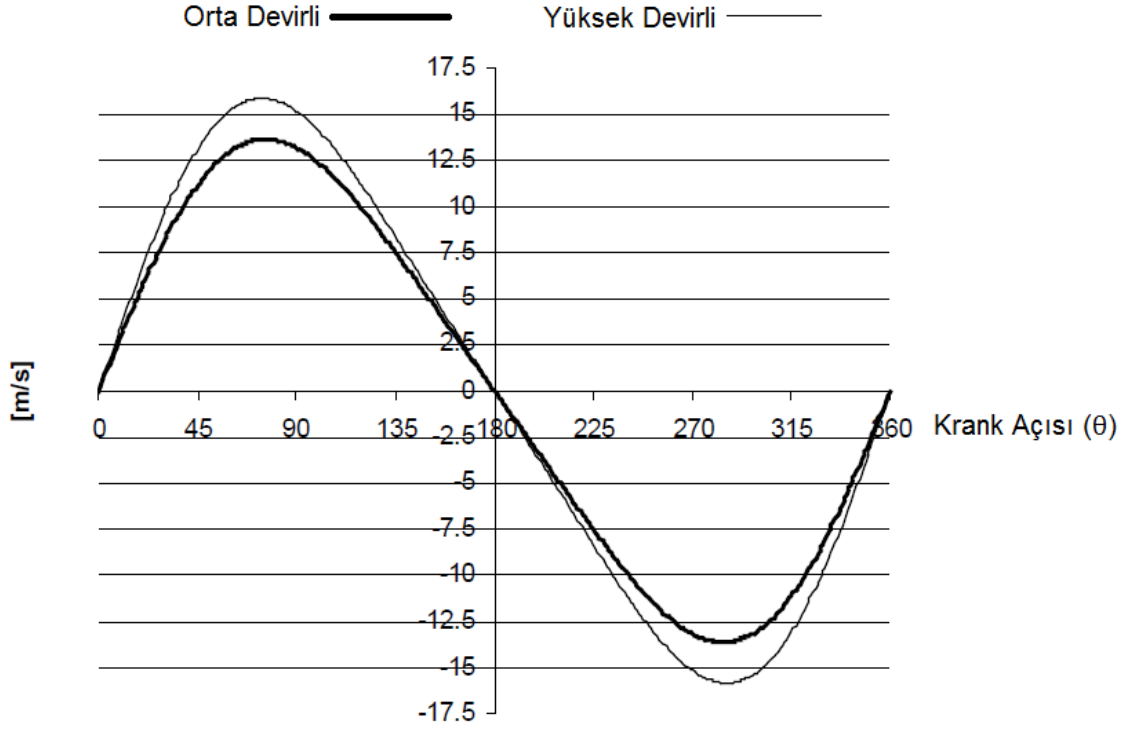


Şekil 4.15 Taguchi reçetelerine göre Deney 2 ve Deney 10'un bir çevrim boyunca anlık sürtünme katsayısı grafikleri



Şekil 4.16 Taguchi reçetelerine göre Deney 6 ve Deney 14'ün bir çevrim boyunca anlık sürtünme katsayısı grafikleri

Buraya kadar alınan tüm sonuçlarda da görüldüğü gibi devir sayısının artmasıyla segman-silindir çifti arasındaki yağ filmi hidrodinamik yağlama koşuluna ulaştığından bu durumda sürtünme katsayıları en aza inmektedir. Şekil 4.17’de görüldüğü gibi piston silindir içerisinde git-gel hareketi yaparken üst ve alt ölü noktalarda hızı sıfıra yaklaşmaktadır.



Şekil 4.17 Orta ve Yüksek devirli motorlarda krank açısına bağlı pistonun rölatif hızı[79]
Şekil 4.17; çevrim boyunca alınan anlık sürtünme katsayılarının verildiği Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 ile karşılaştırıldığında, piston hızının maksimuma ulaştığı noktalarda oluşan hidrodinamik yağlama sebebi ile sürtünme katsayılarının minimum, üst ölü nokta ve alt ölü nokta seviyelerinde ise sürtünme katsayılarının maksimumda olmasına açıklık getirmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Segman-silindir çifti arasındaki sürtünme ve aşınma davranışları farklı deniz yağları kullanılarak incelenmiştir. Aşınma ve sürtünmelerdeki en etkin parametrenin motor devri olduğu anlaşılmıştır. En fazla sürtünme katsayısının ve aşınma kaybının yüksek yük-düşük devir bölgesinde olduğu görülmüştür.

Segman-silindir çiftinin belirli yük ve devir aralığında çalıştığı dikkate alındığında, çalışma şartlarında değişen en önemli parametrenin sıcaklık olduğu görülmektedir. Tüm çalışma şartlarında sürtünme ve aşınma kayıp değerlerinin sıcaklık artışından etkilendiği anlaşılmıştır. Bu ekinin özellikle yüksek sıcaklıklarda, viskozitedeki azalmaya bağlı olarak önemli ölçüde arttığı görülmüştür.

Deneylede yağlayıcı olarak kullanılan yağ, beklenildiği gibi diğerlerine göre en düşük aşınma kaybına yol açmıştır. %100 Dizel Oil' in yağlayıcı olarak kullanıldığı durumda ise aşınmalar ve sürtünmelerin tüm çalışma şartlarında diğer yağlayıcılara göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

%50 Fuel Oil' in yağlayıcı olarak kullanılması durumunda, %50 Dizel Oil' e göre daha düşük sürtünme katsayıları ve aşınma kayıpları gözlenmiştir. Bunun nedeni, aynı sıcaklık şartlarında Fuel Oil-Yağ karışımları viskozite değerinin, Dizel Oil-Yağ karışımlarına göre daha yüksek olmasıdır.

Yüksek sıcaklıklarda, yağ-yakıt karışımlarının viskozite değerlerindeki azalmaya bağlı olarak sürtünme katsayıları ve aşınma kayıpları da artmıştır. Gemilerde, gerek jeneratör dizellerinde gerekse ana makinelerde yük artışına bağlı olarak soğutma suyu sıcaklığındaki artış, silindir cidar sıcaklığının da artmasına neden olmaktadır. Ayrıca

arızalı enjektör, kırık segman vb. kötü işletmecilik sorunlarından kaynaklanan yağlama yağına yakıt karışma durumları da aşınma kayıplarının artmasına neden olmaktadır. Yüksek sıcaklığın aşınmaya olan etkisi, viskozite indeks değerinin yüksek tutulması ve soğutma suyu sıcaklığının sınır değerlerin üzerine çıkarılmaması ile azaltılabilir.

Gemilerde enerji verimliliğinin önemli olduğu günümüzde, motor üreticileri “slow-steaming” (gemilerin düşük hızlarda işletilmesi) uygulamasına bağlı olarak motorları düşük yüklerde çalışacak şekilde üretilmektedir. Özellikle düşük yüklerde düşük yüzey sıcaklığından dolayı sülfürik asit yoğununun neden olduğu korozif aşınmanın azaltılabilmesi için silindir soğutma suyu çıkış sıcaklığı 70 - 130 °C aralığında çalıştırılabilme imkanı tanınmaktadır[79].

Bu durumda silindir yağlama yağının, yüksek sıcaklığın neden olduğu adeziv aşınma kaybı ve düşük sıcaklıkta çalışma durumunda sülfürik asit yoğunmasının neden olduğu korozif aşınma kayıplarını aynı anda minimize etmesi gerekir.

Yapılan çalışmada, özellikle düşük devir-yüksek yük bölgelerinde aşınma kayıplarının çok yüksek olduğu dikkate alındığında bu bölgedeki aşınma kayıplarının minimum düzeyde tutulabilmesi için mevcut motorlarda kullanılan yağlama yağları yerine özellikleri iyileştirilmiş, yüksek sıcaklıkta özelliklerini kaybetmeyen (daha yüksek viskozite indeksi) yağların kullanılması önerilebilir.

Gemilerde zaman zaman işletme esnasında silindir yağlama yağı özelliklerinden farklı olan ana makine ve jeneratör dizeli karter yağlarının veya farklı türde yağların-yağ karışımlarının silindir yağlama yağı yerine kullanımı zarureti doğabilmektedir. Bu kapsamda; yukarıda belirtilen şartların aşınma ve sürtünme davranışları üzerine etkileri incelenebilir.

Bu çalışmada yağa yüksek oranda yakıt karışmasıyla, özellikle yüksek sıcaklık ve yüklerde aşınma kayıplarında önemli ölçüde artış tespit edilmiştir. Bu kapsamda işletme sırasında yağlama yağına karışabilecek olan yakıtın, sürtünme ve aşınma kayıplarındaki kabul edilebilir oranının tespitine yönelik parametrik çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Andersson, B. S. (1991). "Company perspective in vehicle tribology – Volvo, 17th Leeds-Lyon Symposium on Tribology – Vehicle Tribology" Tribology Ser., 18:503-506.
- [2] Heywood, J.B.(1988). Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Inc., New York.
- [3] Sekmen, Y.(2003). Buji ile Ateşlemeli Bir Motorun Sıkıştırma OranınınDeğiştirilebilirHale Getirilmesi ve Performansa Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, GaziÜniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [4] Kim,Myoung(2005). Friction Force Measurement and Analysis of Rotating Liner Engine. Doctor of Philosophy Thesis, The Faculty of The Graduate School of The University of Texas, Austin.
- [5] Johansson, S., Nilsson, P.H., Ohlsson, R. ve Rosén, B.-G. (2011). "Experimental friction evaluation of cylinder liner/piston ring contact", Wear, 271: 625-633.
- [6] Truhan, J.J., Qu J. ve Blau, P.J. (2005). "A test rig to measure friction and wear of heavy duty diesel engine piston rings and cylinder liners using realistic lubricants" Tribology International, 38: 211-218.
- [7] Tamminen, J., Sandström, C.-E. ve Anderson, P. (2006). "Influence of load on tribological condition in piston ring and cylinder liner contacts in medium-speed diesel engine" Tribology International, 39: 1643-1652.
- [8] Grabon, W., Koszela, W., Pawlus, P. ve Ochwat, S. (2013). "Improving tribological behaviour of piston ring-cylinder liner frictional pair by liner surface texturing" Tribology International, 61: 102-108.
- [9] Ma, Z., Henein, N.A. ve Bryzik, W. (2006) . "A model for wear and friction in cylinder liners and piston rings" Tribology Transactions, 49: 315-327.
- [10] Bolander, W.N. ve Sadeghi, F. (2007). "Deterministic modeling of honed cylinder liner friction" Tribology Transactions, 50: 248-256.
- [11] Tung, S.C. ve Gao, H. (2003). "Tribological charecteristic and surface interaction between piston ring coating and a blend of energy-conserving oils and ethanol fuels" Wear, 255: 1276-1285.

- [12] Ronen, A., Etsion, I. ve Kligerman, Y. (2001). "Friction-reducing surface-texturing in reciprocating automotive components" *Tribology Transactions*, 44: 359-366.
- [13] Ma, Y., Li, S., Jin, Y., Wang, Y. ve Tung, S.C. (2004). "Impacts of friction-Modified fully formulated engine oils on tribological performance of nitrided piston rings sliding against cast iron cylinder bores" *Tribology Transactions*, 47: 421-429.
- [14] Priest, M. ve Taylor, C.M. (2000). "Automobile engine tribology – approaching the surface" *Wear*, 241: 193-203.
- [15] Tung, S.C. ve Huang, Y. (2004). "Modelling of abrasive wear in a piston ring and engine cylinder bore system" *Tribology Transactions*, 47: 17-22.
- [16] Douglas, R.M., Steel, J.A. ve Reuben, R.L. (2006). "A study of the tribological behaviour of piston ring/cylinder liner interaction in diesel engines using acoustic emission" *Tribology International*, 39: 1634-1642.
- [17] Livanos, G.A. ve Kyrtatos, N.P. (2007). "Friction model of marine diesel engine piston assembly" *Tribology International*, 40: 1441-1453.
- [18] Tomanik, E. (2008). "Friction and wear bench tests of different engine liner surface finishes" *Tribology International*, 41: 1032-1038.
- [19] Tan, Y.-C. ve Ripin, Z.M. (2011). "Frictional behaviour of piston rings of small utility two stroke engine under secondary motion of piston" *Tribology International*, 44: 592-602.
- [20] Jensen, M.F., Bøttiger, J., Reitz, H.H. ve Benzoni, M.E. (2002). "Simulation of wear characteristics of engine cylinders" *Wear*, 253: 1044-1056.
- [21] Sjödin, U.I. ve Olofsson, U.L.-O. (2004). "Experimental study of wear interaction between piston ring and piston groove in a radial piston hydraulic motor" *Wear*, 257: 1281-1287.
- [22] Truhan, J.J., Qu J. ve Blau, P.J. (2005). "The effect of lubricating oil condition on the friction and wear of piston and cylinder liner materials in a reciprocating bench test" *Wear*, 259: 1048-1055.
- [23] Skopp, A., Kelling, N., Woydt, M. ve Berger, L.-M. (2007). "Thermally sprayed titanium suboxide coatings for piston ring/cylinder liners under mixed lubrication and dry-running conditions" *Wear*, 262: 1061-1070.
- [24] Gara, L., Zou, Q., Sangeorzan, B.P., Barber, G.C., McCormick, H.E. ve Mekari M.H. (2010). "Wear measurement of cylinder liner of a single cylinder diesel engine using a replication method" *Wear*, 268: 558-564.
- [25] Michalski, J. ve Woś, P. (2011). "The effect of cylinder liner surface topography on abrasive wear of piston-cylinder assembly in combustion engine" *Wear*, 271: 582-589.
- [26] Olander, P., Holman, P. ve Jacobson S. (2013). "Piston ring and cylinder liner wear aggravation caused by transition to greener ship transports-Comparison of samples from test rig and field" *Wear*, 302: 1345-1350.

- [27] Priest, M., Dowson, D. ve Taylor, C.M. (1999). "Predictive wear modelling of lubricated piston rings in a diesel engine" *Wear*, 231: 89-101.
- [28] Kapsız, M., Durat, M. ve Ficici F. (2011), "Friction and wear studies between cylinder liner and piston ring pair using Taguchi desing method" *Advance in Engeeneering Software*, 42: 595-603.
- [29] Ryk, G., Kligerman, Y. ve Etsion, I. (2002) "Experimental investigation of laser surface texturing for reciprocating automative components" *Tribology Transaction*, 45: 444-449.
- [30] Hazar, H. ve Öner, C. (2007). "CrN kaplamanın dizel motor silindir gömleği aşınmasına etkisi" *Mühendislik ve Makina*, 575: 14-18.
- [31] Çakır, M. ve Akçay, İ.H. (2011). "İçten yanmalı motorlarda segman gömlek sürtünmesinin motor performansı ile ilişkisi üzerine bir inceleme" *C.B.Ü. Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 16: 33-44.
- [32] Ryk, G. ve Etsion, I. (2006). "Testing piston ring with partial laser surface texturing for friction reduction" *Wear*, 261: 792-796.
- [33] Abdullah, S., Adril, E., Muchtar, A. ve Ariffin, A.K. (2010). "Friction reduction in compressed natural gas direct injection engine using pistong ring with diffusion chromium coating" *Journal of Applied Sciences*, 10: 462-470.
- [34] Sutaria, B.M., Bhatt, D.V. ve Mistry, K.N. (2009). "Simulation of piston ring friction models of single cylinder internal combustion engine" *World Applied Sciences Journal*, 7: 998-1003.
- [35] Keller, J., Fridrici, V., Kapsa, Ph., Vidaller, S. ve Huard, J.F. (2009). "Influence of material nature and surface texturing on wear of heavy-duty diesel engine cylinder liners" *Tribology Transactions*, 52: 121-126.
- [36] Johansson, S., Nilsson, P.H., Ohlsson, R., Anderberg, C. ve Rosén, B.-G. (2008). "New cylinder liner surface for low oil consumption" *Tribology International*, 41: 854-859.
- [37] Srivastava, D.K., Agarwal, A.K. ve Kumar J. (2007). "Effect of liner surface properties on wear and friction in a non-firing engine simulator" *Material and Desing*, 28: 1632-1640.
- [38] Papadopoulos, P., Priest, M. ve Rainforth W.M. (2007) "Investigation of fundamental wear mechanisms in internal combustion engines" *Engineering Tribology*, 221: 333-343.
- [39] Keller, J., Fridrici, V., Kapsa, Ph., Vidaller, S. ve Huard, J.F. (2007). "Influence of chemical composition and microstructure on wear of heavy-duty diesel engine cylinder liners" *Wear*, 263: 1158-1164.
- [40] Hwang, J.-H., Han, M.-S., Kim, D.-Y. ve Youn, J.-G. (2006). "Tribological behavior of plazma spray coatings form marine diesel engine piston ring and cylinder liner" *Journal of Material Engineering and Performance*, 15: 328-335.

- [41] Xu, Guizhen H., Lee, Jonah H., Liang, H. ve Georing D. (2004). "Tribological properties of solid - lubricating coatings on cylinder bore at low temperature" *Wear*, 257: 59-65
- [42] Uras, Hacı Mehmet (1984). A study of piston-ring assembly friction, Doctor of Philosophy Thesis, Mechanical Engineering in the University of Michigan, Michigan.
- [43] Cesur, İdris (2008). Farklı yakıt karışımlarının segman-silindir çifti arasındaki sürtünme ve aşınma özelliklerine etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [44] Saklakoğlu İ.B. ve Saklakoğlu, N. (2004). "Plazma ortamında iyon aşılama yöntemi (PIII-PI³), genel prensipleri ve uygulama alanları" *Mühendis ve Makine*, 528: 17-22.
- [45] Jost, H. Peter (1974). "Economic impact of tribology" National bureau of standarts special publications, 423: 117-124.
- [46] Uğur, Fatih (2006). "Süper beyinler nanoteknoloji için dönüyor" *Aksiyon Dergisi*, 613 Sayı, Kapak yazısı.
- [47] Okay, Faik (2006). PVD yöntemi ile Tin kaplı östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin adhesiv aşınma davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [48] Ürün, Recep (2008). Sürtünme ve aşınma test cihazı tasarımı ve imalatı, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- [49] Gwidon, W.S. ve Andrew, W.B. (2005). *Engineering Tribology*, Butterword-Heinemann.
- [50] Ludema, K.C. (1996). *Friction, Wear, Lubrication: a Textbook in Tribology*, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida.
- [51] Soydan, Yavuz ve Ulukan Lütfullah. (2013). *Triboloji: Sürtünme, Aşınma ve Yağlama Bilim ve Teknolojisi*, Tagem Kopisan, Sakarya.
- [52] Young, Hung D. ve Freedman Roger A. (2012). *Sears and Zemansky's University Physics: with modern physics*, 13th Ed., Pearson Education, Inc., San Francisco, California.
- [53] Ferguson, Colin R. ve Kirkpatrick Allan T. (2001). *Internal Combustion Engines Applied Thermoscience*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [54] Richarson, Dan E. (2000). "Review of Power Cylinder Friction for Diesel Engines" *J. Eng. Gas Turbines Power*, 122(4): 506-519.
- [55] Kovach, J., Tsakiris, E., and Wong, L., "Engine Friction Reduction for Improved Fuel Economy," *SAE Technical Paper 820085*, 1982, Doi:10.4271/820085.
- [56] Vanesan, G. (2001). *Internal Combustion Engines*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, Sai Printo Pack, New Delhi.
- [57] Kılıç, İlker (2006). İçten yanmalı motorlarda sürtünme kayıpları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [58] Keven, Arzu (2013). Fındık yağı ve fındık yağı metil esterinin tribolojik performansının incelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [59] Özmen, Tolga (2007). Katı ortamda borlanmış DDK 60 dökme demirin borür tabakası büyüme kinetiği ve aşınma özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [60] Şen, Uğur (1997). Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ve özellikleri, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [61] Er, Ümit (2003). Bor yayımıyla yüzeyi sertleştirilmiş çeliklerin aşınmaya karşı dayanımlarının ve pulluk uç demirlerinde uygulama olanaklarının araştırılması, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [62] Hazar, Hanbey (2004). Bir dizel motor silindir yüzeyinin seramik malzeme ile kaplanarak aşınma davranışının deneysel incelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [63] Yu H.-J. ve Bhole S. D. (1990). "Development of a prototype abrasive wear tester for tillage tool materials" Tribology International, 23(5): 309–316.
- [64] Sarı, Nejat Y. ve Kaluç, Erdiç (1996). "Endüstride aşınma problemleri" Makine ve Metal Teknolojisi, 50: 64-68.
- [65] Sarı, Nejat Y., Şirin, Şule Y. Kaluç, Erdiç ve Tülbentçi, Kutsal (1997). "Makina parçalarının aşınmasına karşı modern yüzey işlemleri -1 " Makine Magazin, 14: 48-51.
- [66] Bhushan, Bharat (2001). Modern Tribology Handbook, CRC Press LLC, USA.
- [67] Ulutan, Mustafa (2007). AISI 4140 çeliğinin yüzey sertleştirme işlemleri ve kaplama yöntemleri sonrası mekanik davranışlarının araştırılması, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [68] Chattopadhyay, R. (2001) Surface Wear: Analysis, Treatment, and Prevention, ASM International, Materials Park, Ohio, United States of America.
- [69] Doosan – Man B&W Instruction Manual, Operation Manual (Volume I), Doosan Engine Co., Ltd. Gyungnam, Korea.
- [70] Exxon Mobil, www.exxonmobil.com/UK-English/Marine/PDS/GLXXENMRNEMMobilgard_570.aspx , 17 Aralık 2014
- [71] Omnimpex Group, www.omnimpex.ro/texte/petroliere/engleza07/MARINE%20%20DIESEL%20OIL%20%28MDO%29.pdf , 17 Aralık 2014
- [72] Omnimpex Group, [www.omnimpex.ro/texte/petroliere/engleza_07/MARINE%20%20FUEL%20OIL%20RMG%20380%20\(IFO%20380\).pdf](http://www.omnimpex.ro/texte/petroliere/engleza_07/MARINE%20%20FUEL%20OIL%20RMG%20380%20(IFO%20380).pdf) , 17 Aralık 2014
- [73] Elçiçek, Hüseyin (2012). Sulu ortamda karbondioksit basıncı altında üleksit cevherinin çözünme kinetiği ve optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

- [74] Taguchi, G., Elsayed, E., A. ve Hsiang, T., C. (1989). Quality Engineering In Production Systems, McGraw-Hill International Editions, Engineering Series, Newyork, USA.
- [75] Savaş, Ömer (2010). Alüminyum esaslı in-situ borür takviyeli kompozitlerin üretimi ve özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [76] Ross, Phillip. J. (1988). Taguchi Techniques for Quality Engineering, McGraw – Hill, Newyork, USA.
- [77] Lochner, Robert, H., ve Matar, Joseph E. (1990). Designing for Quality, An introduction to the best of Taguchi and western methods of statistical experimental design, Chapman and Hall, London, Newyork, Tokyo, Melbourne, Madras.
- [78] İzgiz, Savaş (1999). Deney tasarımı ve Taguchi Metodu - Ürün ve Proseslerinin Optimizasyonu, Federal Mogul Yayınlar, Maşukiye.
- [78] Andersson, Peter, Tamminen, Jaana ve Sandström Carl-Erik (2002). Piston ring tribology; a literature survey, VTT Tiedotteita – Research Notes 2178, ESPOO 2002.
- [79] Man Diesel & Turbo, www.mandieselturbo.com/download/Project_guides_tire2/epub/G95EM-C9_5.pdf, 17 Aralık 2014

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Zafer AYDIN
Doğum Tarihi ve Yeri : 01/02/1985 - Bulancak
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : czaferaydin@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2015
Lisans	Gemi Makineleri İşletme Müh.	İstanbul Teknik Üniversitesi	2011
Lise	Fen Bilimleri	Tuzla Lisesi	2003

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013 - Halen	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2012 - 2013	İnce Denizcilik – Limakport A.Ş.	Uzakyol 2. Mühendisi
2011 - 2012	Mardaş Denizcilik	Uzakyol Vardiya Müh.

2009 - 2011	İnce Denizcilik	Uzakyol Vardiya Müh.
2009	İnce Denizcilik	Makine Stajyeri
2008	Şahin Çelik Tersanesi	Makine Stajyeri

YAYINLARI

Makale

1. Cesur, E., Ayhan, V., Parlak, A., Savas, O., & Aydın, Z. (2014). "The Effects of Different Fuels on Wear between Piston Ring and Cylinder." *Advances in Mechanical Engineering*.
2. Kokkulunk, G., Parlak, A., Bağcı, E., & Aydın, Z. (2014). "Application of Taguchi Methods for the Optimization of Factors Affecting Engine Performance and Emission of Exhaust Gas Recirculation in Steam-injected Diesel Engines." *Acta Polytechnica Hungarica*, 11(5), 95-107.

Bildiri

1. Bilgili, L., Alvar, M., Elçiçek, H., Aydın, Z., Duranay, A., Karaman, G., Saral, H., & Çelebi, U. B." An Investigation an Comparision on Energy Efficiency Desing Index (EEDI) and Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI) of Some Ship." 17th International Symposium on Environmental Pollution and its Impact on Life in the Mediterranean Region.
2. Elçiçek, H., Parlak, A., & Aydın, Z. (2013, Mayıs). Balast Suyunun Çevresel Etkileri. Su ve Biyolojik Çeşitlilik Sempozyumu.

Proje

1. Miller Çevrimiyle Çalışan Bir Dizel Motoruna Su Buharı Enjeksiyonu-EGR Uygulamasının NOx Emisyonlarına ve Performansa Etkilerinin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Araştırmacı, TÜBİTAK.

2. Balast Suyundaki Toplam Koliform, Fekal koliform ve Salmonella Bakterilerinin Gideriminin Araştırılması, Araştırmacı, YTÜ BAPK.
- 3 Deniz taşıtlarında kullanılan farklı yağların segman-silindir çifti yüzeylerindeki tribolojik özelliklerine etki eden parametrelerin incelenmesi, Araştırmacı, YTÜ BAPK.

