

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**

**FE₃O₄ DEMİR OKSİT NANOPARTİKÜLÜNÜN
SÜRTÜNMEYE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUSTAFA ALVER

DENİZLİ, NİSAN - 2020

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**



**FE₃O₄ DEMİR OKSİT NANOPARTİKÜLÜNÜN
SÜRTÜNMEYE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

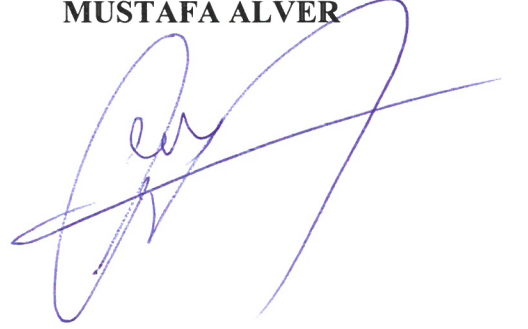
MUSTAFA ALVER

DENİZLİ, NİSAN - 2020

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Birimi tarafından 2019FEBE036 nolu proje ile desteklenmiştir.**

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

MUSTAFA ALVER



ÖZET

**FE₃O₄ DEMİR OKSİT NANOPARTİKÜLÜNÜN SÜRTÜNMEYE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MUSTAFA ALVER
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ERKAN ÖZTÜRK)**

DENİZLİ, NİSAN - 2020

Sürtünme karşılıklı temas halindeki yüzeylerin maddi alanları arasındaki etkileşimdir. Sürtünme özellikle içten yanmalı motorlarda kayıplara neden olmasından dolayı istenmeyen bir durumdur. Mekanik kayıplar içten yanmalı motorlarda etkili kayıplardan bir tanesidir. Mekanik kayıpların oluşmasındaki en büyük etkenlerden bir tanesi sürtünmedir. İçten yanmalı motorlarda sürtünmeyi önlemek için etkili bir yöntem olarak yağlama sistemleri kullanılmaktadır. Yağlama sisteminde kullanılan yağların birçok özelliklerini geliştirmek amacıyla yağın imalatı aşamasında yağ içerisine bazı katkılar ilave edilmiştir. Ticari olarak kullanılan yağlar içerisindeki katkılar karşılaşılan tüm sorunların aşılması için yeterli olmadığından nano-teknolojide son yaşanan gelişmeler ışığında yağlara nanopartikül ilaveleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasında içten yanmalı motorlarda kullanılan Petrol Ofisi LA 10W-40 tipi motor yağı içerisine Fe₃O₄ nanopartikülleri ilave edilerek, Fe₃O₄ nanopartiküllerinin sürtünme azaltma etkisi disk üstünde bilye cihazı ile test edilmiştir. Stribeck eğrisi üzerinden bulunan on üç (13) nokta için üç ayrı normal kuvvet ve 13 ayrı hız değerinde yapılan testlerde 15 gr/L ve 20 gr/L oranlarında kullanılan Fe₃O₄ nanopartiküllerinin baz yağın tüm yağlama rejimleri için ortalama sürtünme katsayısında %20'lik bir iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir. 20 gr/L oranında Fe₃O₄ nanopartikül katkısı özellikle hidrodinamik bölgede 15 gr/L Fe₃O₄ nanopartikül katkılı yağa göre daha düşük performans göstermiştir. İçten yanmalı motorda baz yağ, 15 gr/L ve 20 gr/L oranlarında nanopartikül katkılı yağlar ile yapılan test sonucunda; baz yağın en düşük yakıt tüketimine sahip olduğu, 15 gr/L ve 20 gr/L nanopartikül katkılı yağların sırasıyla yakıt tüketimini %3.78 ve %4.38 arttırdığı görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELELER: Nanopartikül, içten yanmalı motor, yağ katkısı, sürtünme, disk üstünde bilye, demir oksit

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF Fe_3O_4 IRON OXIDE NANOPARTICLE ON FRICTION

MSC THESIS

MUSTAFA ALVER

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
AUTOMOTIVE ENGINEERING**

(SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. ERKAN ÖZTÜRK)

DENİZLİ, APRIL 2020

Friction is the interaction between the surface areas in contact of materials. Friction is particularly undesirable as it causes the loss in internal combustion engines. Mechanical losses are one of the effective losses in internal combustion engines. One of the biggest factors in the formation of the mechanical losses is friction. Lubrication systems are used as an effective method to prevent friction in internal combustion engines. In order to improve the many properties of the oils used in the lubrication system, some additives were added to the oil during the manufacturing process. Since additives in commercially available oils are not sufficient to overcome all the problems encountered, nanoparticle additions are being made in light of recent developments in nano-technology.

In this thesis, Fe_3O_4 nanoparticles were added to Petrol Ofisi LA 10W-40 type engine oil used in internal combustion engines and the friction reduction effect of Fe_3O_4 nanoparticles was tested with ball on disc device. A 20% improvement in the average friction coefficient of Fe_3O_4 nanoparticles for all lubrication regimes of the base oil used in the ratios of 15 gr/L and 20 gr/L in tests of three normal forces and 13 separate speeds for thirteen (13) points on the Stribeck curve provided. 20 gr/L ratio Fe_3O_4 nanoparticle additive showed lower performance especially in hydrodynamic region than 15 gr/L Fe_3O_4 nanoparticle additive oil. As a result of the test made with base oil, 15 gr/L and 20 gr/L nanoparticle additive oils in the internal combustion engine; base oil has the lowest fuel consumption, 15gr/L and 20 gr/L nanoparticle additive oils, respectively, increased fuel consumption by 3.78% and 4.38%.

KEYWORDS:Nanoparticle, internal combustion engine, oil additive, friction, ball on disc, iron oxide

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Taraması	2
1.2 Çalışmanın Amacı	19
2. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA SÜRTÜNME VE SÜRTÜNME KAYIPLARI.....	20
2.1 Sürtünme	20
Sürtünme Çeşitleri	21
Kayma Sürtünmesi.....	21
Yuvarlanma Sürtünmesi	22
2.2 Stribeck Eğrisi Ve Yağlama Rejimleri	22
2.3 Yağlama Rejimleri	26
2.3.1 Sınır Yağlama	26
2.3.2 Karışık Yağlama	26
2.3.3 Elastrohidrodinamik Yağlama	27
2.3.4 Hidrodinamik Yağlama.....	27
2.4 İçten Yanmalı Motorlarda Sürtünmeye Etki Eden Faktörler	28
2.4.1 Krank Mili Ve Krank Mili Yatakları Arasındaki Etkileşim	29
2.4.2 Piston Pimi İle Piston Arasındaki Etkileşim.....	31
2.4.3 Piston Eteği İle Silindir Yüzeyi Arasındaki Etkileşim	32
2.4.4 Segmanlar - Silindir Bloğu Etkileşimi.....	33
2.4.5 Kam Mili, Kam ve Supaplar Arasındaki Etkileşim	34
2.5 Yağlama Sistemleri	35
2.5.1 Yağlama Sisteminin Görevleri.....	35
2.5.2 Yağlama Sistemi Çeşitleri	36
2.6 Motor Yağı Katkıları Ve Görevleri	38
Çalışma Fonksiyonuna Etki Eden Katkı Maddeleri	38
Çalışma Alanına Etki Eden Katkı Maddeleri,	39
Çalışma Mekanizmasına Etki Eden Katkı Maddeleri.....	39
Tribo Geliştirici Katkıları	40
2.6.1 Sürtünme Azaltıcılar (FM).....	41
2.6.2 Aşınma Azaltıcılar (AW).....	44
2.6.3 Aşırı Basınç Katkıları (EP).....	45
Reolojik Özellik Geliştirici Katkı Maddeleri	45
2.6.4 Akma Noktası Düşürücüler (PPD)	46
2.6.5 Viskozite İndeks Geliştiriciler	47
Bakım ve Onarıcı Katkı Maddeleri.....	48
2.6.6 Antioksidanlar (AO)	48
2.6.7 Deterjanlar	49

2.6.8	Dispersanlar (Dağıtıcılar)	49
2.6.9	Pas Ve Korozyon Önleyiciler	50
2.6.10	Köpük Önleyiciler.....	51
2.6.11	Demülsiyonlaştırıcılar (Emülsiyon Kırma Ajanları)	52
	Çok Fonksiyonlu Katkı Maddeleri	53
	Yardımcı Katkı Maddeleri	53
2.6.12	İletkenlik İyileştirici Katkılar.....	54
2.6.13	Antibiyotikler.....	54
2.6.14	Renklendiriciler	54
3.	TEST METODLARI.....	55
3.1	Sürtünme Katsayısı Ölçüm Yöntemleri.....	55
3.1.1	Disk Üstünde Pim (Pin On Disc).....	55
3.1.2	Disk Üstünde Bilye (Ball On Disc)	56
3.1.3	Plaka Üzerinde Pim (Pin On Plate).....	56
3.1.4	Plaka Üzerinde Bilye (Ball On Plate)	57
3.1.5	Üç Plaka Üstünde Bilye (Ball On Three Plates).....	57
3.1.6	Dört Bilye (Four Ball).....	58
3.1.7	Halka Üstünde Blok (Block On Ring).....	59
3.2	İçten Yanmalı Motorlarda Sürtünme Ölçüm Yöntemleri.....	59
3.2.1	İçten Yanmalı Motorlarda Performans Ölçümleri	59
3.2.2	Motoring Sürtünme Ölçüm Testi	61
3.2.3	Willians Çizgi Yöntemi	62
3.2.4	Morse Yöntemi	63
4.	MATERYAL VE METOD	64
4.1	Motor Yağı	64
4.2	Nanopartikül	64
4.3	Nanopartikül Katkılı Yağın Hazırlanması.....	65
4.4	Disk Üstünde Bilye Test Düzenegi	68
4.5	İçten Yanmalı Motor Test Düzenegi	71
4.6	Test Süreci	74
5.	ELDE EDİLEN BULGULAR	76
5.1	Disk Üstünde Bilye Verileri	76
5.2	İçten Yanmalı Motor Testi Verileri.....	90
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER	93
7.	KAYNAKLAR.....	96
8.	ÖZGEÇMİŞ	102

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: İtme veya çekme kuvvetine maruz kalan cisim üzerinde sürtünme kuvvetinin gösterimi	20
Şekil 2.2: Sürtünme çeşitleri	22
Şekil 2.3: Stribeck eğrisi genel kullanımı	24
Şekil 2.4: Stribeck Eğrisi ve yağlama rejimleri	27
Şekil 2.5: İçten yanmalı motorlar için Stribeck Eğrisi	28
Şekil 2.6: Araçlarda yakıttan elde edilen enerjinin kaybedildiği alanlar	29
Şekil 2.7: Motordaki enerjinin dağılımı	29
Şekil 2.8: Motor sürtünme kayıpları	31
Şekil 2.9: Piston sürtünmesi dağılımı.....	33
Şekil 2.10: Segmanların sürtünmeye etkisi	34
Şekil 2.11: İçten yanmalı bir motorda kullanılan tam basınçlı yağlama sistemi.....	37
Şekil 2.12: Katkı maddelerinin farklı sınıflandırma ilişkileri	40
Şekil 2.13: Tribo-geliştiricilerin üst üste binme etkileri	41
Şekil 2.14: Adsorpsiyon tipi Tribo Geliştiricilerin çalışma mekanizması	43
Şekil 2.15: Tribo-Kimyasal Tipi Tribo Geliştiricilerin çalışma mekanizması..	44
Şekil 2.16: Çok Fonksiyonlu Tribo Geliştirici Modeli	45
Şekil 2.17: Akma noktası düşürücünün etki mekanizması	47
Şekil 2.18: Viskozite İndeks Geliştirici etki mekanizması	48
Şekil 2.19: Deterjanların etki mekanizması	49
Şekil 2.20: Dispersanların çalışma mekanizması	50
Şekil 2.21: Metal korozyonu ve Korozyon Önleyici çalışma mekanizması	51
Şekil 2.22: Köpük Önleyicilerin çalışma mekanizması	52
Şekil 2.23: Demülsiyonlaştırıcıların çalışma mekanizması	53
Şekil 3.1: Farklı tipteki tribometrelerin şematik gösterimi: a) Disk üstünde bilye, b) disk üstünde pim, c) Plaka üzerinde bilye, d) Halka üzerinde blok, e) Üç plaka üzerinde bilye, F) Dört bilye	58
Şekil 3.2: Motoring örnek grafiği	62
Şekil 3.3: Willans Çizgi örneği – dizel motor.....	63
Şekil 4.1: Fe ₃ O ₄ Nanopartiküllerinin yüzey modifikasyonu sonrası görüntüsü	65
Şekil 4.2: Ölçümlerde kullanılan 0.1 mg hassasiyetli hassas terazi	66
Şekil 4.3: Soğutucu ünite	66
Şekil 4.4: İnfrared sıcaklık ölçüm cihazı.....	67
Şekil 4.5: Ultrasonik karıştırıcı	67
Şekil 4.6: Ultrasonik karıştırıcı ve soğutucu ünite	68
Şekil 4.7: Disk üstünde bilye testinde kullanılacak olan diskin imalat resmi...	68
Şekil 4.8: Disk üstünde bilye test cihazı veri kayıt programı ESİT	69
Şekil 4.9: Disk üstünde bilye test cihazı	70
Şekil 4.10: Manuel devir ölçüm takometresi	70
Şekil 4.11: Genpower GBG 1200A Jeneratör.....	72
Şekil 4.12: Chroma marka elektronik yük cihazı.....	72
Şekil 4.13: Motor testinde anlık yakıt ölçümünde kullanılan terazi	73
Şekil 4.14: Motor test işlemi sırasında motor devrinin ölçülmesi	73

Şekil 5.1: 60N Normal kuvvet ve 10 d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği	76
Şekil 5.2: 60N Normal kuvvet ve 42d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği	77
Şekil 5.3: 60N Normal kuvvet ve 75 d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği	78
Şekil 5.4: 60N Normal kuvvet ve 110 d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın Sürtünme katsayısı grafiği.....	79
Şekil 5.5: 40N Normal kuvvet ve 95 d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği	80
Şekil 5.6: 40N Normal kuvvet ve 117 d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği	81
Şekil 5.7: 40N Normal kuvvet ve 140 d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği	82
Şekil 5.8: 40N Normal kuvvet ve 167 d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği	83
Şekil 5.9: 20N Normal kuvvet ve 97.5d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği	84
Şekil 5.10: 20N Normal kuvvet ve 112d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği	85
Şekil 5.11: 20N Normal kuvvet ve 125d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği	86
Şekil 5.12: 20N Normal kuvvet ve 140d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği	87
Şekil 5.13: 20N Normal kuvvet ve 150 d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği	88
Şekil 5.14: Disk üstünde bilye testleri sonunda elde edilen Stribeck Eğrisi.....	89
Şekil 5.15: İçten yanmalı motor testi sonucunda oluşan sıcaklık grafiği.....	91
Şekil 5.16: İçten yanmalı motor testi sonucunda oluşan devir grafiği.....	92

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Nanopartiküllerin yağ katkısı olarak sürtünme katsayısındaki değişime etkisi.....	16
Tablo 1.2: Nanopartiküllerin yağ katkısı olarak sürtünme katsayısındaki değişime etkisi - 2	17
Tablo 1.3: Nanopartiküllerin yağ katkısı olarak sürtünme katsayısındaki değişime etkisi - 3	18
Tablo 4.1: Petrol Ofisi Maximus LA 10W-40 yağının özellikleri.....	64
Tablo 4.2: Fe ₃ O ₄ Nanopartiküllerinin teknik özellikleri.....	65
Tablo 4.3: Fe ₃ O ₄ Nanopartiküllerinin element analizi.....	65
Tablo 4.4: 100Cr6 Çeliğinin element analizi	69
Tablo 4.5: AISI 420-B Çelik bilye element analizi.....	69
Tablo 4.6: Genpower GBG 1200A Jeneratör teknik özellikleri	71
Tablo 4.7: Disk üstünde bilye testi için Stribeck Eğrisine göre disk dönüş hızları	74
Tablo 5.1: Disk üstünde bilye testi sonunda elde edilen sürtünme katsayıları	89
Tablo 5.2: İçten yanmalı motor testi sonucunda elde edilen veriler	90

SEMBOL LİSTESİ

f_k	:	Kinetik Sürtünme Kuvveti
μ_k	:	Kinetik Sürtünme Katsayısı
f_n	:	Normal Kuvvet
η	:	Yağlayıcı Viskozitesi
ω	:	Dönme Hızı
p	:	Basınç
Z	:	Yağlayıcı Viskozitesi
N	:	Dönme Hızı
S	:	Sommerfeld Sayısı
R	:	Delik Yarıçapı
L	:	Uzunluk
D	:	Çap
C	:	Radyal Boşluk
h	:	Ortalama Film Kalınlığı
λ	:	Spesifik Film Kalınlığı
σ^*	:	Yüzey Pürüzlülüğü
V	:	Çizgisel Hız
NP	:	Nanopartikül

ÖNSÖZ

Öncelikle tez çalışması boyunca benden desteğini esirgemeyen ve her zaman beni olumlu motive eden değerli danışmanım Doç. Dr. Erkan ÖZTÜRK'e müteşekkirim.

Testlerin hazırlık sürecinde disk üstünde bilye test cihazı için disklerin hazırlanmasında destek olan Ergan Makine sahibi Mehmet Kadri ERVAN'a, disklerin sertleştirilmesinde destek olan İSTAŞ firmasından Vahap DOĞAN'a, test süresince kimyasalların hazırlanması konusunda çok destek olan Prof. Dr. Cem GÖK'e, ultrasonik karıştırma işleminde destek veren Araştırma Görevlisi İnan AĞIR'a Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği bölümünde disk üstünde bilye test cihazı için destek olan tüm bölüm personeline, Can Kardeşler Otomotiv Sahibi Saffet YILMAZ'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans döneminde kıymetli zamanlarından çaldığım değerli eşim Zeynep ALTUNAY ALVER'e, kızlarım Serra Nil ve Ayza'ya teşekkür ederim.

Mustafa ALVER

Denizli, 2020

1. GİRİŞ

Dünyanın geleceğinde sorun teşkil edecek önemli konulardan biri mevcut enerji kaynaklarının sınırlı olmasıdır. Enerji kaynaklarının sınırlı olması nedeniyle bilim insanları enerji üzerine olan çalışmalarını iki alana ayırarak sürdürmektedir. Bu çalışma alanları;

- Mevcut enerji kaynaklarının verimli kullanılması,
- Yeni enerji çeşitlerinin tespit edilmesi ve kullanıma sunulmasıdır.

Mevcut enerji kaynaklarının verimli kullanılması konusunda özellikle fosil yakıt rezervlerinin azalması nedeniyle, fosil yakıt kullanan makine ve araçların verimliliği daha büyük önem kazanmıştır. Fosil yakıtların en yoğun kullanıldığı alanlardan bir tanesi de içten yanmalı motorlardır. İçten yanmalı motorlarda enerji verimliliği sadece çevrenin korunması anlamında değil aynı zamanda değişen tüketici ihtiyaçlarının karşılanması anlamında da büyük önem taşımaktadır. Tüketiciler araçlarında yüksek performans ve yakıt ekonomisi ile düşük egzoz emisyon değerleri beklemektedirler.

İçten yanmalı motorlarda elde edilen enerjinin bir bölümü mekanik kayıplara gitmektedir. Mekanik kayıpları düşürmenin başlıca yolu içten yanmalı motorda oluşan sürtünme kaybının en aza indirilmesidir. Sürtünme kayıpları piston-segman-silindir, supap mekanizması, krank mili ve diğer sürtünen parçalarda meydana gelmektedir. İçten yanmalı motorlarda mekanik kayıpların en aza indirilmesi ile birlikte motordan elde edilen verim artacak ve böylelikle yakıt ekonomisi sağlanacak, aynı zamanda yakıttan elde edilen verimin artması sayesinde de egzoz emisyon değerlerinde iyileşme sağlanacaktır.

İçten yanmalı motorlarda yanma sonucunda oluşan normal kuvvetlerin etkisiyle sürtünme kuvvetleri meydana gelmekte ve bu kuvvetler sürtünme kayıplarına neden olmaktadır. İçten yanmalı motorlarda sürtünmeyi azaltmak için aşağıdaki uygulamalar yapılmaktadır;

- Sürtünen yüzeylerin, yüzey pürüzlülüklerinin azaltılması için yüzey işleme kalitesinin artırılması,
- Sürtünen yüzeylerde yüzey dayanımı arttırmak için kaplama yapılması,
- Yağlama yağına sürtünmeyi azaltıcı katkı maddeleri ilavesi,
- Eksen kaçırma işlemi,
- Farklı mekanizma kullanımı.

Bahsi geçen bu uygulamalar arasında yağa katkı maddesi ilavesi kolay bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Yağa katkı ilavesi için iki farklı uygulamalar söz konusudur. Bu uygulamalardan bir tanesi katkı maddesinin yağ motor üzerinde ilavesidir. Bu yöntemde homojen bir karışım elde edilemediğinden veya katkının bir kısmı karterin alt bölümünde kaldığından dolayı istenen etkiyi yapamamaktadır. Diğeri ise bu tezin konusu içerisinde yer alan, yağın üretim sürecinde katkı maddesi ile ultrasonik veya yüksek hızlı mekanik karıştırıcılar kullanarak homojen karışımın elde edilmesidir.

1.1 Literatür Taraması

Laad ve Jatti, yaptıkları çalışmada 10W-30 motor yağı ile TiO_2 nanopartikül katkı maddelerini karıştırmıştır. Mekanik karıştırıcı ile nanopartikül ve yağın homojen karışımı sağlanmıştır. Karışım oranları ağırlıkça %3, %4, %5 olarak kullanılmış ve disk üstünde pim cihazında test işlemi için 4, 5 ve 6 kg yükleri tercih edilmiştir. Yapılan test sonucunda en iyi sonuç olarak ağırlıkça %3 karışım ve 4 kg yük altında baz yağ sürtünme katsayısına göre %86.48 oranında iyileşme sağlanmıştır (Laad ve Jatti, 2018).

TiO_2 nanopartikülleri üzerine çalışma yapan Ilie ve Covaliu, TiO_2 nanopartiküllerini iki farklı şekilde baz yağa eklemiştir. Bunlardan ilkinde TiO_2 nanopartikülleri doğrudan yağın içine ekleyip ultrason ışınlamasına maruz bırakılarak karışımın homojen olmasını sağlamıştır. İkinci yöntemde ise TiO_2 nanopartiküllerini oleik asit ile yüzeylerini modifiye ederek baz yağ içerisine eklenmiş ve karıştırma işlemi aynı şekilde ultrasonik ışınlama ile yapılmıştır. Sürtünme ve aşınma testleri için disk üstünde bilye ve 4 top yöntemi seçilmiştir. Karışım oranları olarak ağırlıkça %0.1,

%0.2, %0.3, %0.4, %0.5 olarak belirlenmiş ve 100N ile 1000N arasında değişen kuvvetler uygulanmıştır. Baz yağ, modifiye edilmiş TiO_2 , katkılı yağ ve modifiye edilmemiş TiO_2 katkılı yağ için, disk üstünde bilye ve dört top testinde en yüksek sürtünme katsayısı değerleri 100 N dan başlayan kuvvetlerde artmaya başlarken 300 N kuvvetinde en üst seviyeye çıkmıştır. 300 N dan sonra 1000 N kuvvete kadar sürtünme katsayısı değerinin düştüğü görülmüştür. En ideal sürtünme katsayısı değerlerine ağırlıkça %0.5 oranında TiO_2 ilavesi ile ulaşıldığı görülmüş, aynı zamanda yüzeyi modifiye edilmiş TiO_2 katkılı yağın, oleik asit ile yüzey modifikasyonu yapılmamış TiO_2 katkılı yağa göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür (Ilie ve Covaliu, 2016).

Yu ve diğerleri, tarafından Cu nanopartikülleri üzerine yapılan bir çalışmada, Cu nanopartiküllerinin yüzeyini metilbenzen ve amin bileşiği ile birlikte 24 saat karıştırarak modifiye edilmiştir. Yüzeyi modifiye edilmiş Cu nanopartikülleri ile baz yağı ultrasonik karıştırıcı ile karıştırmışlar ve daha sonra dört top (four-ball) test cihazı ile aşınma ve sürtünme testleri yapılmıştır. Cu nanopartikülleri %0.2 oranında baz yağa ilave edilmiştir. Dört top test cihazında oda sıcaklığı olan 25°C ile 50°C, 80°C, 110°C ve 140°C sıcaklıklarda 1200 d/d için 294 N yük ve 15 dakika test yapılmıştır. Sürtünme katsayısı sıcaklığa bağlı olarak sırasıyla %5, %8, %10, %15 ve %20 oranında azalmıştır. Yüksek yerel sıcaklık ve basınç nedeniyle Cu nanopartiküllerinin eridiği, aşınmış yüzey üzerinde düşük nano sertliğe ve elastik modüle sahip bir bakır koruyucu film oluşturduğu, oluşan bu koruyucu filmin iki sürtünme yüzeyini ayırdığı ve doğrudan temas etmelerini önlediği görülmüştür. Bu sayede oluşan filmin düşük sertliği sürtünmenin azalmasını sağladığı, düşük elastik modül temas yüzeyinin elastik deformasyonunu artırırken aşınmayı azalttığı açıklanmıştır (Yu ve diğ. 2008).

Cu nanopartikülleri üzerine diğer bir araştırma Zhang ve diğerleri tarafından yapılmış, Cu nanopartikülleri arasındaki yüzey modifikasyonlarının yağda çözünmeyi kolaylaştıracağından çökelmeyi önleyeceğini ifade etmişlerdir. Ağırlıkça %0.5 oranında Cu nanopartikülleri ile SJ 15W40 motor yağını karıştırmışlardır. Test işlemi disk üstünde bilye aşınma test cihazı ile yapılmış, 300 N yük altında sürtünme katsayısı %46 azalmıştır. 400 N yükten daha büyük yüklerin uygulanması halinde sürtünme katsayısının arttığı görülmektedir. Yine aynı test işlemleri sırasında test süresi başlangıç anından itibaren 1.5 saatlik süreye ulaştığında ısınma etkisi ile en düşük

sürtünme katsayısı elde edilmişken, 1.5 saat üzerine çıkan çalışmalarda sürtünme katsayısının arttığı gözlemlenmiştir (M. Zhang ve diğ. 2009).

Durak tarafından yapılan çalışmada, Stribeck eğrisinin sınır sürtünme bölgesinde sürtünme katsayısını düşürmek için yapılan testte kullanılmak üzere SAE20W50 motor yağının içerisinde hacimce %2 oranında ilave edilen borik asit ile karışım yağı hazırlanmıştır. Borik asit katkılı yağ 260N, 360N ve 460N sabit yük altında 50, 100, 300, 600, 1200 d/d mil hızlarında test edilmiştir. Test düzeneği olarak radyal kaymalı yatakta meydana gelen sürtünme kuvvetini ölçecek bir mekanizma kullanılmıştır. Testlere başlamadan önce yük yastığı ile yatak arasına yağ gönderilerek, mil ile yatak yüzeyi arasında yağ filmi oluşması sağlanmış ve böylelikle tahrik başındaki ve sonundaki büyük aşınmalar önlenmiştir. Farklı yük ve hızlarda gerçekleştirilen testler sonucunda hacimce %2 oranında borik asit ilavesinin tüm test değerlerinde sürtünme katsayıları baz yağa göre daha küçük veya baz yağın sürtünme katsayısı ile benzer çıktığı görülmüştür. Dönüş hızının artması ile birlikte sürtünme katsayısı değerinin de arttığı görülmüştür. Test parametrelerinin karışık ve hidrodinamik sürtünme rejimine göre olduğu belirtilmiştir (Durak, 2003).

Kaleli ve Durak (Kaleli ve Durak, 2003), çalışmalarında yağların kullanım alanlarının %40'ını oluşturan motor yağlarına bor katkısı ilave etmişlerdir. Baz yağa %1, %3, %5 ve %10 oranlarında bor katkısı ilave edip, 153N, 253N, 353N yüklerinde 30 ila 1200 devir/dakika aralıklarında radyal kaymalı yatak test düzeneğinde test işlemini gerçekleştirmişlerdir. Test sonucunda dönme hızı artarken sürtünme katsayısının büyük değişim göstererek arttığını ve yük arttıkça sürtünme katsayısının küçük değerlerde azaldığını doğrulamıştır. %1 ve %3 konsantrasyona sahip bor yağı katkı maddesi eklenmesi tüm kuvvetler altında baz yağa göre daha düşük bir sürtünme eğilimi göstermiştir. Baz yağa %5 bor katkı ilavesi ile sürtünme katsayısı artarken %10 bor katkısında sürtünme katsayısı baz yağ ile aynı değerlere ulaşmıştır. Bor katkısının %1 ve %3 bor katkılı yağ ile sürtünme katsayısının düşmesine ve basınç dağılım değerlerinde baz yağdakine benzer bir eğilim göstermesine rağmen basınç dağılım değerleri baz yağdaki basınç dağılım değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür.

Demirtaş ve diğerleri, grafen nanopartikül katkılı yağların sürtünme ve aşınma etkilerinin içten yanmalı motorda silindir segman ikilisindeki etkileşimini incelemişlerdir. Çalışmalarında 5W40 yağ ile termal olarak eksfoliyeli edilmiş grafen

oksit (TEGO) Sınıf-1 nanopartikülleri karıştırılmıştır. Karışım oranında ağırlıkça %0.5 oranında grafen oksit kullanılmıştır. Karıştırma işleminin homojen olması için ultrasonik karıştırıcı kullanılmış ve karışım yapıldıktan sonra 3 gün boyunca çevre koşullarında bırakılmıştır. Grafen oksit ilavesi yapılan yağ üç günlük süre sonunda SEM ve Raman spektroskopisi ile incelenerek homojen karışım elde edildiği görülmüştür. Tribolojik testler pistonlu bir test mekanizmasında birinci segman malzemesi olan krom kaplı dökme demir ile tek silindirli Honda GX 270 test motoru silindir malzemesi olan gri dökme demir malzemeleri arasında grafen oksit katkı yağlayıcı kullanılarak yapılmıştır. Pistonlu test düzeneğinde normal yük 60N, kayma hızı ise 0.055 m/s, test sıcaklığı 100°C ve test süresi 22 dakika olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Tribometre ile yapılan testlerde baz yağın sürtünme katsayısı 0.15 iken grafen oksit katkı yağ için 0.125 olarak ölçülmüştür. Tribometre ile yapılan testler sonucunda grafen oksit katkı yağ ile baz yağ içten yanmalı motor üzerinde 75 saat test edilmiştir. Testin sonucunda, sınır yağlama koşullarında yağa eklenen çok katmanlı grafenin sürtünme yüzeylerinin sürtünme davranışını iyileştirebileceği gösterilmiştir, grafen nano katkı maddesinin sürtünme katsayısının düşürülmesinde ve sürtünme yüzeylerinde koruyucu bir tabaka oluşturarak yüzey korumasının ve yağlanmanın arttırılmasında aktif bir rol oynadığı bulunmuştur (Demirtaş ve diğ. 2019).

Zhou ve diğerleri, Fe₃O₄ nanopartikülleri ile yapmış oldukları çalışmada baz yağ içerisine Fe₃O₄ manyetik nanopartikül (MNP) ilave etmişlerdir. Fe₃O₄ MNP baz yağ ile karıştırılmadan önce, homojen karışım elde etmek için oleik asit ile yüzey modifikasyonu işlemi yapılmıştır. Yüzey modifiyesi oleik asit ile yapılmış olan Fe₃O₄ MNP ile baz yağın karıştırılması işlemi için yarım saat ultrasonik karıştırıcıda karıştırma işlemi yapılmıştır. Fe₃O₄ nanopartikülleri sırasıyla 0.5 gr/L, 1 gr/L ve 2 gr/L oranlarında hazırlanmıştır. 440C paslanmaz çelik bilyeler ile %0.45 karbonlu çelik numuneler pistonlu tribometrede test edilmiştir. Her test 1 mm'lik genlik için 1 saat boyunca, 10-50N normal yük koşulları altında 5 Hz sabit frekansta yapılmıştır. En düşük sürtünme katsayısı 10N yük altında 2 gr/L karışım oranına sahip yağlayıcı ile görülürken 50 N yük altında 0.5 gr/L oranındaki karışımın baz yağ ile aynı sürtünme katsayısı değerini verdiği, 2 gr/L konsantrasyonundaki yağlayıcının tüm yük koşullarında en iyi düşük sürtünme katsayısını verdiği görülmüştür (Zhou ve diğ. 2013).

Fe_3O_4 üzerine bir çalışma yapan Gao ve diğerleri, Fe_3O_4 nanopartiküllerini hegzagonal, oktahedral ve düzensiz morfolojilere sahip oleik asit ile modifiye ederek üç ayrı formda baz yağa ilave etmişlerdir. Öncelikle ağırlık olarak %20 oleik asit ile Fe_3O_4 nanopartikülleri yüksek devirli karıştırıcıda 1000 d/d hız ile 40 dakika karıştırılmış ve ardından kurutularak modifiye edilmiştir. Baz yağın 200 g'ı oransal olarak %0.5, %1, %1.5 ve %2 değerlerine tekabül eden sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 gram ağırlıklarda modifiye edilmiş Fe_3O_4 nanopartikülleri ilave edilmiştir. Tribolojik testler dört top tribometresinde her bir karışım 400 N yük altında, 1450 d/d hızlarda 30 dakika boyunca test edilmiştir. Fe_3O_4 nanopartikülleri manyetik özellikleri ile birlikte sürtünme yüzeylerine tutunması sayesinde özellikle hegzagonal yapıda ve %1.5 konsantrasyonunda en iyi sürtünme değerlerini verdiği görülmüştür. Sürtünme katsayısındaki iyileşme hegzagonal Fe_3O_4 katkılı yağ için %58.16, Oktahedral Fe_3O_4 katkılı yağ için %47.96, düzensiz morfolojiye sahip Fe_3O_4 katkılı yağ için %34.69 olarak hesaplanmıştır. Oktahedral yapıdaki Fe_3O_4 katkılı yağ incelendiğinde bu nanopartiküllerin sürtünme yüzeyleri arasında bir top gibi etki yaptığını ancak bunun da aşınma izlerini arttırdığı, düzensiz morfolojiye sahip nanopartiküllerin sürtünme yüzeylerinde derin oyuk ve çiziklerin oluştuğu görülmüştür. Dört top tribometresinde yapılan testler sonucunda en iyi sürtünme katsayısı değişiminin %1.5 katkıda elde edildiği, daha düşük katkılarda Fe_3O_4 nanopartiküllerinin sadece yüzey boşluklarını doldurmaya yettiği, daha yüksek katkılarda ise sürtünme yüzeyinde birleşme oluşmasına neden olduğu ve sürtünme oluşma önleyici film tabakasının oluşmasına engel olduğu değerlendirilmiştir (Gao ve diğ. 2013).

Hu ve diğerleri tarafından Fe_3O_4 üzerine yapılan diğer bir çalışmada farklı karışım oranları ve farklı kuvvetlerle deneme yapmak yerine, yağlama yapılan yüzeyi değiştirerek Fe_3O_4 nanopartikül katkılı yağların değişik yüzeylerdeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada incelenen yüzeyler; düz yüzey, nitrokarbürülenmiş yüzey, sülfürülenmiş yüzey, FeS katı yağlama yüzey tabakasıdır. Yağlama yağı olarak sıvı parafin seçilmiş ve ağırlıkça %0.2 oranında Fe_3O_4 ilave edilmiştir. Sürtünme katsayısı testi disk üstünde bilye cihazı üzerinde 60 N kuvvet, 10 Hz frekans, 10 mm titreşim genişliği ve 30 dakika süre ile yapılmıştır. Düz yüzeyde yapılan testte sürtünme katsayısı başlangıçta 0.08 iken 3 dakikalık süre sonunda yağ filminin incelmesinden dolayı sürtünme katsayısı test sonunda 0.11 olarak görülür. Sülfürülenmiş yüzeyin ortalama sürtünme katsayısı sürtünme başlangıcında 0.06'dır. Testlerin 8. dakikası

sonunda sülfid tabakasının yırtıldığı ve sürtünme katsayısının 0.1'e yükseldiği görülmüştür. Testin 19. Dakikasında sürtünme katsayısı bir miktar düşerek, test sonunda 0.08'a ulaştığı görülmüştür. Nitrokarbürleşmiş yüzeyin sürtünme katsayısı test başlangıcında ve test sonucunda 0.08 olarak ölçülmüştür. FeS katı yağlama dubleks katmanında sürtünme katsayısı test başlangıcında 0.08 iken test sonunda 0.075'e düştüğü izlenmiştir. FeS katı yağlama dubleks katmanının hacim kaybının düz, sülfürlü ve nirtokarbürleşmiş yüzeylere göre sırasıyla %91, %89 ve %21 oranlarında azaldığı belirlenmiştir (Hu ve diğ. 2013).

Demirtaş ve diğ. 2018, 5W40 motor yağı içerisinde TiO_2 , SWCNTs (Single Wall Carbon Nano Tubes), BN (Bor Nitrür), MWCNTs (Multi Wall Carbon Nano Tubes), Grafen nanopartikülleri ekleyerek 5 farklı nanopartikül ile çalışma yapmışlardır. Karışım oranları; TiO_2 için %1 w/v, SWCNTs için 5mg/100 mL, Bor nitrür için 50 mg/mL, ve grafen için 25 mg/50 mL olarak ele alınmıştır. Testler pistonlu tribometre ile 60.5 N kuvvet, 0.055 m/s kayma hızında 100°C sıcaklıkta 20 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. 5W40 motor yağına eklenen TiO_2 ve SWCNTs nanopartikülleri en düşük sürtünme katsayısının elde edilmesini sağlamıştır. Test sonuçlarına göre segman-silindir çiftinin sürtünme katsayısı 5W40 tam sentetik motor yağına grafen nanopartikülü ilave edildiğinde 0.1255 olan baz yağa göre sürtünme katsayısı 0.1241'e düşmüştür. MWCNTs ilave edilmiş yağın sürtünme katsayısı 0.1167, bor nitrür ilave edilmiş yağ için 0.1076, SWCNTs için 0.1043 ve TiO_2 için 0.1028 olarak belirlenmiştir. Motor yağlarına nanopartiküllerin ilave edilmesiyle daha düşük bir sürtünme katsayısı ile sınır ve karma yağlama rejimlerinde daha iyi tribolojik özellikler görülmüştür. Sonuç olarak; tüm katkı maddelerinin sürtünme katsayısını azaltmasına rağmen, azalma miktarının nano katkı maddelerinin içeriği, nano katkı maddelerinin homojenliği, nano katkı maddelerinin parçacık büyüklüğü gibi etkenlere bağlı olduğu belirtilmiştir. Motor yağındaki katkı maddelerinin konsantrasyonunun sürtünmeye doğrudan etki yaptığı ve optimum konsantrasyon üzerinde katkı maddesi ilavesinin sürtünmeyi arttıracak ifade edilmiştir. Tribometre testlerinden sonra yapılan EDS analizi ile nano katkı maddelerinin ve yağlama motor yağının içeriğinin iyice karıştığı ve sürtünme yüzeyinde aşınma izinde koruyucu bir katman bölgesi oluşturduğu görülmüştür (Demirtaş ve diğ. 2018).

Thottackkad ve diğerleri, Seryum oksit (CeO_2) nanopartiküllerini Hindistan cevizi yağı, parafin yağı ve ticari motor yağı olan SAE 15W40 yağlarında 1000 mL yağ için farklı konsantrasyonlarda denemişlerdir. İyi bir karışım elde edebilmek için yüzey modifikasyonu yapılarak 30°C 'de ultrasonik karıştırıcı ile iki saat karıştırılmıştır. Disk üstünde pim tribometresi ile yapılan testlerde kayma hızı olarak 0.52 m/s seçilirken kayma mesafesi toplam 1000m olarak belirlenmiştir. Tribolojik testin başlangıcında sürtünme katsayısının 0.10 olduğu, testin ilk 250 metrelik bölümü sonunda sürtünme katsayısının katkılı motor yağı, katkılı Hindistan cevizi yağı ve katkılı parafin yağı için 0.060-0.075 arasındaki değerlere düştüğü ve test sonuna kadar sabit değerlerde seyrettiği gözlemlenmiştir. Hindistan cevizi, parafin ve motor yağlarında modifiye edilmiş CeO_2 nanopartiküllerinin eklenmesi ile sürtünme katsayısındaki azalma yüzdeleri sırasıyla %22, %16 ve %12 olarak belirlenmiştir. Yağlayıcıda nanopartikül konsantrasyonu arttıkça, sürtünme katsayısının baz yağa göre azalmaya başladığı ve belirli bir oranda en düşük sürtünme katsayısını verdiği optimum konsantrasyona ulaştığı bu konsantrasyondan sonra yapılacak artışların sürtünme katsayısının yükselmesine sebep olduğu bilinmektedir. Teste tabi tutulacak hindistan cevizi yağının ideal karışım oranı ağırlıkça %0.51 iken parafin için %0.46, motor yağının ise %0.63'tür. Bu oranların üzerinde konsantrasyonlarda katkı ilavesi sürtünme katsayısının artmasına neden olmaktadır. Belirli bir normal yük ve hızda sürtünme katsayısı minimum olduğunda karışımda kullanılan oranın optimum oran olduğu görülecektir. Çalışmada kullanılan üç yağdan birisi olan Hindistan cevizi yağının modifiye CeO_2 nanopartikülleriyle karışımı en ideal sonuçları vermiştir. Sürtünme katsayısında %22'lik bir azalma ve spesifik aşınma oranında yalnızca Hindistan cevizi yağı ile karşılaştırıldığında %17 azalma görülmüştür. Nanopartikül katkılı yağın içindeki nanopartiküllerin çökme eğilimi, yüzey aktif madde modifikasyonu ile azaltılabileceği belirtilmiştir (Thottackkad ve diğ. 2014).

Song ve diğerleri, ZnAl_2O_4 (Çinko alüminat) nanopartiküllerini öncelikle oleik asit ile modifiye edilerek yağlama yağına karıştırılmıştır. ZnAl_2O_4 nanopartikülleri ile birlikte Al_2O_3 ve ZnO nanopartikülleri de tribolojik testlere tabi tutulmuştur. Tribolojik testler; dört top test düzeneğinde; 1450 d/d, 75°C 'de 147N yükte 1800 saniye, itme halkası (thrust ring) test düzeneğinde; 1200 devir/dakikada, 75°C 'de, 200N kuvvet ile 1800 saniye de ZnAl_2O_4 nanopartikülleri ağırlıkça %0.05, %0.1, %0.5 ve %1 oranlarında test edilmiş ve bu test işlemi sonunda sürtünme katsayısındaki en

büyük değişim %0.1 oranındaki $ZnAl_2O_4$ nanopartikülleri katkılı yağ ile elde edilmiştir. En iyi karışım oranı %0.1 tespit edilmesinin ardından %0.1 karışım oranlarında Al_2O_3 ve ZnO nanopartikül katkılı yağ karışımları dört top test düzeneğinde test edilmiştir. Yapılan testler sonucunda $ZnAl_2O_4$ nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısında %33.37 oranında iyileşme elde edilmiştir. Al_2O_3 ve ZnO nanopartikülleri katkılı yağların sürtünme katsayılarındaki iyileşme ise %30'un altında kalmıştır (Song ve diğ. 2012).

Padgurskas ve diğerleri, SAE 10 mineral yağı ile Fe, Cu, Co nanopartiküllerini öncelikle teker teker ve daha sonra nanopartiküller ikiyeşerli gruplar halinde (Fe+Cu, Fe+Co, Co+Cu) eşit miktarlarda yağ ile karıştırılarak %0.5 oranında karışımlar hazırlamışlardır. Yağ ile karışım öncesinde nanopartikül yüzeyleri 0.5 gram cetyltrimethylanonium bromide (CTAB) ile modifiye edilmiştir. Test işlemi dört top test mekanizmasında 1400 d/d hızda, 150N kuvvet ile 60 dakikalık sürede yapılmıştır. Testler sonucunda; Fe nanopartikül katkılı yağın %39, Cu nanopartikül katkılı yağın %49, Co nanopartikül katkılı yağın %20 ve Fe+Cu, Fe+Co ile Co+Cu ikiyeşerli katkı gruplarının sırasıyla %53, %36, %53, demir nanopartikülleri ile kaplanmış Cu nanopartikülleri FeCu %55, Fe nanopartikülleri kaplanmış Co nanopartikülleri FeCo %50 oranlarında sürtünme katsayısını azalttığı gözlemlenmiştir. Özellikle Co nanopartikülleri sürtünme katsayısı değişimine büyük oranda etki etmezken Cu nanopartikülleri gerek tek başına kullanılması halinde gerekse hibrit ve karışık kullanılması durumunda sürtünme katsayısının düşüşüne olumlu yönde etki etmektedir. Test sonuçlarında nanopartikül modifiyesinde kullanılan CTAB ile baz yağ karıştırılarak dört top test cihazında aynı test değerlerine tabi tutulmuş ve elde edilen değerlerin baz yağ ile aynı değerler olması nedeniyle sürtünme katsayısının düşmesine nanopartiküllerin özelliklerinin neden olduğu, CTAB'ın herhangi bir şekilde nanopartiküllerin özelliklerini maskeleyici bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır (Padgurskas ve diğ. 2013).

Wu ve diğerleri, CuO , TiO_2 ve nano elmaslardan oluşan 3 farklı nanopartikülü 2 farklı motor yağında karıştırmışlardır. Karışım için API SF motor yağı SAE30 LB51153 ve SAE30 LB51153-11'dir. Nanopartiküller ile yağların karışım oranları; ağırlıkça %10 nanopartikül çözeltisi ile %90 yağ karışımı şeklinde olup, %10 nanopartikül çözeltisinin içerisinde %9.9 glikol ve %0.1 nanopartikül mevcuttur.

Nanopartikül katkılı motor yağlarında pistonlu hareketli sürtünme tribometresinde sürtünme ve aşınma önleme performansları için iki farklı test parametresi belirlenmiştir. Nanopartiküllerin sürtünme azaltma ve aşınma önleme performansları üzerindeki etkilerini incelemek için farklı kayma hızları ve yükleri için iki deneysel koşul kabul edilmiştir. Sürtünme azaltma testi için 0.1 mm krom kaplı pim, 200 N yük altında 120 mm/s hızda, aşınma önleme testi için 6mm çapında krom kaplı çelik bilye, API SF motor yağının aşırı ısınmadan dolayı numunenin zarar görmesini engellemek için 25N yük altında 30 mm/s hızda ve 120 dakika boyunca 1°C / dakika artışla 40 – 60°C arasında değişen bir sıcaklıkta test gerçekleştirilmiştir. API SF yağ ve katkıları için 120 mm/s hız ve 200N kuvvet altında yapılan testler için 50°C üzerindeki sıcaklıklarda CuO nanopartikül katkılı API SF yağın, katkısız API SF yağına göre sürtünme katsayısını %18.4 oranında düşürdüğü belirtilmiştir. Baz yağ ve katkıları ile yapılan aşınma testlerinde ise CuO ve nano elmas nanopartiküllerin kullanıldığı yağlar ile baz yağa göre aşınma iz genişliğinde sırasıyla %78.8 ve %62.1 oranlarında iyileşme sağlanmıştır. API SF yağ ile yapılan aşınma testlerinde ise CuO ve nano elmas nanopartiküllerin kullanıldığı yağlar ile katkısız API SF yağına göre sırasıyla %16.7 ve %43.3 oranında daha az aşınma iz genişliği elde edilmiştir. CuO nanopartikülleri sürtünme testlerinde API SF ve baz yağın sürtünme katsayılarında sırasıyla %18.4 ve %5.8, aşınma iz genişliklerinde ise %16.7 ve %78.8 oranında iyileşme sağladığı belirtilmiştir. Bu durumun küre benzeri nanopartiküllerin yuvarlanma etkisine neden olarak kaymadan sürtünme sürecine geçmiş olması sonucu olduğu ifade edilmiştir (Y. Y. Wu ve diğ. 2007).

Vadiraj ve diğerleri, Hindistan'da 11 ton ile 49 ton ağırlık aralığındaki araçlarda yoğun olarak kullanılan SAE 15W40 motor yağı ile SAE 90 şanzıman yağı içerisine Borik asit ile Cu nanopartikülleri ilave edilerek hacimsel olarak 1/10, 2/10 ve 3/10 oranlarında yağ katkılarının etkilerini incelemişlerdir. Tribolojik testler disk üstünde bilye test düzeneğinde kayar plaka üzerinde sabit tutulan bilye mekanizmasında; 50N yük, 90°C sıcaklık, 20Hz frekans, 2 mm strok uzunluğunda, 180m kayma mesafesinde yapılmıştır. Katkısız motor yağı ile Cu ve Borik asit katkılı nanopartikül karşılaştırıldığında 1/10 oranındaki Cu ve borik asit nanopartikül katkılı motor yağı ile katkısız motor yağı 90 dakikalık test sonunda hemen hemen aynı özellikleri göstermiştir. Cu ve Borik asit nanopartiküllerin 2/10 ve 3/10 oranlarında motor yağında kullanımı, katkısız motor yağına göre daha yüksek sürtünme

katsayısına neden olduğu görülmüştür. Sürtünme katsayılarındaki artış oranı 2/10 Cu nanopartikül katkılı motor yağı için %25 iken, 3/10 Cu nanopartikül katkılı motor yağı için %30 olarak ölçülmüştür. Bu oranlar 2/10 ve 3/10 borik asit katkılı motor yağına göre daha yüksek artış oranlarıdır. 2/10 ve 3/10 Borik asit katkılı motor yağının sürtünme katsayısındaki artış oranı Cu nanopartikül katkılı motor yağındaki sürtünme oranı artışından %10 ile %12 daha azdır. SAE 90 şanzıman yağı ile yapılan testlerde tüm karışım oranlarında Cu ve borik asit katkılı SAE 90 şanzıman yağının katkısız yağa göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. 2/10 Cu nanopartikül katkılı SAE90 şanzıman yağında, katkısız yağlara göre %33 oranında sürtünme katsayısında iyileşme elde edilmiştir (Vadiraj ve diğ. 2012).

Zhang ve diğerleri, Cu nanopartikülleri ile yapmış oldukları çalışmada CD15W40 dizel yağı içerisinde asılı bulunan SP (Serpantin tozları) ile etkileşimlerini incelemiştir. Araştırmada baz yağ ile karşılaştırma için, baz yağa ağırlıkça %5 oranında beş farklı karışım (%100 SP, %97.5 SP + %2.5 Cu, %95 SP + %5 Cu, %92.5 SP + %7.5 Cu, %90 SP + %10 Cu,) hazırlamışlardır. Karıştırma işlemi homojen bir karışım elde etmek için, önce 5000 d/d hızda mekanik karıştırıcıda daha sonra ultrasonik karıştırıcı ile 35°C sıcaklıkta her bir işlem için 30 dakikalık sürelerde gerçekleştirilmiştir. Tribolojik testler disk üstünde bilye test cihazında 50N yük, oda sıcaklığında, kayma frekansı 10-30 Hz, süre 30 dakika şeklinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler sonucunda sürtünme katsayısında en iyi düşme oranı %35 ile baz yağ + ağırlıkça %5 (%92.5 SP + %7.5 Cu) nanopartikül katkılı yağdan elde edilmiştir. Bu arada Baz yağ + %5 SP katkısında %20 civarında sürtünme katsayısında düşüş sağlanmıştır (B. S. Zhang ve diğ. 2011) .

Ingole ve diğerleri, TiO₂ ve TiO₂'in ticari karışımı olan TiO₂ P25 (P25) ile baz yağ olarak mineral yağ kullanmıştır. Çalışmada sadece TiO₂ ve P25 etkisi inceleneceğinden dolayı herhangi bir yüzey modifiyesi yapılmadan nanopartiküller doğrudan baz yağ içerisine ayrı ayrı ilave edilmiş ve 2 farklı tipte nanopartikül katkılı yağ 1300 d/d'da 15 dakika boyunca mekanik karıştırıcıda karıştırılarak ağırlıkça %0.25, %1 ve %2 oranlarında altı farklı karışım elde edilmiştir. Tribolojik testler pistonlu kayar pleyt üzerinde bilye ile 14.715N kuvvet, 0.05 m/s hız, 5 mm kayma genliği, ortam sıcaklığında 30 dakikalık süreçlerde gerçekleştirilmiştir. Baz yağ ve %0.25 P25 katkılı yağ karşılaştırıldığında P25 katkılı yağın baz yağa göre daha yüksek

bir sürtünme katsayısı ortaya çıkmıştır. P25 katkı oranı %1'e çıkartıldığında yine baz yağa göre daha yüksek bir sürtünme katsayısı oluşmuştur. P25 katkısı %2 olduğunda ise baz yağa göre yüksek bir sürtünme katsayısı oluşmuş ancak önceki katkı oranları olan %0.25 ve %1'e göre zamana bağlı olarak daha kararlı bir sürtünme katsayı eğrisi gözlemlenmiştir. Baz yağ ile %0.25 TiO_2 katkılı yağ karşılaştırıldığında baz yağ sürtünme katsayısı 0.11 iken TiO_2 katkılı sürtünme katsayısı 0.10'a gerilemiştir. TiO_2 katkı oranı %1'e çıkartıldığında sürtünme katsayısı testte zaman zaman 0.9'a düşse de test sonunda 0.11 olarak ölçülmüştür. TiO_2 katkı oranı %2 olduğunda ise sürtünme katsayısı baz yağın sürtünme katsayısının üzerine çıkmaktadır. TiO_2 ve P25 nanopartiküllerinin etkisi karşılaştırıldığında TiO_2 nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısının düşük olduğu belirlenmiştir (Ingole ve diğ. 2013).

Wu ve diğerleri, 90 nm ve 2 μm boyutunda WS_2 nanopartiküllerini 5W 30 yağında %0.5, %1, %1.5 ve %2 olmak üzere 4 karışım oranında iyonik sıvı [$\text{C}_7\text{H}_{11}\text{F}_3\text{N}_2\text{O}_3\text{S}$] katkılı, katkisiz olmak üzere baz yağ ile birlikte 17 test numunesi hazırlamıştır. Sürtünme ve aşınma testleri dört top test mekanizmasında 392N, 1450 devir/dakika, oda sıcaklığında ve 40 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir. %1 90nm boyutunda WS_2 nanopartikül + iyonik sıvı katkılı yağın en iyi sürtünme katsayısını verdiği görülmüştür. Test sonuçların zamana bağlı olarak aynı etkiyi gösterip göstermeyeceğini incelemek amacıyla baz yağ ile birlikte %1 90nm boyutunda WS_2 nanopartikül + iyonik katkılı yağ 5400s süre ile test edilmiştir. Test başlangıcında baz yağ sürtünme katsayısı 0.08 iken, katkılı yağ sürtünme katsayısı 0.75'dir. Test süresi 1300s olduğunda baz yağ ile katkılı yağ 0.135 sürtünme katsayısında aynı değerleri göstermiş ve daha sonra düşmeye başlamıştır. Test süresi 2300s'ye ulaştığında sürtünme katsayısı nanopartikül katkılı yağ için 0.10 olduğu, baz yağ için 0.13 olduğu ölçülmüştür. Nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısına olumlu etki ettiği testler sonucunda görülmüştür (N. Wu ve diğ. 2018).

Çelik ve diğerleri, SAE 10W motor yağı içerisinde hegzagonal bor nitrit (hBN) nanopartiküllerini hacimce %0-10 arasında değişen 4 farklı hBN katkılı yağ numunesi hazırlamıştır. Tribolojik testler disk üstünde bilye test cihazında, 20°C'de 50 mL yağ içinde, 2.5 cm/s kayma hızında 10N normal yük altında 40m toplam kayma mesafesinde 4'er defa yapılarak değerlerin ortalamaları alınmıştır. Test sonucunda sürtünme katsayıları baz yağ için 0.111, B1 için 0.122, B2 için 0.095 ve B3 için 0.106

olarak belirlenmiştir. B1 katkısı içinde yer alan hBN nanopartikülleri B2 ve B3 karışımlarında bulunan nanopartikül miktarlarından daha düşük olduğu için yeterli koruma tabakası oluşturamamış ve bu nedenle sürtünme katsayısı değeri artmıştır. B2 nanopartikül katkılı yağda sürtünme katsayısı %14.4, aşınma değerleri ise baz yağa göre %65 oranında azaldığı belirtilmiştir. B2 hBN nanopartikül katkılı yağ içerisinde bulunan nanopartiküller temas yüzeyini yeterli seviyede kaplamış ve sürtünme kuvvetinin düşmesi ile birlikte aşınma iz genişliğinin azaldığı belirtilmiştir (Çelik ve diğ. 2013).

Baş ve Karabacak, SAE 20W50 motor yağı içerisine ağırlıkça %2, %4, %6 oranlarında hegzagonal bor nitrit (hBN) ve borik asit (BA) nanopartiküllerini ayrı ayrı ilave ederek nanopartikül katkılı yağ elde etmişlerdir. Elde edilen nanopartikül katkılı yağ disk üstünde pim test cihazında 300, 600, 900 devir/dakika kayma hızlarında, 142, 242, 342, 442, 542N yüklerinde 12 dakikalık sürelerde ve 20, 40, 60°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. 600 devir/dakikada 20°C’de hBN nanopartikül katkılı yağlardan ağırlıkça %4 oranında hBN katkılı yağ, baz yağa göre sürtünme katsayısını %31-36 arasında düşürmüştür. Aynı koşullarda ağırlıkça %4 BA nanopartikül katkılı yağın, baz yağa göre sürtünme katsayısını %40-47 oranlarında düşürdüğü tespit edilmiştir. Temas yükündeki artış ile sürtünme katsayılarındaki değişimde bir artış gözlemlenmiştir. 60°C’de ağırlıkça %4 hBN nanopartikül katkılı yağ ile %4 BA nanopartikül katkılı yağ karşılaştırıldığında, sürtünme katsayısı baz yağa göre sırasıyla %28 ve %32 azalmıştır. Bu sonuçların ağırlıkça %4 hBN ve ağırlıkça %4 BA katkı maddelerinin yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısının azaltılmasına daha etkili olduğunun bir kanıtı olarak sunulmuştur. Optimum nanopartikül katkı oranları belirlendikten sonra, ağırlıkça %4 hBN katkılı yağ ile birlikte ağırlıkça %4 BA katkılı yağ baz yağa karşı 170 kVA’lık bir alternatör John Deere dizel motorunda %7 yük altında motor boşta çalışırken testleri yapılmıştır. Baz yağ ile birlikte bor katkılı yağlar için 1 saatlik çalışma sürelerinde motor devri sabit tutularak yakıt tüketimi değerleri kayıt altında alındı. Motorun yakıt ihtiyacı motorun devrine bağlı olarak değişmektedir. Baz yağa göre nanopartikül katkılı yağlar düşük devirlerde yakıt tüketimini azaltırken bu etkileri yüksek motor hızlarında daha düşük oranlarda kendisini göstermektedir, diğer bir deyişle motor devri yükseldikçe nanopartiküllerin yakıt tüketimine olan etkisi azalmaktadır. Test motorunda baz yağ kullanılarak bir saatlik çalışma sonucunda ölçülen toplam yakıt tüketimi değeri 17.315 L/saat iken,

%4 hBN ve %4 BA nanopartikül katkılı yağlarda bu değer sırasıyla 16.864 L/saat ve 16.696 L/saat olarak belirlenmiş ve bu değerlerin yakıt tüketim değerlerinde %3.6 ve %2.7 oranlarında azalmaya tekabül ettiği belirtilmiştir (Baş ve Karabacak, 2014).

Ghaednia ve diğerleri, Ag nanopartiküllerini polietilen glikolde (PEG), poli vinil glikol ile yüzey modifikasyonu yapılarak stabil bir karışım elde etmiştir. Elde edilen yağlayıcının tribolojik özellikleri disk üstünde pim test cihazı üzerinde 0.5 m/s hızda, 10N kuvvette, 25°C sıcaklıkta toplam 2500 metre kayma mesafesinde farklı konsantrasyonlarda test edilmiştir. Test işlemleri sadece tek bir yük ve hız değerinde kalmamış aynı zamanda stribeck eğrisini oluşturacak şekilde sürtünme testleri yapılmıştır. Yaptıkları testler sonucunda Ag nanopartiküllerinin stribeck eğrisine göre karışık ve sınır yağlama koşullarında etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Ag nanopartikül katkılı yağın baz yağa göre sürtünme katsayısında %35'e varan düşüş elde edilmesini sağladığı belirtilmiştir (Ghaednia ve diğ. 2016).

Xu ve diğerleri, PAO4 baz yağ içerisinde Fe_3O_4 ve MoS_2 nanopartiküllerini hem tek tek hem de birlikte kullanarak sürtünme ve aşınma üzerine etkilerini incelemişlerdir. Nanopartikül katkı oranları ağırlıkça %0.25, %0.5, %1 ve %2 olarak belirlemişler ve baz yağ ile nanopartikül katkı maddeleri öncelikle 1 saat mekanik karıştırıcıda karıştırılmış ardından da 20 dakika ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılmışlardır. Disk üstünde bilye cihazı üzerinde testler; 20N normal kuvvet, 5mm kayma mesafesi, 50mm/s hız, 30 dakika kayma süresi ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Bütün katkı oranları için yapılan testlerde Fe_3O_4 nanopartikülü katkılı yağların baz yağa göre daha fazla, MoS_2 nanopartikül için ise tüm katkı oranlarında sürtünme katsayısının daha düşük olduğu görülmüştür. Fe_3O_4 ve MoS_2 nanopartikülleri birlikte kullanıldığında MoS_2 nin tek başına yaptığı etkiden daha fazla bir etki ile sürtünme katsayısının daha da düştüğü görülmektedir. MoS_2 nanopartikülleri için optimum karışım oranı ağırlıkça %2 iken, Fe_3O_4 ve MoS_2 nanopartikülleri için optimum karışım oranının ağırlıkça %1 olduğu belirlenmiştir. Fe_3O_4 ve MoS_2 nanopartikülleri için karışım oranı arttıkça sürtünme katsayısındaki iyileşme etkisinin azaldığı da belirtilmiştir (Y. Xu ve diğ. 2018).

Trivedi ve diğerleri, sentezledikleri Fe_3O_4 nanopartikülleri öncelikle oleik asit ile yüzey modifikasyonu yapıp ardından yüzeyi değiştirilmiş Fe_3O_4 nanopartikülleri düşük viskoziteli (LV) 21 kat daha yüksek viskoziteli (HV) yağlara hacimce %0.2,

%0.4, %0.6, %0.8, %1 oralarında karıştırılmıştır. Tribolojik testler dört top test mekanizmasında, 60 dakika boyunca, 392N normal kuvvet, 1200 d/d ve 75°C sıcaklıkta yapılmıştır. Öncelikle LV ile HV'nin aynı koşullar altındaki testlerinde, LV test başlangıcında sürtünme katsayısı 0.11 iken 0.31'e bir anda pik yaptığı ve daha sonra 0.15'e düştüğü, aynı şekilde HV'nin başlangıçta sürtünme katsayısı değeri 0.08 iken 100. Saniyede 0.35'e pik yaptığı ve ardından 0.10'a düştüğü gözlemlenmiştir. Değişik oranlarda Fe₃O₄ nanopartikül katkılı LV numunesi test edildiğinde; baz yağ olan LV sürtünme katsayısı değeri test başlangıcında 0.125 iken hacimce %0.2 oranında Fe₃O₄ nanopartikülleri ilave edildiğinde sürtünme katsayısı 0.070'e düşürdüğü belirlenmiştir. Hacimce %0.2, %0.4, %0.6 oranlarında Fe₃O₄ nanopartikülleri ilavesi sürtünme katsayısında yaklaşık %44'lük bir iyileşme sağlarken %1 oranında Fe₃O₄ nanopartikülleri ile bu iyileşme oranı %36'ya düştüğü görülmüştür (Trivedi ve diğ. 2018).

Tablo 1.1: Nanopartiküllerin yağ katkısı olarak sürtünme katsayısındaki değişime etkisi

S. No.	Nanopartikül	Baz Yağ	Boyut (nm, µm)	Konsantrasyon	Sürtünme Katsayısındaki değişim (%)	Kaynaklar
1.	BA Borik Asit	SAE 15 W40	< 50 nm	1:10 Hacimce (v)	8 Azalma (-)	(Vadiraj ve diğ. 2012)
2.	BA Borik Asit	SAE 90	< 50 nm	3:10 Hacimce (v)	13Azalma (-)	(Vadiraj ve diğ. 2012)
3.	BA Borik Asit	SAE20W50	125 µm	4 % Ağırlıkça (w)	47 Azalma (-)	(Baş ve Karabacak, 2014)
4.	BA Borik Asit	SAE 20W50	-	2 % Ağırlık/Hacim	44.13 Azalma (-)	(Durak, 2003)
5.	BN	5W40	42.07 nm	50 mg/mL	14.26 Azalma (-)	(Demirtas ve diğ. 2018)
6.	hBN	SAE10W	114 nm	B2	14.4 Azalma (-)	(Çelik ve diğ. 2013)
7.	hBN	SAE20W50	70 µm	4 % Ağırlıkça (w)	40 Azalma (-)	(Baş ve Karabacak, 2014)
8.	Cu	CD 15 W40	50 nm	7.5 % Ağırlıkça (w)	35 Azalma (-)	(B.-S. Zhang ve diğ. 2011)
9.	Cu	SJ 15 W40	3 nm	0.5 % Ağırlıkça (w)	55 Azalma (-)	(M. Zhang ve diğ. 2009)
10.	Cu	SAE 15 W40	< 20 nm	1:10 Hacimce (v)	6 Azalma (-)	(Vadiraj ve diğ. 2012)
11.	Cu	SAE 90	< 20 nm	3:10 Hacimce (v)	33 Azalma (-)	(Vadiraj ve diğ. 2012)
12.	Cu	SAE 10	50–80 nm	0.25 % Ağırlıkça (w)	49 Azalma (-)	(Padgurskas ve diğ. 2013)
13.	Co	SAE 10	50–80 nm	0.25 % Ağırlıkça (w)	20 Azalma (-)	(Padgurskas ve diğ. 2013)
14.	Fe	-	50–80 nm	0.25 % Ağırlıkça (w)	39 Azalma (-)	(Padgurskas ve diğ. 2013)
15.	Fe+Cu	SAE 10	50–80 nm	0.5 % Ağırlıkça (w)	53 Azalma (-)	(Padgurskas ve diğ. 2013)
16.	Fe+Co	SAE 10	50–80 nm	0.5 % Ağırlıkça (w)	36 Azalma (-)	(Padgurskas ve diğ. 2013)
17.	FeCu	SAE 10	50–80 nm	0.5 % Ağırlıkça (w)	55 Azalma (-)	(Padgurskas ve diğ. 2013)
18.	FeCo	SAE 10	50–80 nm	0.5 % Ağırlıkça (w)	50 Azalma (-)	(Padgurskas ve diğ. 2013)

Tablo 1.2: Nanopartiküllerin yağ katkısı olarak sürtünme katsayısındaki değişime etkisi - 2

S. No.	Nanopartikül	Baz Yağ	Boyut (nm, µm)	Konsantrasyon	Sürtünme Katsayısındaki değişim (%)	Kaynaklar
19.	Co+Cu	SAE 10	50–80 nm	0.5 % Ağırlıkça (w)	53 Azalma (-)	(Padgurskas ve diğ. 2013)
20.	CeO ₂	Hindistan Cevizi Yağ	30–150 nm	0.51 % Ağırlıkça (w)	22 Azalma (-)	(Thottackkad ve diğ. 2014)
21.	CeO ₂	Parafin Yağ	30–150 nm	0.46 % Ağırlıkça (w)	16 Azalma (-)	(Thottackkad ve diğ. 2014)
22.	CeO ₂	Motor yağı	30–150 nm	0.63 % Ağırlıkça (w)	12 Azalma (-)	(Thottackkad ve diğ. 2014)
23.	CuO	SAE30 LB51153	5 nm	0.1 % Ağırlıkça (w)	18.4 Azalma (-)	(Y. Y. Wu ve diğ. 2007)
24.	CuO	SAE30 LB51163–11	5 nm	0.1 % Ağırlıkça (w)	5.8 Azalma (-)	(Y. Y. Wu ve diğ. 2007)
25.	Fe ₃ O ₄ hegzagonal	#40 Motor Yağı	46 nm	1.5 % Ağırlıkça (w)	58.16 Azalma (-)	(Gao ve diğ. 2013)
26.	Fe ₃ O ₄ oktahedral	#40 Motor Yağı	50 nm	1.5 % Ağırlıkça (w)	47.96 Azalma (-)	(Gao ve diğ. 2013)
27.	Fe ₃ O ₄ Düzensiz Yapı	#40 Motor Yağı	50 nm	1.5 % Ağırlıkça (w)	34.69 Azalma (-)	(Gao ve diğ. 2013)
28.	Fe ₃ O ₄ Magnetit	Mineral yağ	10 nm	2 % Ağırlıkça (w)	25 Azalma (-)	(Zhou ve diğ. 2013)
29.	Fe ₃ O ₄ +MoS ₃	PAO4	-	1 % Ağırlıkça (w)	30 Azalma (-)	(Y. Xu ve diğ. 2018)
30.	Fe ₃ O ₄	LV Mineral Yağ	12 nm	0.2 % Hacimce (v)	44 Azalma (-)	(Trivedi ve diğ. 2018)
31.	TiO ₂	SAE30 LB51153	80 nm	0.1 % Ağırlıkça (w)	14 Azalma (-)	(Y. Y. Wu ve diğ. 2007)
32.	TiO ₂	Mineral Yağ	20–25 nm	0.25 % Ağırlıkça (w)	10 Azalma (-)	(Ingole ve diğ. 2013)
33.	TiO ₂ (P25)	Mineral Yağ	20–25 nm	2 % Ağırlıkça (w)	30 Yükselme (+)	(Ingole ve diğ. 2013)
34.	TiO ₂	10W30	10–25 nm	3 % Ağırlıkça (w)	86.48 Azalma (-)	(Laad ve Jatti, 2018)
35.	TiO ₂	5W40	114.76 nm	1 % Ağırlık/Hacim (w/v)	18 Azalma (-)	(Demirtas ve diğ. 2018)
36.	ZnAl ₂ O ₄	Mineral Yağ	95 nm	0.1 % Ağırlıkça (w)	33.37 Azalma (-)	(Song ve diğ. 2012)

Tablo 1.3: Nanopartiküllerin yağ katkısı olarak sürtünme katsayısındaki değişime etkisi - 3

S. No.	Nanopartikül	Baz Yağ	Boyut (nm, μ m)	Konsantrasyon	Sürtünme Katsayısındaki değişim (%)	Kaynaklar
37.	ZnO	Mineral Yağ	95 nm	0.1 % Ağırlıkça (w)	27.6 Azalma (-)	(Song ve diğ. 2012)
38.	Al ₂ O ₃	Mineral Yağ	95 nm	0.1 % Ağırlıkça (w)	24 Azalma (-)	(Song ve diğ. 2012)
39.	WS ₂	5W 30	90 nm	1 % Ağırlıkça (w)	27.5 Azalma (-)	(N. Wu ve diğ. 2018)
40.	WS ₂	5W 30	2 μ m	2 % Ağırlıkça (w)	29.2 Azalma (-)	(N. Wu ve diğ. 2018)
41.	WS ₂ + iyonik sıvı	5W 30	90 nm	1 % Ağırlıkça (w)	33.3 Azalma (-)	(N. Wu ve diğ. 2018)
42.	WS ₂ + iyonik sıvı	5W 30	2 μ m	0.5 % Ağırlıkça (w)	30 Azalma (-)	(N. Wu ve diğ. 2018)
43.	SWCNT	5W40	90 nm	5 mg/mL	17 Azalma (-)	(Demirtas ve diğ. 2018)
44.	MWCNT	5W40	60 nm	-	7 Azalma (-)	(Demirtas ve diğ. 2018)
45.	G	5W40	30 nm	25 mg/50mL	1.11 Azalma (-)	(Demirtas ve diğ. 2018)
46.	GO (TEGO)	5W40	-	0.5 % Ağırlıkça (w)	16.6 Azalma (-)	(Demirtas ve diğ. 2019)
47.	Ag	PEG	2–10 nm	4.5 mM	35 Azalma (-)	(Ghaednia ve diğ. 2016)

1.2 Çalışmanın Amacı

İçten yanmalı motorlar üzerinde sürtünmenin etkisinin azaltılması üzerine yapılan çalışmalar genel olarak ön testler olarak adlandırılan; disk üzerinde pim, disk üzerinde bilye, dört bilye test cihazları ile yapılmıştır.

İçten yanmalı motorlarda yük ve hıza bağlı olarak mekanizma parçalarında farklı sürtünmeler meydana gelmesinden dolayı araştırmaların gerçek bir motor üzerinde yapılması gerekliliği görülmüştür. Bu çalışmada aşağıda sıralanan nedenlerden dolayı Fe_3O_4 nanopartiküllerinin motor üzerindeki sürtünmeye etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

Fe_3O_4 nanopartiküllerinin seçilmesinde belirleyici olan kriterler;

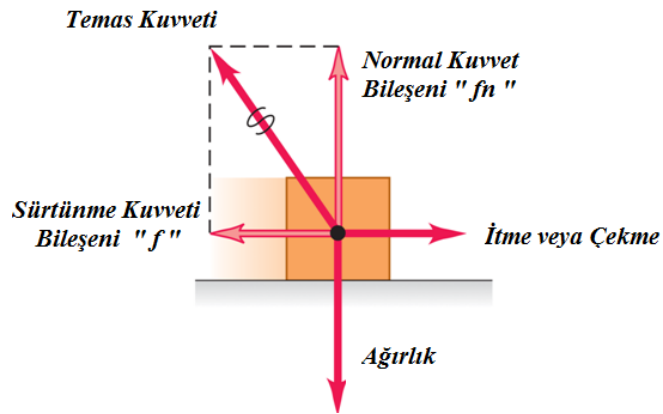
- Maliyet etkisi,
- Magnetit özelliği ve yağlardan kolay ayrıştırılabilme özelliği,
- Fe_3O_4 nanopartikülleri üzerine yeterli çalışma ve araştırmanın olmaması.

2. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA SÜRTÜNME VE SÜRTÜNME KAYIPLARI

2.1 Sürtünme

Sürtünme, anlaşılması kolay olmayan karmaşık bir olgudur. Belirsizdir çünkü hareketi önler, gerçekte ise hareketi mümkün kılar. Sürtünme karşılıklı temas halindeki yüzeylerin maddi alanları arasındaki etkileşimdir. Dış sürtünmede temas eden malzemelerin temas noktaları farklı malzemelere ait iken iç sürtünmede ise temas yüzeyleri malzemeyi oluşturan maddelerin birbirleri ile sürtünmesi durumunda veya yağlayıcı kullanılması halinde yağlayıcının iç yüzeyleri arasında (viskozite) meydana gelir (Basshuysen ve Schäfer, 2004). Sürtünmenin genel tanımı olarak kaymaya karşı koyan kuvvet ifadesi kullanılabilir. Her malzemenin kendisine özgü sürtünme katsayısı vardır.

Sürtünme içten yanmalı motorlarda istenmeyen bir durum olsa da araçlar için bazen en çok ihtiyaç duyulan bir özellik halini alabilmektedir. Örnek olarak fren balatası ile disk arasındaki sürtünme, debriyaj balatası ile baskı ve volan arasında sürtünmede sürtünme katsayısı değerinin yüksek olması istenir. İtilen veya çekilen cisme etki eden kuvvetlerin gösterimi aşağıdaki gibidir;



Şekil 2.1: İtme veya çekme kuvvetine maruz kalan cisim üzerinde sürtünme kuvvetinin gösterimi (Aydın, 2015; Young ve Freedman, 2015)

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, iki farklı temas yüzeyin bağıl hareket ettiğinin ifadesidir. Kinetik sürtünme kuvvetinin büyüklüğü uygulanan normal kuvvet ile doğru orantılıdır. 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 (Aydın, 2015; Young ve Freedman, 2015).

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

Burada f_k sürtünme kuvveti (kinetik), μ_k , sürtünme katsayısı (kinetik) ve f_n ise normal kuvvet olarak adlandırılır. μ_k kinetik sürtünme kuvveti ile normal kuvvetin oranı olarak değerlendirildiğinden birimi yoktur. Sürtünme katsayısı;

$$\mu_k = \frac{\text{Sürtünme Kuvveti}}{\text{Uygulanan Kuvvet}} = \frac{f_k}{f_n} \quad (2.2)$$

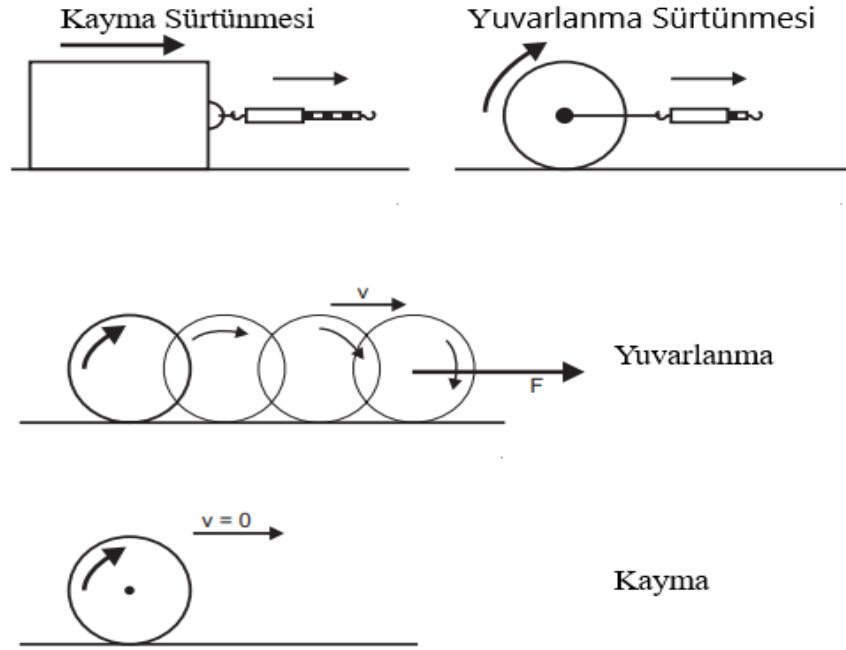
Kayganlaşan yüzeylerde bu katsayı daha da küçülür. Bir katı cisim başka bir katı cisim üzerinde kayma hareketi yaparken, sürekli olarak bu iki yüzey arasında bağlar oluşup, kopmaktadır. Oluşan bu bağlar sayıca her zaman değişkendir. Bu nedenle de kinetik sürtünme kuvveti ve de kinetik sürtünme katsayısının sabit olması beklenemez (Aydın, 2015; Young ve Freedman, 2015).

Sürtünme Çeşitleri

Kayma Sürtünmesi

Patinaj ve yuvarlanma olmadan meydana gelen sürtünmedir. Aşağıdaki şekilde de görüleceği üzere sürtünme katsayısı F sürtünme kuvveti ve normal kuvvetin oranı

olarak tanımlanır. Normal kuvvet ve sürtünme kuvveti arasındaki orantılılık, genellikle kuru ve sınır sürtünme koşullarında verilir, ancak sıvı yağlamada verilmez.



Şekil 2.2: Sürtünme çeşitleri (Young ve Freedman, 2015)

Yuvarlanma Sürtünmesi

Yuvarlanan malzemenin, yuvarlandığı zemin ile temas ettiği noktada meydana gelen sürtünmedir.

2.2 Stribeck Eğrisi Ve Yağlama Rejimleri

Stribeck eğrisi Richard Stribeck tarafından ilk olarak telaffuz edilmeye başlanmıştır. Richard Stribeck, yağlama rejimleri kavramının önemli bir konu olduğunu ve akışkan film oluşumunun ve dolayısıyla yüzey ayrılmasının ve sürtünmenin etkinliğini belirlediğini ifade etmiştir. Yağlama rejimlerini göstermek için sistematik bir yöntem geliştirmiş ve yağlayıcı viskozitesi (η), dönme hızı (ω) ve

temas basıncı (p) ile sürtünme katsayısının ilişkili olduğunu ifade etmiş ve aşağıdaki formülü ortaya çıkarmıştır (Blau, 2009);

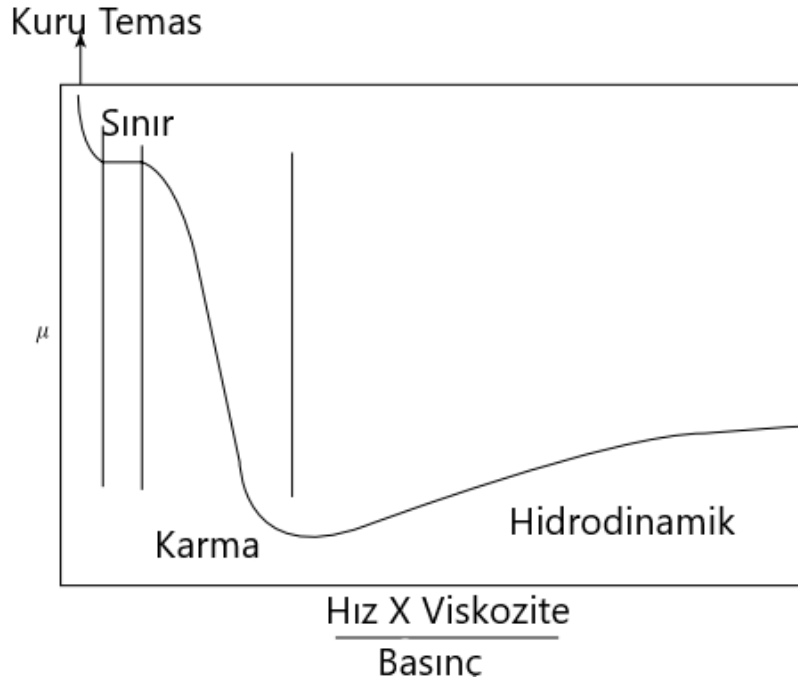
$$\frac{\eta \cdot x \cdot \omega}{p} \quad (2.3)$$

Hersey, Mckee ve diğer araştırmacıların çalışmalarına dayanarak, boyutsuz parametreler grubu, Z 'nin viskozite, N 'nin dönme hızı ve p 'nin de basınç olduğu bir formül gelişmiştir (Blau, 2009);

$$\frac{Z \cdot N}{p} \quad (2.4)$$

Stribeck eğrisi genel gösterimi, yatakların tasarımında ve yağlama alanındaki çeşitli davranış türlerini açıklamak için yaygın olarak kullanılmıştır. Yağlama yağı viskozitesi ve hızı azaldığında veya yüksek basınçta birbiri ile çalışan parçaların yüzeyleri temas eder ve sürtünme katsayısının yükselmesine neden olur. Bu durumda, sürtünme katsayıları 0.5-2.0 aralığındadır. Stribeck eğrisinin solunda sınır sürtünme bölgesinde (0.05 – 0.15) kuru sürtünmeye göre sürtünme katsayısı daha düşüktür. Yağ filmi oluşması ile sürtünme katsayısı düşer, bu bölge karışık sürtünme bölgesidir. Karışık rejim, hidrodinamik veya elastrohidrodinamik sürtünme ile sınır sürtünme geçişlerinin olduğunu ifade eder. Minimum sürtünme katsayısının elde edildiği bölgeden sonra eğrinin sağ tarafında hidrodinamik veya elastrohidrodinamik yağlama bölgesi vardır. Karışık veya elastrohidrodinamik yağlama bölgesi arasında sürtünme katsayısı en düşük değerindedir (Blau, 2009).

Şekil 2-3'te Stribeck eğrisinin genel kullanımı gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Stribeck eğrisi genel kullanımı

Hidrodinamik rejimde L uzunluğu, D çapı ve radyal boşluk C (delik yarıçapı eksi yatak mili yarıçapı) değerlerine sahip bir muyluda sürtünmenin hangi rejimde bulunduğu Sommerfeld sayısı (S) olarak bilinen boyutsuz bir parametre kullanılarak belirlenebilir (Blau, 2009).

$$S = \frac{\eta N L D}{P} \left(\frac{R}{C}\right)^2 \quad (2.5)$$

Burada P , dönme eksenine dik yatak üzerindeki yük, dönme hızı N , kayganlaştırıcının dinamik viskozitesi η ve R deliğin yarıçapıdır. Yatak konsantrik olarak ne kadar çok çalışırsa, o oranda S değeri artar, sürtünme katsayısının yükselmemesi için S değerinden 0'dan uzaklaşması gerekir. Stribeck eğrileri, bazen (ZN/p) yerine S değeri apsiste kullanılarak çizilir. Raimondi ve diğerleri, sürtünme katsayısının ya da boyutsuz film kalınlığının logaritmasına karşı Sommerfeld sayısının logaritmasının çizildiği tasarım çizelgeleri geliştirdiklerinde, sızıntı ihtimallerini de eklediler. McKee, küçük muylu yataklarını kullanarak, muylu çapı D , çap boşluğu C ve yatak çapının uzunluk oranına göre değişen bir deney değişkeni k bazında μ sürtünme katsayısı için aşağıdaki ifadeyi geliştirmiştir (Blau, 2009):

$$\mu = (4.73 \times 10^{-8}) \left(\frac{ZN}{p} \right) \left(\frac{D}{C} \right) + k \quad (2.6)$$

Kaymalı yatak içerisinde milin yağlanması durumunda, k değeri (L/D) = 0.2'de yaklaşık 0.015'tir, hızla (L/D) = 1.0'da minimum yaklaşık 0.0013'e düşer ve neredeyse 0.0035'e kadar doğrusal olarak yükselir. (L/D) = 3.0'da. Hutchings, tarafından sunulan denklem 2.6'dan daha basit bir ifade, anlamlı bir eksantrikliğe sahip olmayan rulmanlar için kullanılabilir (Blau, 2009):

$$\mu = \frac{2\pi}{S} \frac{h}{R} \quad (2.7)$$

Burada S, Sommerfeld sayısı, h ortalama film kalınlığı ve yatak yarıçapı R'dir. Sürtünme katsayısının 0.001 değerine kadar düşürülebilmesi için yatağın tasarımının iyi yapılmış olması ve hidrodinamik yağlama rejiminde çalışması gerekir. Hidrodinamik yağlamanın verimli olabilmesi için ayırmış olduğu temas yüzeyleri arasında basınç profili meydana getirmesi gerekir. Elastohidrodinamik yağlama, katı malzemelerin elastik deformasyonu ile kullanılan yağın yağ filminin kalınlığı ile örtüştüğünde oluşur. Elastohidrodinamik yağlama yüksek temas basıncının olduğu dişliler ve rulmanlarda daha çok karşımıza çıkar. Temas yüzeyine etki eden basıncın elastik sınırı aşması ile birlikte sürtünme ve plastik deformasyon artar. Çeşitli yağlama rejimlerini canlandırmak için bir parametreye spesifik film kalınlığı veya lambda oranı denir. Arabirimdeki (h) minimum film kalınlığının, kompozit yüzey pürüzlülüğü σ^* 'ya oranı olarak tanımlanır (Blau, 2009):

$$\lambda = \frac{h}{\sigma^*} \quad (2.8)$$

σ^* birbiri ile çalışan yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerlerinin aşağıdaki şekilde yapılan işlem sonucunda bulunur.

$$\sigma^* = \sqrt{((\sigma_1^2) + (\sigma_2^2))} \quad (2.9)$$

Sınır yağlama için $\lambda < 1$, karma yağlama için $1 < \lambda < 3$, hidrodinamik rejim için $\lambda > 6$ ve elastohidrodinamik rejim için $3 < \lambda < 6$ olmalıdır.

Stribeck eğrileri için güncel kullanım şekli;

$$\frac{\mu V}{F_n} \quad (2.10)$$

Yağlar ile ilgili yapılan çalışmalarda stribeck eğrisi için (2.3), (2.4), (2.8) ve (2.10) denklemleri daha çok karşımıza çıkmaktadır.

2.3 Yağlama Rejimleri

Göreceli hareket halindeki yüzeyler arasındaki yağlayıcı film kalınlığı ile ilgili olarak dört rejim tanımlanabilir: sınır, karma, elastrohidrodinamik ve hidrodinamik.

2.3.1 Sınır Yağlama

Sınır rejimi, $h < R_a$, akışkan film süreksiz olduğunda ve zıt yüzeylerin yüksek noktaları arasında doğrudan temasa izin verdiğinde oluşur. 70 nm'den az film kalınlıkları ve diğer rejimlerden daha yüksek sürtünme kayıpları ile karakterize edilir. Bunun meydana gelebileceği örnekler ekipmanın başlatılması veya kapanması sırasında, dişli dişli temasında veya pistonlu hareketlerde ölü noktalarda çalışabileceği zaman olabilir (Affatato ve diğ. 2011).

2.3.2 Karışık Yağlama

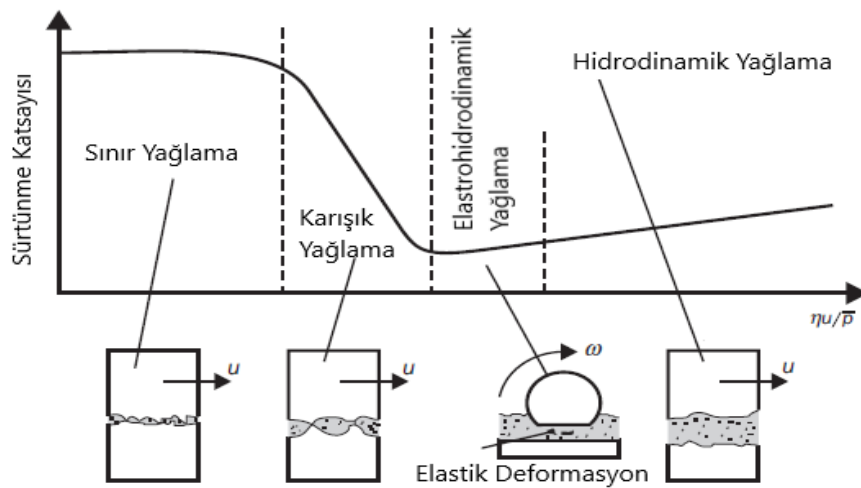
Karışık yağlama rejimi $h \sim R_a$, tamamen yağlanmış (ayrılmış) ve temas etmiş (ayrılmamış) yüzey alanları, sürtünme ve film parametrelerini eşit şekilde etkilediğinde, sınır ile hidrodinamik arasında geçiş niteliğindedir. 70 nm ile μm arasında film kalınlıkları değişmektedir. Sürtünme kayıpları, iki sınırlayıcı rejime göre geniş bir aralıkta değişmektedir (Affatato ve diğ. 2011).

2.3.3 Elastohidrodinamik Yağlama

Elastohidrodinamik (EHD) rejim, zıt yüzeylerin bir veya ikisini etkilemeye yetecek kadar yüksek hidrodinamik basınçlara sahip hidrodinamik özel bir durumdur. Sonuncular ayrılır, ancak elastik deformasyona ve temassız alanın genişlemesine neden olan asperiteler arasında bir etkileşim vardır, bu sayede yağlama maddesinin viskoz direnci yükü destekleyebilmektedir. Film kalınlıkları genellikle 10 ila 70 nm arasındadır. Kayıplar, yüzeyler tamamen ayrıldığı için hidrodinamik yağlama altında olduğu gibidir (Affatato ve diğ. 2011).

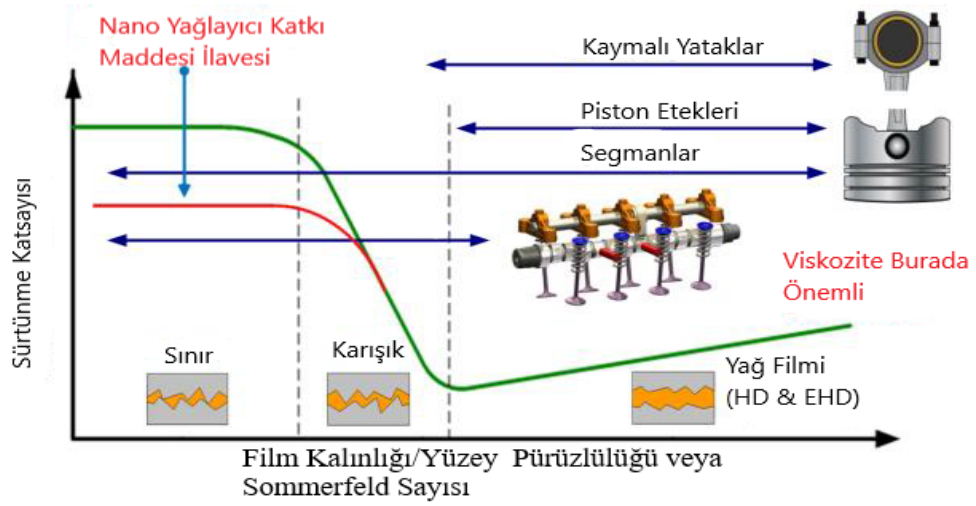
2.3.4 Hidrodinamik Yağlama

Hidrodinamik yağlama rejimi, $h \gg Ra$, yağlama maddesi yüzeyleri tamamen ayırdığında meydana gelir; çoğunlukla $1 \mu\text{m}$ 'den büyük veya daha fazla film kalınlıkları ile ilişkilendirilir. Hidrodinamik yağlama altındaki sürtünme kayıpları diğer yağlama rejimlerinden çok daha azdır. Yağlayıcı filmde nispi hareket ve iç film sürtünmesi nedeniyle oluşan hidrodinamik basınç, yüzey deformasyonuna neden olamayacak kadar düşüktür. Yağlayıcı filmin akışı laminardır, ancak $20 \mu\text{m}$ 'nin üzerindeki kalınlıklarda türbülanslı hale gelir ve bu istenmeyen sürtünme kayıplarına neden olur (Affatato ve diğ. 2011).



Şekil 2.4: Stribeck Eğrisi ve yağlama rejimleri (Affatato ve diğ. 2011)

Şekil 2-5'te İçten yanmalı motorlar için kullanılan Stribeck eğrisi gösterilmektedir.

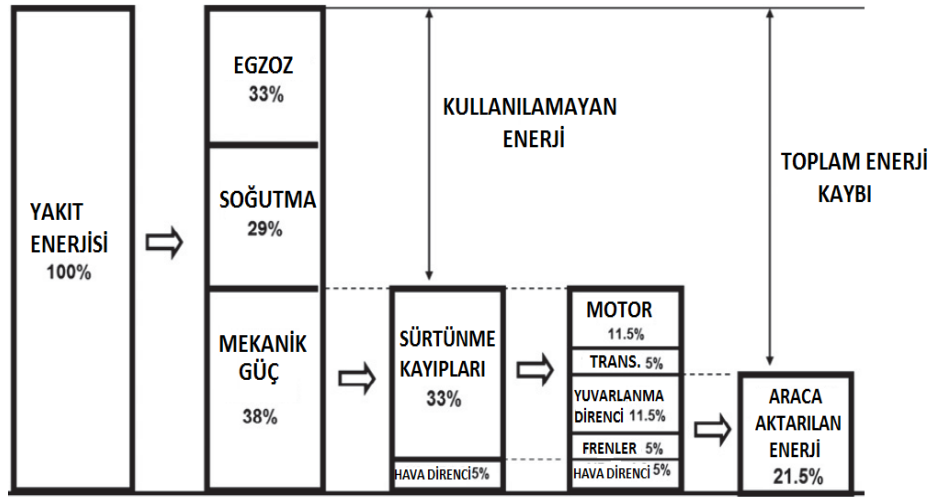


Şekil 2.5: İçten yanmalı motorlar için Stribeck Eğrisi (Kamal ve diğ. 2019)

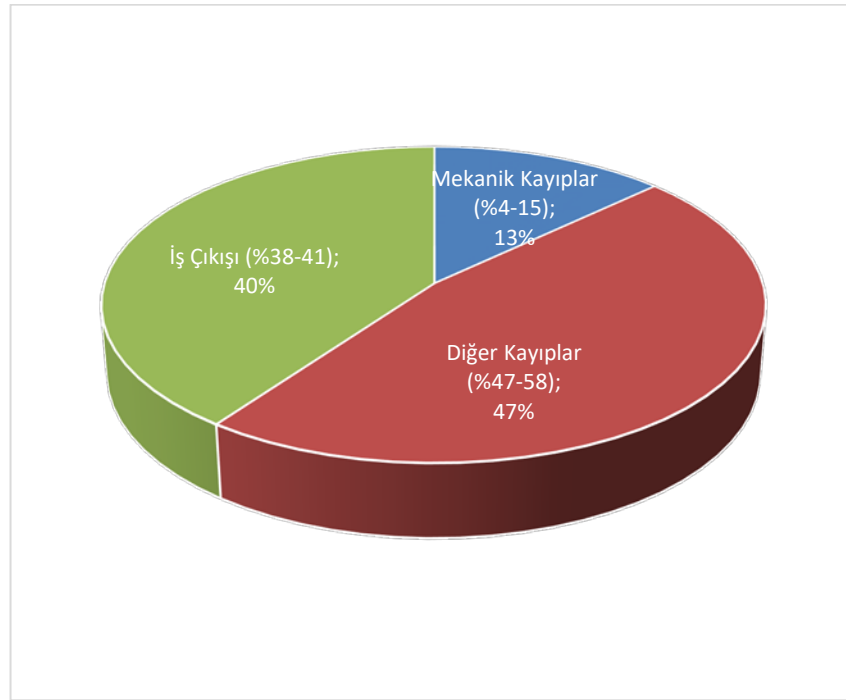
2.4 İçten Yanmalı Motorlarda Sürtünmeye Etki Eden Faktörler

1860'lı yıllarda ilk başarılı içten yanmalı motorun icadından günümüze kadar içten yanmalı motorlar taşıtların en önemli güç kaynağı olmuş ve uzun dönemde olmaya devam edecektir. Dünyadaki motorlu taşıtların artmasıyla beraber sınırlı fosil yakıt kaynakları nedeniyle içten yanmalı motorlarda zamana bağlı olarak, artan enerji talebi, yükselen emisyon standartlarını karşılayabilmek için otomotiv endüstrisi yakıt ekonomisini iyileştirmek ve emisyon değerlerini azaltma için pratik çözümler bulmak zorundadır. Yakıt ekonomisini iyileştirebilmenin önemli yollarından bir tanesi yakıttan elde edilen gücün verimli kullanımı için içten yanmalı motorlarda meydana gelen kayıpların düşürülmesidir.

Holmberg ve diğerleri yaptıkları genel değerlendirme ve araştırma çalışmasında yakıtın yanması ile elde edilen enerjinin; %33'ü egzoz gazları ile birlikte silindirden atılır ve konveksiyonla kaybolur. %29'u motor yapısı, soğutma suyu radyatörü ve yağ soğutucusu ile birlikte bazen de aracın içinin ısıtılması için kullanılan kalorifer sistemi ile çevreye yayılan ısıdan dolayı soğutma kaybına gittiğini, hava sürtünmesi ve sürtünme kayıplarının üstesinden gelebilmek için %38'inin mekanik güce dönüştürüldüğünü ifade etmiştir (Holmberg ve diğ. 2012).



Şekil 2.6: Araçlarda yakıttan elde edilen enerjinin kaybedildiği alanlar (Holmberg ve diğ. 2012)



Şekil 2.7: Motordaki enerjinin dağılımı (Holmberg ve diğ. 2012)

2.4.1 Krank Mili Ve Krank Mili Yatakları Arasındaki Etkileşim

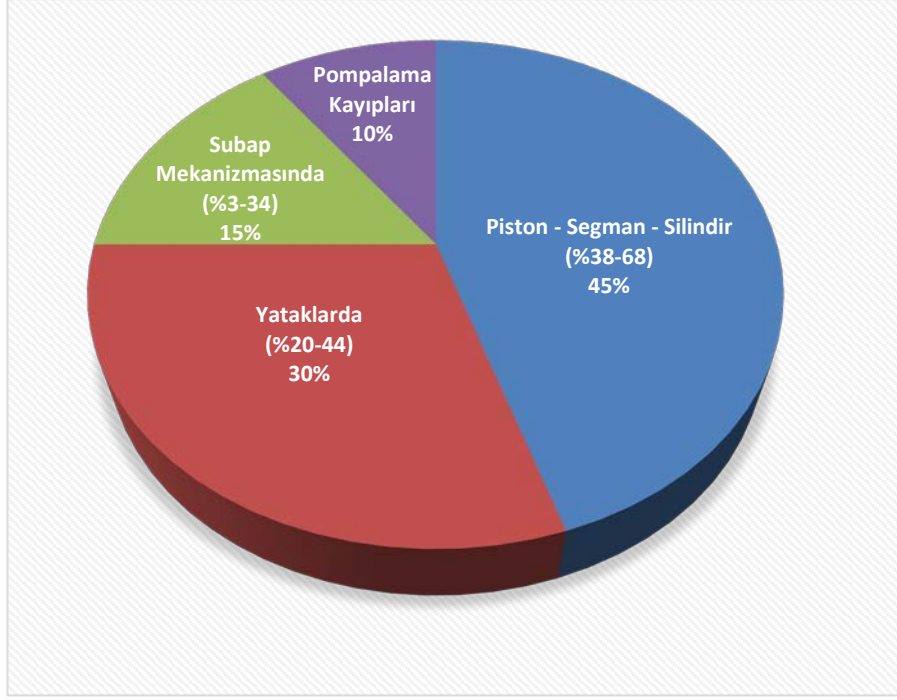
Krank mili döndükçe, krank mili ile motor bloğu yapısı arasında ve aynı zamanda krank mili ile biyel kolu arasında kayma meydana gelir. Muylu yatakları hidrodinamik koşullara göre tasarlandığından yük öncelikle yataklar yoluyla aktarılır.

Mil ve yatak arasındaki uygun boşluk iyi motor performansı için önemli olduğundan, deformasyonu en aza indirmek için hem mil hem de yataklar güçlü ve sert malzemeler kullanılarak üretilmelidir. Bununla birlikte, taşıt motorları genellikle uzun süre çalıştırılmamaktadır. Motor çalıştırılana kadar geçen sürede yağlama olmadığından yatak ve mil temas halindedir. Ayrıca, katı parçacıklar (üretim, kirlenme, aşınma vb.) motor yağı içine girebilir ve parçacıklar arasındaki minimum boşluktan daha büyükse bu parçacıklar mil veya yatak yüzeyine zarar verme potansiyeline sahiptir. Yumuşak, uyumlu taşıyıcı yüzey malzemeleri, kapatma sırasında milin yatağa yapışmasını en aza indirir ve bu malzemeler ayrıca bazı küçük kalıntı parçacıklarını yakalayabilir ve sistemden çıkarabilir. Bir yatak malzemesinin döküntüleri yakalamak için bu özelliğine emilebilirlik denir. Krank milleri dökme veya sert bir malzeme olan çelikten yapılır. Emilebilirlik için yatak yumuşak alaşımla kaplanırken temel yapı maddesi olarak özellikle dayanım için çelik kullanılır. Modern motor yatak kaplamaları genellikle daha güçlü fakat aynı zamanda daha düşük empedansa sahip alüminyum-kalay alaşımlarından yapılır, böylece motor ve yağ temizliği uzun süreli motor dayanıklılığı için kritik hale gelir (Tung ve diğ. 2006).

Krank-biyel yatakları ile piston-piston pimi yatakları arasındaki sürtünmeyi etkileyen faktörler

Piston pimi ve piston arasındaki sürtünme ilişkisi, krank mili yatakları ile biyel kolu yataklarındaki sürtünme ilişkisi aynıdır. Bu yataklardaki sürtünmeye etki eden faktörler aşağıdaki gibidir;

- Yüzey işleme kaliteleri
- Yatakların efektif yüzey alanları
- Yağlama yağının cinsi ve viskozitesi
- Yataklara etkiyen kuvvetler



Şekil 2.8: Motor sürtünme kayıpları (Holmberg ve diğ. 2012)

2.4.2 Piston Pimi İle Piston Arasındaki Etkileşim

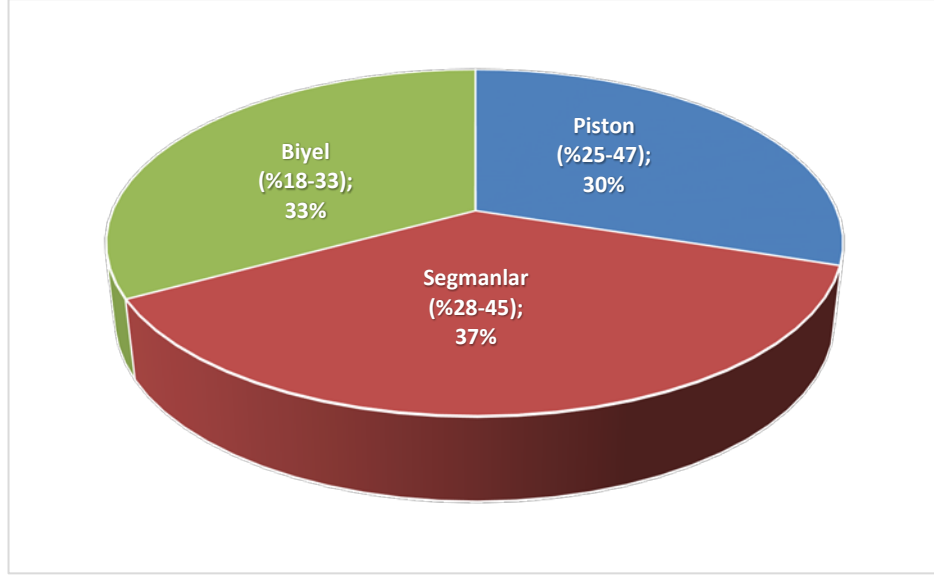
Piston pimi, pistondan biyel koluna kuvvet aktarır. Pim pistona muylulardakine benzer şekilde yatak bağlantısı ile bağlanmıştır. Ancak buradaki fark piston pimi tam tur dönmemektedir. Piston pimi sabit ve yüzen pim olmak üzere iki şekilde bağlanabilir. Sabit sistemde pim pistonda kısmi dönme hareketi yaparken biyelde sıkı geçmez. Yüzen pim bağlantısında, pim piston ve biyel içerisinde dönebilir. Pimin yüzen bağlantısı ile pim yatak sıcaklığı düştüğünden dolayı daha çok yüzen bağlantı tercih edilmektedir. İki bağlantı şeklinde de pim hızı sürtünen yüzeyler arasında yağ filmi oluşması için yeterli olmadığından sınır yağlama durumu söz konusudur. Bu nedenle yüzeyler arasındaki sürtünme malzemelerin tribolojik özellikleri ile kontrol edilir. Pistonlar çoğunlukla alüminyum-silikon gibi alaşımlardan yapılırken pim sonradan karbürleme işlemine tabi tutulan orta veya düşük karbonlu çelikten içi boş şekilde üretilir. Karbürizasyon işlemi, pim yüzeyinin çok sert olması ile sonuçlanır ve pim ile piston arasındaki yapışmayı en aza indirir. Piston ve piston pimi arasındaki sürtünmenin düşürülebilmesi için yağlama büyük önem taşımaktadır (Tung ve diğ. 2006).

2.4.3 Piston Eteği İle Silindir Yüzeyi Arasındaki Etkileşim

Piston eteği ile silindir bloğu arasındaki sürtünme, motor sürtünme kayıplarının artmasına neden olmaktadır. Bu durumda tasarım zorluğu, gürültüyü ve titreşimi en aza indirirken sıkılıktan kaçınmak için piston ile blok arasında küçük bir boşluk bırakılmasıdır. Pistonlarda kullanılan alüminyum silikon alaşımı dökme demirlere göre daha hafif olması nedeniyle motor kütesinin azalmasını sağlamış ve bu sayede titreşim azaltılmıştır. Dökme demire göre alüminyumun ısıl iletkenliği piston tepesinin aşırı ısınmasını önler. Bununla birlikte pistonun altına bir yağ püskürtülmesine yönelik cihazlar veya parçalar eklenerek sağlanan ilave soğutma gerektirir. Yağlama yağının fonksiyonlarından bir tanesi de soğutmadır. Motor blokları gri dökme demirden yapıldığından ısıl iletimi daha düşüktür. Bundan dolayı sıcak motorda piston verimli çalışırken soğuk motorda kompresyon kaçakları ve gürültü artar. Sürtünmeyi azaltmak ve pistonun aşınmasını önlemek için, silindir bloğu yüzeyine yağ verilmelidir. Pistonlara molibden disülfür veya nikel seramik gibi kaplamalar yapılarak piston eteği ile silindir bloğu arasındaki sürtünme düşürölmektedir (Tung ve diğ. 2006).

Piston-Silindir Bloğu Sürtünmesini Etki Eden Unsurlar

- Piston ve silindir bloğu arasındaki boşluk
- Yağlama rejimi
- Piston ve silindir bloğu yüzey işleme kalitesi
- Yağlama yağının cinsi ve viskozitesi
- Piston kütesi
- Piston silindir bloğu yüzey sıcaklıkları
- Piston ağırlık merkezi
- Piston ve silindir bloğu malzemesi
- Elastik ve termal deformasyonlar
- Piston dönel ataleti
- Piston ikincil dinamiği (Kılıç, 2007)



Şekil 2.9: Piston sürtünmesi dağılımı (Holmberg ve diğ. 2012)

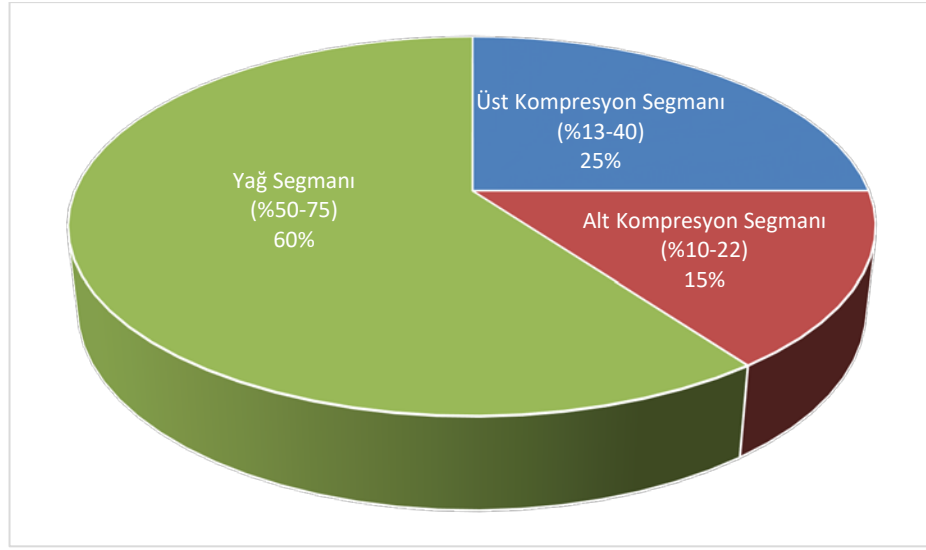
2.4.4 Segmanlar - Silindir Bloğu Etkileşimi

Piston segmanları, pistonun üstündeki yanma gazlarını aşağıdaki karter ortamından ayırmaya çalışan bir conta işlevi görür. Yağ segmanı ile alt ve üst kompresyon segmanından oluşan üçlü segman grubu en çok tercih edilen uygulama şeklidir. Segman blok kayma ara yüzünün toplam motor mekanik sürtünmesinin % 20'sini oluşturduğu tahmin edilmektedir. Yağ genellikle, silindirlerin yüzeyine, yatakların içinden geçtikten sonra krank milinden atılarak ulaşır. Kompresyon segmanlarının sızdırmazlık sağlarken sürtünmeyi arttırmaması için yağlanması gerekmektedir. Kompresyon segmanlarına gönderilecek olan yağı, yağ segmanları kontrol etmektedir. Kompresyon segmanlarını geçen yağlar yanma odası içerisinde yanarak kaybolur. Üst segman yanma sonunda yüksek basınçlar ile sıcaklıkları karşılarken kısıtlı bir yağ ile sızdırmazlık sağlamalıdır. Üst kompresyon segmanının dayanımını arttırmak için molibden kaplı çelik veya nitritlenmiş çelikten imal edilirler (Tung ve diğ. 2006).

Segman-Silindir Bloğu Arasındaki Sürtünmeyi Etkileyen Faktörler

- Segman malzemesi
- Segman dinamiği

- Segman yüzey geometrisi
- Elastik deformasyonlar ve termal etkiler
- Silindir bloğu ile segmanların yüzey kalitesi
- Segman kütlesi
- Silindir bloğu ile segman rijitliği
- Yağlama yağının özellikleri ve viskozitesi (Kılıç, 2007)



Şekil 2.10: Segmanların sürtünmeye etkisi (Holmberg ve diğ. 2012)

2.4.5 Kam Mili, Kam ve Supaplar Arasındaki Etkileşim

Eksantrik mili döndükçe, supapları açmak ve kapatmak için pistonlu düz veya makaralı bir yüzeye bastırır. Eksantrik mili ve supap tapetleri arasında tek yönlü bir kayma hareketi meydana gelmektedir. Motorların tasarımında supap ve eksantrik sistemine yağ sağlamak dikkat edilmiş olsa da zaman zaman yeterli yağlama sağlanamamaktadır. Motor soğukken ilk çalıştırdığımızda yağ pompası yeterli yağlamayı sağlayamadan kam milleri ve supap iticilerinin teması buna bir örnektir. Bu uygulamada yalnızca birkaç malzeme kombinasyonu başarıyla kullanılır ve motor ömrü boyunca periyodik ayarlama veya kendi kendini ayarlayan hidrolik elemanların kullanılması bakım periyotlarını uzatmış ve bakım maliyetlerini düşürmüştür. Sürtünmeyi azaltmak, enerjiyi korumak ve yenilenemeyen yakıt kaynaklarını korumak

için önemli bir araç olduğundan, sürtünmeyi azaltma teknikleri giderek önem kazanmaya devam edecektir (Tung ve diğ. 2006).

2.5 Yağlama Sistemleri

İçten yanmalı motorlarda, motorun ömrüne ve performansına etki eden en önemli faktörlerden bir tanesi yağlamadır. Yağlama birbiri ile alığan yüzeyler arasına girerek malzemelerin hareketine karėı gösterilen sürtünme direncini ve negatif kuvvetleri en aza indirmek için kullanılmaktadır. İçten yanmalı motorlarda yağlama sistemi, sürtünme direnci ile sürtünme katsayısını dğrmenin yanında soğutma görevi ile de alığan parçaların ve motorun ömrünün uzamasına ve daha verimli alığmasına önemli oranda katkı sağlamaktadır.

2.5.1 Yağlama Sisteminin Görevleri

Soğutma

Yağlama yağı, yağ kanalları içerisinde dolağırken yağlamanın yanı sıra alığan parçaların yüzeylerinden ısıyı üzerine alarak alığan parçaların soğutulması görevini de görür.

Sürtünme ve sürtünme direncini azaltma

Yağlar, sürtünen iki yüzey arasında sıvı veya yarı sıvı sürtünmesini sağlayarak, yüzeylerin birbiri ile temasını önler ve sürtünmeyi azaltır. Aynı zamanda sürtünme gücünü dğrerek, yataklar ile alığan parçalar arasındaki ağınmayı dğrr ve g çıkığı ile birlikte motor ömrünün uzatır.

Sızdırmazlık

Silindir gömleği yüzeyinde oluğan yağ filmi, yanma sonu egzoz gazlarının kartere gitmesini önlemek için conta görevi görür.

Temizleme

Motorlar çalışırken dış ortam koşullarından etkilenmemesi ve bu nedenle toz gibi kirleticilerin motor içerisine girmemesi istenir. Yağlama yağı, sisteme dışarıdan giren kirleticileri, sistemde çalışan parçaların yüzeylerinden ayrılan metal tozlarını ve diğer kirletici maddeleri toplayarak kartere taşır. Kartardan yağ tekrar sisteme basılacağından filtre ile süzülendiğinden dolayı kirleticilerin tekrar sistemde dolaşması önlenerek sistemin temizliği sağlanmış olur.

Gürültüyü azaltma

Motor yağı, parçaları titreşime ve darbelere karşı koruyarak motor gürültüsünü azaltır.

Korozyon ve aşınmaya karşı koruma

Motor yağı, çalışan parçaları su, SO₂ gibi yanma ürünlerinin aşındırıcı etkisine karşı korur.

Hareket iletimi

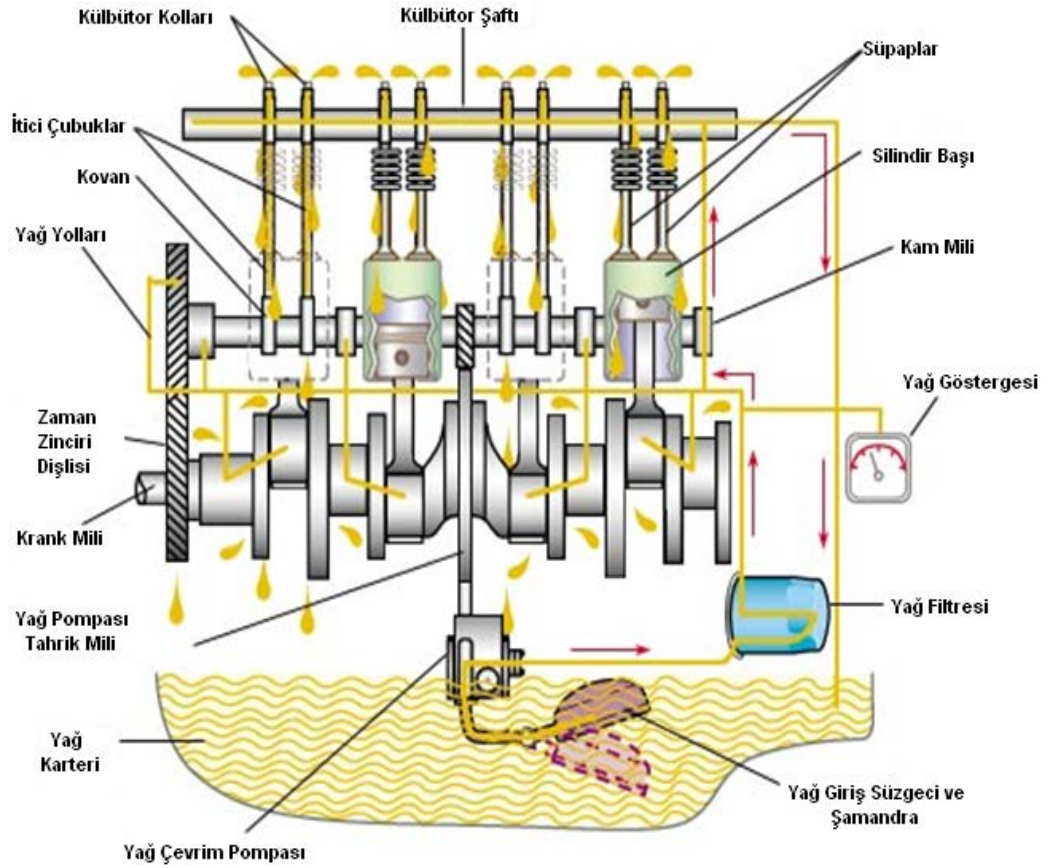
Motor yağı, motorun çalışması ile birlikte motor devrine bağlı olarak artan yağ basıncı sayesinde, supap zamanlaması, eksantrik zincir gergisi gibi parçalara gereken basıncı sağlayarak, motorun daha performanslı çalışması için zamanlama ayarlarının değiştirilmesinde rol oynar.

2.5.2 Yağlama Sistemi Çeşitleri

İçten yanmalı motorlarda, motor parçalarının yağlanabilmesi için yağın depolandığı karterden sistem parçalarına ulaştırılması gerekmektedir. Motor parçalarına yağın ulaştırılma şekline bağlı başlıca yağlama şekilleri aşağıdaki gibidir:

- Damlama ile yağlama
- Elle yağlama
- Fitilli yağlama
- Çarpmalı yağlama

- Banyolu yağlama
- Pompalı ve çarpmalı yağlama
- Basınçlı yağlama
- Basınçlı çarpmalı yağlama
- Tam basınçlı yağlama



Şekil 2.11: İçten yanmalı bir motorda kullanılan tam basınçlı yağlama sistemi

Basınçlı yağlama sistemlerinde piston pimi haricindeki yerlere motor yağı basınç ile gönderilir. Tam basınçlı yağlama sisteminde ise piston pimleri dahil tüm motor sistemi parçalarına yağ basınçlı olarak gönderilir.

Motorlarda yağlama sistemini oluşturan parçalar;

- Karter
- Yağ süzgeci
- Yağ Filtresi
- Yağ soğutucu (her araçta olmayabilir)
- Yağ basınç kontrol supabı

- Yağ Pompası
- Yağ kanalları
- Yağ kontrol lambası

2.6 Motor Yağı Katkıları Ve Görevleri

Motor yağlarında aşınma ve sürtünme kabiliyetlerini arttırmak amacıyla çeşitli katkı maddeleri kullanılmaktadır. Motor yağlarının performansını ifade ederken, sürtünme düşürme etkisi, oksitlenmeye karşı koyması, artık oluşumuna etkisi, aşınma önleme ve korozyon önleme gibi özelliklerine değinilmektedir. Motor yağı içerisine ilave edilen katkı malzemeleri çalışma alanlarına bağlı olarak temel yağın kabiliyetlerini geliştirmek, istenilen ilave kabiliyetler kazandırmak ve motor için ihtiyaç duyulan spesifik kabiliyetleri arttırmak amacıyla kullanılır. Yağ katkı maddeleri etki ettikleri alanlara göre üç ana başlık altında değerlendirilmektedir;

Çalışma Fonksiyonuna Etki Eden Katkı Maddeleri

Tüm katkı maddeleri aşağıdaki gruplardan bir tanesinde yer almaktadır;

Tribo Geliştiriciler (Tribo özellikleri iyileştirici katkı maddeleri), yağın tribolojik performansını iyileştirmeye doğrudan etki eden katkı maddeleridir. Sürtünme düzenleyiciler (FM), aşırı basınç katkıları (EP), aşınma azaltıcı katkılar (AW), başlıca örnekleridir (Minami, 2017).

Reo Geliştiriciler (Reolojiyi iyileştiren katkı maddeleri), baz yağın akışkanlığına etki eden katkı maddeleridir. Viskozite indeksi katkıları (VM) bu gruptaki başlıca katkılardır. Akma noktası düzenleyici katkılar (PPD) yağların düşük sıcaklıklarda kullanılmasına imkân verirler. Ağırlıklı olarak hidrodinamik rejimde yağlama performanslarına dolaylı olarak etki ederler (Minami, 2017).

Bakımcılar veya onarıcılar, yağlama sistemine katılan maddelerin bozulmasını önleyerek hem yağlayıcı hem de makine elemanlarının iyi durumda tutulmasına yardımcı olurlar. Bu katkı maddeleri esas olarak yağlama sisteminin ömrünün

uzamasına katkıda bulunurlar. Antioksidanlar (AO), yağların kullanım süresini belirlemede önemli bir etkidir. Deterjanlar ve dağıtıcılar motora olumsuz etki eden kirleticilerin etkisini zayıflatırlar. Korozyon önleyici katkıları malzemeleri korozyonun yıpratıcı etkisinden korurlar. Su, çoğu uygulamada her yerde bulunan bir kirleticidir. Yağlama yağının viskozitesini düşürür ve yağlama yağı ile makine veya motor parçalarının yaşlanmasına neden olur. Demülsifiye edici (emülsiyon kırıcı maddeler), suyun yağdan ayrılmasına yardımcı olurlar (Minami, 2017).

Yardımcı Katkı Maddeleri, bazen yukarıda anlatılan katkı maddelerine ilaveten özel bir amaç için yağa katılabilirler.

Çalışma Alanına Etki Eden Katkı Maddeleri,

Çalışma alanına etki eden katkı maddeleri, yağın özelliklerine etki eden katkı maddelerinin aksine hareket mekanizmasına moleküler ölçekte odaklanır.

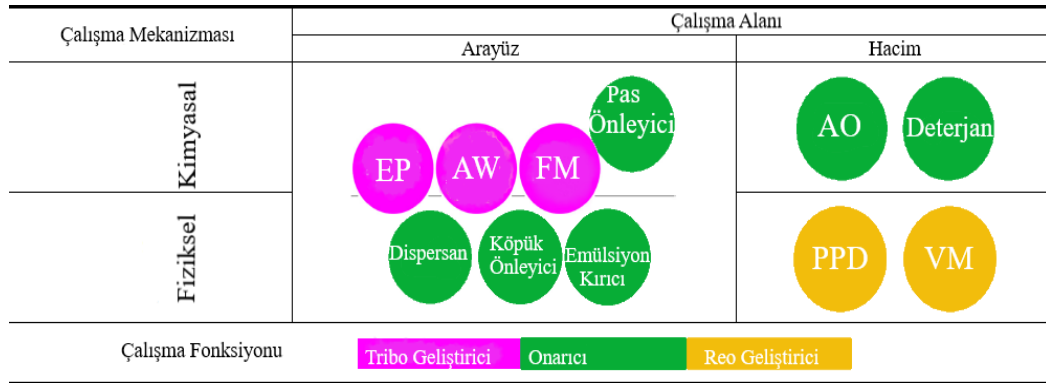
Yağlanmış katı temas malzemesi (Tribolojik malzeme) ile sıvı (yağ) ara yüz ajanlarının çalışacağı alanlardır. Bu katkı maddelerinin ana katkı malzemeleri tribo geliştiricilerdir. Korozyon önleyiciler, aşındırıcı maddelerden etkilenecek yüzeyleri koruma altına alır. Yağlama yağı sistemde çevrim halindeyken hava kabarcığı olabilir ve böylece çeşitli formlar geliştirir. Köpük önleyici katkı maddelerinin gaz-sıvı fazları arasındaki sınırdaki etkileşimi kabarcıkları tahrip edebilir. Kütle ajanları, tek fazlı madde olarak yağlayıcının özellikleri veya dengesi ile ilgilidir. Bu grubun etkili üyeleri reoloji geliştirici katkı maddeleridir (Minami, 2017).

Çalışma Mekanizmasına Etki Eden Katkı Maddeleri

Katkı maddelerinin, moleküllerinin mekanizma çalışırken nasıl davrandığını veya değişim gösterdiğini açıklama konusunda daha fazla fikir verir.

Kimyasal katkı maddeleri, yağa eklendikten sonra kimyasal reaksiyona giren katkı maddeleridir. Bir molekül içerisinde bulunan atomları bağlanmasını sağlayan elektronların yeniden düzenlenmesine kimyasal reaksiyon denir. Tribolojideki katkı

maddeleri ve yağ meydana gelen kimyasal reaksiyonlar çoğunlukla geri dönüşsüzdür, ancak sıvı fazda belirli bir geri dönüşlü reaksiyon olasılığı vardır. Kimyasal bir reaksiyonun başlayabilmesi için gereken enerji fiziksel olaylarda ihtiyaç duyulan enerjiden daha fazladır. Tribokimyasal reaksiyonlarla sürtünme yüzeylerinde sürtünmeyi azaltmak için sınır yağ filmi oluşmasını sağlayan aşınma azaltıcı katkıları bir kimyasal reaksiyonlara örnektir. Antioksidanlarda bu gruba aittir. Kimyasal reaksiyona giren katkı maddelerine göre fiziksel katkı maddeleri herhangi bir değişikliğe uğramadıklarından daha az enerjiye ihtiyaç duyarlar ve geri dönüşü olabilen malzemelerdir. Bu durumda fiziksel katkı maddelerini daha uzun ömürlü yapmaktadır. Şekil 2.12’de gösterilen kategoriler birbirinden bağımsızdır (Minami, 2017).

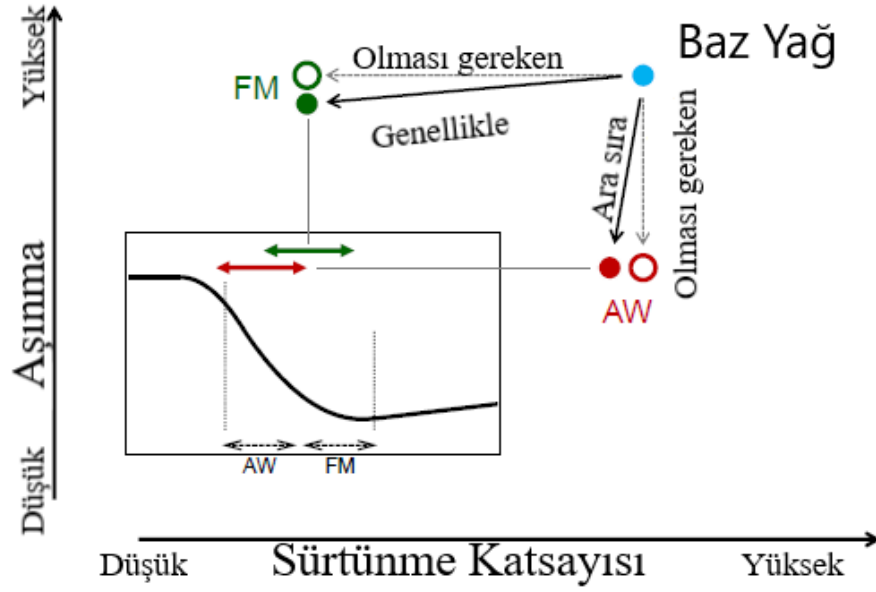


Şekil 2.12: Katkı maddelerinin farklı sınıflandırma ilişkileri (Minami, 2017)

Tribo Geliştirici Katkılar

Yağların temel amaçlarını yerine getirmeleri için mevcut özelliklerinin geliştirilmesi için kullanılan katkı maddeleridir. Sürtünme azaltıcı katkıları (FM), genel olarak hafif yüklerin olduğu karışık rejimde etkindir. Aşınma azaltıcıları (AW) stribeck eğrisinde sınır sürtünme bölgesine yakın olan sert karışık sürtünme bölgesinde aşınmayı azaltırlar. Sürtünme azaltıcı katkıları sürtünmeyi düşürme etkisinin yanında kısmi olarak aşınmayı da düşürür, aynı şekilde aşınma azaltıcılarda primer aşınmayı düşürdüğü bazı durumlarda sürtünmeyi de azaltırlar.

Sürtünme azaltıcıları ile aşınma azaltıcı katkıların etki sınırları net olarak bilinmemektedir. Şekil 2.13’te çalışma fonksiyonları gösterilmektedir.



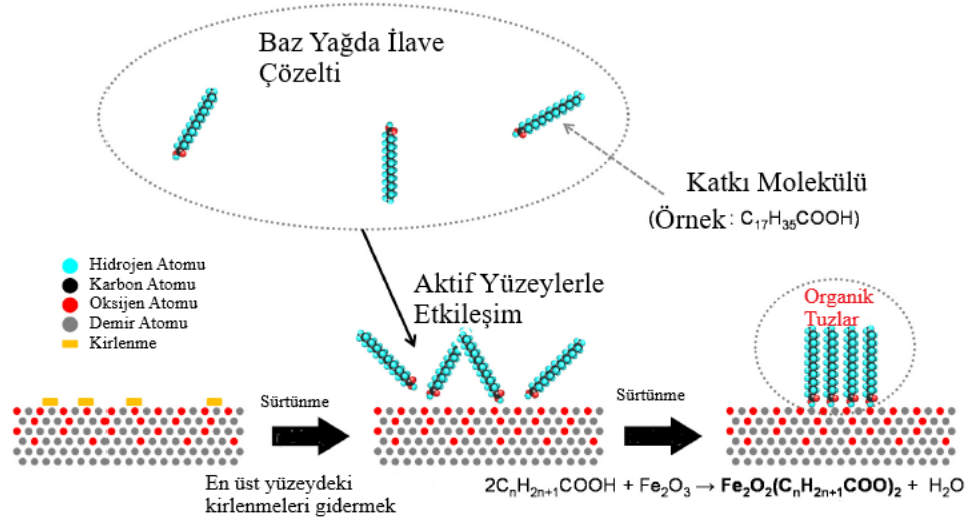
Şekil 2.13: Tribo-geliştiricilerin üst üste binme etkileri (Minami, 2017)

2.6.1 Sürtünme Azaltıcılar (FM)

Motorlarda kullanılan yağların sürtünme kabiliyetleri motor verimini etkileyen sürtünme kayıplarına en fazla etki eden faktördür. Amitler, esterler ve metal sabunlarının değişik uygulamaları ile stribeck eğrisini solunda kalan sınır sürtünmeyi büyük oranda azaltan laboratuvar uygulamalarında %30 gibi bir iyileşme elde edilebilir. Sürtünme katsayısında elde edilen iyileşme aracın yakıt tüketiminde %4 azalma olarak geri dönecektir. Yağa ilave edilen sürtünme azaltıcı katkıları fiziksel adsorbsiyonla yağ filmi dayanımı güçlendirir ve sürtünmeyi düşürürler. Katkı maddesi birbiri ile çalışan iki yüzeyde öncelikle metal yüzeye tutunarak yüzeylerin temasını önler. Yağ filmi ile yüzey girintilerinin yoğun olmadığı alanlarda verimli olurlar. Sınır sürtünme şartlarında sürtünme azaltıcı katkı oranının yükseltilmesiyle sürtünme katsayısı düşürülmekte ve yüksek oranda katkı maddesi ilavesinden düşük sürtünme katsayısına ulaşılmaktadır. Yağın sürtünme kabiliyetini yükselten katkıları; molibden, oksijen, sülfür, nitrojen, bakır ve benzeri maddeleri içeriğinde bulundurur (Müjdeci, 2009).

Şekil 2.14'te tribo materyal olarak çelik için karboksilik asitlerin (oktadekanoik asit, $n\text{-C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ en temel araştırmada en sık kullanılanıdır) etkili

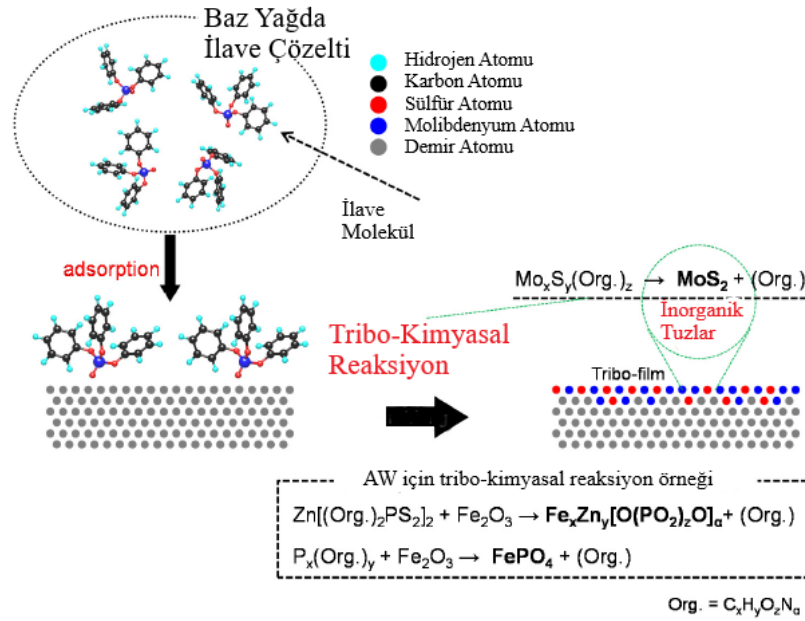
Çalışma mekanizmasını açıklamaktadır. Birbiri ile çalışan yüzeyler oksit tabakaları veya kirleticiler ile kaplanır ve sürtünme sonucunda yüzeyden çıkarılırlar. Bu etki sürtünme azaltıcı katkıların etkileşime girdiği aktif yüzeyler sayesinde gerçekleşir. Sürtünmenin artması ile birlikte moleküle enerji sağlanmış olur. Bunun sonucunda karboksilik asit tuzu olarak adlandırılan organik tuz üretilir ve kimyasal emilim oluşur. Kimyasal adsorpsiyon (kemisorpsiyon) ile fiziksel adsorpsiyon (physisorpsiyon) karşılaştırıldığında kimyasal adsorpsiyon yüzey ile kuvvetli bir etkileşime sahiptir. Bu kuvvetli etkileşim sayesinde yağ filminin sürtünmeye karşı dayanımını arttırır. Molekül içindeki alkil grubu yağlamada önemli bir role sahiptir. Sürtünme ile temas eden yüzeyler adsorbe edilen sürtünme azaltıcı katkıları sayesinde hafifletilebilir. Yönlendirilmiş moleküller arasında çekim kuvvetini sağlayan Wan der Waals bağları oluşturulabilir. Bu bağlar temas noktasına uygulanan yüke karşılık filmin dayanımını arttırır. Asit yarımının yüzey ile etkileşimi kimyasal bir işlem olsa da, molekülün büyük bir kısmı olan hidrokarbon grubunun (genellikle 15-17 karbonlu düz hidrokarbonlar) reaksiyona girmemesi gerekiyor. Sürtünme azaltıcı katkıların oranları 10 mmol/kg olarak hidrokarbonlarda kullanıldığı için konsantrasyonunun, baz sıvılar olarak hidrokarbonlarda genellikle 10 mmol/kg civarında olduğu ve bu nedenle ilave moleküllerin yüksek oranda seyreltilmiş zeltiller olarak tanımlanmasının zor olduğu belirtilmektedir. Bununla birlikte, model FM olarak döteryum etiketli moleküller kullanılarak yüzey kütle spektroskopisi ile açık bir kemisorpsiyon kanıtı elde edildi. Bu, genellikle, alkil grubu reaksiyona girmediği için, araştırmacılar tarafından “yüzeylerdeki FM'leri yakalayanlar” olarak yanlış anlaşılmaktadır. “Yarı fiziksel adsorpsiyon” terimi, bu FM'leri aşağıda açıklanan “tribo-kimyasal tiplerden” ayırmak için uygun olabilir. Bazı yağlayıcı katkı maddeleri, tribo-kimyasal reaksiyonlardan yararlanır (Minami, 2017).



Şekil 2.14: Adsorpsiyon tipi Tribo Geliştiricilerin çalışma mekanizması
(Minami, 2017)

Aşağıdaki tribo-kimyasal tipi geliştiriciler, molibdatın organik tuzlarının çalışma mekanizmasını göstermektedir. İlk adım, ilave moleküllerin, adsorpsiyon tipi geliştiricilere benzer bir mekanizma olan sürtünme yüzeyi ile etkileşimidir. Fark bir sonraki adımda görünür. Tribo-işlem moleküle yeterli enerji sağladığında, molekül inorganik tuzlara ayırır. Reaksiyon birçok kimyasal bağın ayrışmasıyla ilişkili olduğundan, kimyasal emilim işleminden nispeten daha yüksek enerjiye ihtiyaç duyar. İnorganik tuzlar (molibden disülfür) genellikle ısınmaya ve mekanik kaymaya karşı organik tuzlardan daha dayanıklıdır. Kemisorpsiyon mekanizmasının aksine, ilave bir moleküldeki organik kısımlar tribo-film oluşumu sırasında ayrılmıştır. Bu bağlamda, organik kısmın ana rolü, inorganik tuz öncülünü baz sıvılarda (çoğunlukla hidrokarbonlar) çözmektir. Tribo-kimyasal olarak türetilmiş film için karbon birikiminin tribolojik özelliklere bazı katkıları da önerilmiştir. Molibden disülfidler iyi bilinen katı kayganlaştırıcılardır. Bazı yağda çözünebilen molibden tuzları, molibden disülfid öncüleri olarak pratik FM'lerdir. Yumuşak metaller veya karbon allotropları gibi inorganik parçacıklar, sürtünme yüzeyleriyle fiziksel olarak etkileşime girebilir ve böylece tribolojik özellikleri geliştirir. Sadece FM'ler için değil, özelliklerine bağlı olarak AW'ler veya EP'ler için de kullanılabilirler. Sıvı yağlama maddeleri için kararlı dağılımları hazırlanmalıdır. Göreve özgü bazı tribo geliştiriciler geliştirilmiştir. Örneğin, “titreme önleyici ajan”ın önemi bazen aktarma organları sistemleri için belirtilir. Dinamik sürtünmeden daha yüksek statik sürtünme nedeniyle yapışma

kaymasını önler, bu da malzemenin titreşiminin hareketle aynı yönde olmasına neden olur (Minami, 2017).



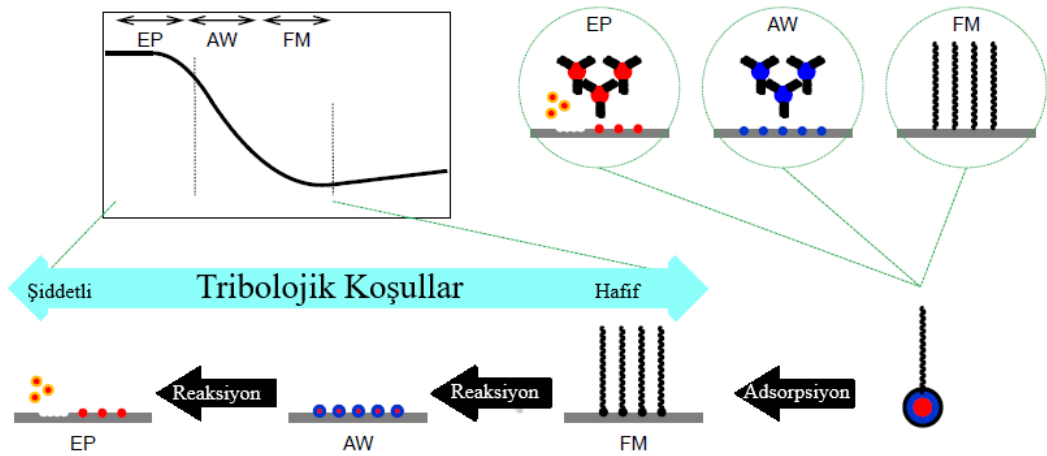
Şekil 2.15: Tribo-Kimyasal Tipi Tribo Geliştiricilerin çalışma mekanizması (Minami, 2017)

2.6.2 Aşınma Azaltıcılar (AW)

Motorun ilk çalıştırılması, alıştırma dönemi ve çalışmasının durması gibi zamanlarda sınır ve karma yağlama çevrimlerinde bazı önemli noktalarda meydana gelen temas hareketleri önlenemez. Motor yağı içerisinde bulunan sülfür ile metal yüzeyinde oluşan oksit filmleri aşınma korunmasını sağlar. Aşınma azaltıcı katkı maddeleri ile motorlarda meydana gelen aşınmalar makul seviyelerde tutulmaktadır. Karışık sürtünme bölgesinde aşınma azaltıcı maddelerin etkisi daha çok görülür. Birbiri ile çalışan yüzeylerde katkılar kısmi metalik temaslarda yüzeye emilirler. Aşınmayı düşürmek için eklenen katkı maddeleri metal yüzey ile etkileşime girip bir tabaka oluşturmakta bu tabaka istenen etkiyi oluşturmaktır. Sülfür ve fosfor ve Çinko aşınma azaltıcıların en etkili olanları arasındadır (Keromest ve diğ. 1998; Minami, 2017; Müjdecı, 2009).

2.6.3 Aşırı Basınç Katkıları (EP)

Aşırı basınç dayanımı arttırmak amacıyla yağlara ilave edilen katkı maddeleri etkisini kimyasal reaksiyon ile göstermekte ve yağların ağır çalışma koşullarında temas yüzeylerinde tutunmayı ve kaynamayı önlemektedir. Bu etkisi ile sadece aşırı basınç dayanımı arttırmak ile kalmayıp sürtünmeyi düşürmekte, aşınma seviyesini kontrol altında tutmakta ve yüzeyde basınç nedeniyle meydana gelebilecek bozulmaların önüne geçmektedir. Aşırı basınç katkılarında fosfor, organik fosfat, sülfür bulunmaktadır. Katkılar normal koşullar altında kimyasal tepkimeye girmeyeceklerinden dolayı 300-1000°C arasında etkilidirler. Bu nedenle etki düşük sıcaklıklar için geçerli olmadığından özellikle ilk çalışma zamanlarında verimli değildirler (Keromest ve diğ. 1998; Minami, 2017; Müjdeci, 2009).



Şekil 2.16: Çok Fonksiyonlu Tribo Geliştirici Modeli (Minami, 2017)

Reolojik Özellik Geliştirici Katkı Maddeleri

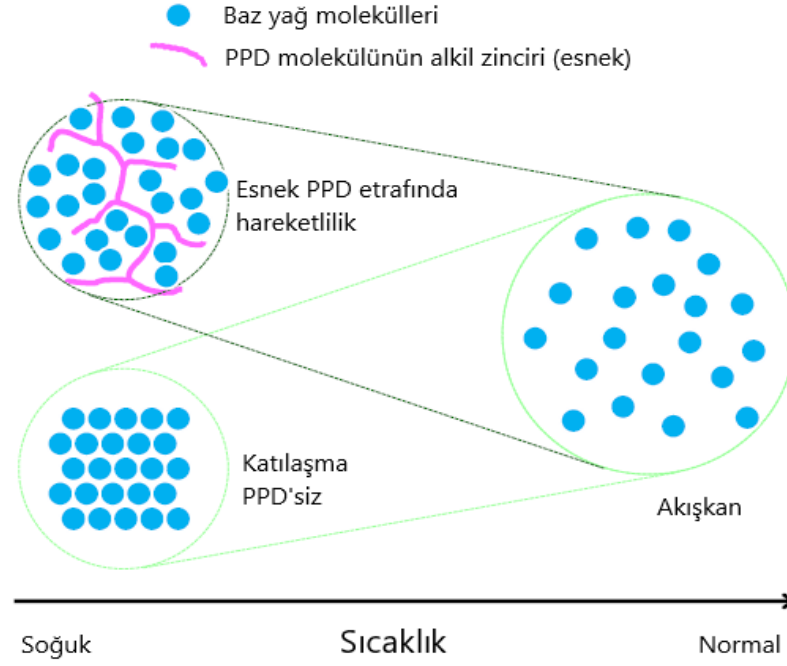
Viskozite, sıvı yağlayıcılar için baz sıvıların birincil özelliğidir. Baz yağın akışkanlığından sorumlu olan maddeler reolojik özellik geliştiricileridir. Esas olarak hidrodinamik koşullar altında, sıvının dökme özelliklerini değiştirerek yağlama performansına katkıda bulunurlar. Fonksiyonlar açısından reo-geliştiriciler, karma ve hidrodinamik yağlama rejimleri arasında “dolaylı” tribo-geliştiriciler olarak sınıflandırılabilir (Minami, 2017).

2.6.4 Akma Noktası Düşürücüler (PPD)

Yağlama yağlarının hem yüksek hem de düşük sıcaklıklarda etkili olması istenir. Yağların yapısındaki temeli olan hidrokarbonlar düşük ortam sıcaklığında katılaşır. Yağın akma eğilimini gösterdiği sıcaklığın en düşük değeri akma noktasıdır. Molekül ağırlığı yüksek olan polimerler yağ içerisinde bulunan vaks kristallerini değiştirerek büyümelerini önler ve bu sayede yağın düşük sıcaklıklarda akışına engel olan kristal yapının ortaya çıkmasını önlemiş olurlar. Akma noktası düşürücü olarak polifümeratlar ve polimetakrilatlar genel olarak kullanılırken yağın donma noktasını 11 – 17°C düşürerek akma noktasını -40°C sıcaklığa indirebilirler (Müjdecı, 2009).

Motor düşük sıcaklıklarda durursa, yağlar donabilir. Bu yağlama arızasına neden olur ve makine elemanlarında ciddi hasarlara neden olur. Ön ısıtma sistemi sorunu önleyebilir, ancak zaman ve enerji harcar. PPD'ler soğuk iklimlerde makinelerde faydalıdır. PPD'ler tipik olarak dallanmış hidrokarbonlardır. Her dallı alkil grubu, yağ molekülleri ile etkileşime girebilir, böylece yağ moleküllerinin birlikte kristalleşmesini önler. Dallanma yapısı nedeniyle, PPD molekülü, kısmi yapıyı harekete geçiren molekülün etrafında serbest hacmi tutabilir. Hem VM hem de PPD, baz yağ molekülünün moleküler kütlesi ile karşılaştırıldığında makro moleküllerdir (polimerler). Bununla birlikte, VM ve PPD'nin işlevleri farklıdır. VM'nin ana işlevi, hareketliliği daha yüksek sıcaklıkta bastırmak ve böylece viskoziteyi arttırmaktır. Öte yandan, dallanmış yapı PPD'ler için faydalıdır çünkü molekül düşük sıcaklıklarda hareketlilikten sorumlu olmak zorundadır. Her iki katkı maddesinin işlevleri de fiziksel bir etkiye sahiptir ve molekül ayrışmadığı sürece değişiklikler sıcaklık değişimi ile tersine çevrilebilir (Minami, 2017).

Şekil 2.17'de akma noktası düşürücülerin etki mekanizması görülmektedir.



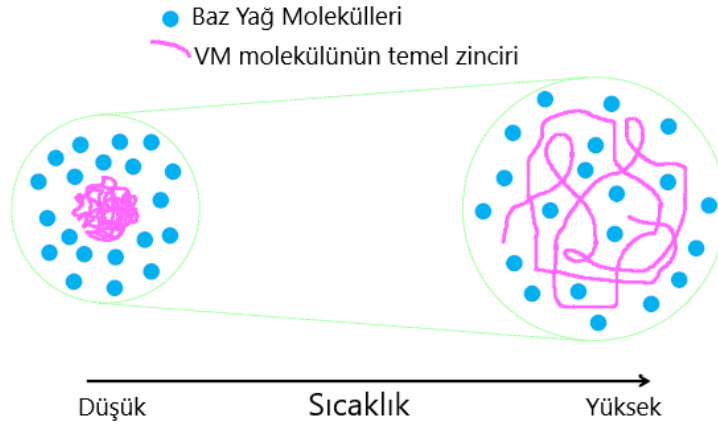
Şekil 2.17: Akma noktası düşürücünün etki mekanizması (Minami, 2017)

2.6.5 Viskozite İndeks Geliştiriciler

Molekül ağırlığı yüksek polimerlerden oluşan uzun zincirli katkılardır. İndeks geliştirici katkılarının kullanılmasındaki temel neden yağın sıcaklık düşük iken gösterdiği viskozitesini çok yüksek sıcaklıklarda da korumaktır. Viskozite indeksini arttırmak için kullanılan katkılar yağın viskozitesindeki değişimin sıcaklıktan çok fazla etkilenmemesini sağlamakta olup yağın viskozite indeks değeri arttıkça yağın sıcaklığa olan duyarlılığı düşer. Katkılar bütül polimerler, hidrojenli kauçuklar, polimerize edilmiş olefinler, selüloz esterlerinden meydana gelirler (Müjdecı ve Kaleli, 2010).

Minami (2017), Viskozite indeks geliştiricilerin günümüzde Viskozite Değiştiriciler (VM) olarak adlandırıldığını ifade etmektedir. VI, uygulamada yağlayıcıları nitelemek için bir mühendislik parametresidir. Yağın özellikleri, baz sıvıların yapısına bağlıdır. Aslında, API Grubu III'ün üretim süreci, hidrokarbonların izomerizasyonunu içerir. VM'nin yapısal özellikleri polimerlerdir. Molekül düşük sıcaklıklarda kompakt bir şekilde paketlenir, yüksek sıcaklıklarda genişler. Büyük hacimli moleküllerin akışa direnç göstermesi beklenir, bu nedenle yüksek viskozite

gösterir. VM'lerin iyileştirilmesiyle yağlayıcı maddenin çalışabileceği sıcaklık aralığı daha da genişletildi (Minami, 2017).



Şekil 2.18: Viskozite İndeks Geliştirici etki mekanizması (Minami, 2017)

Bakım ve Onarıcı Katkı Maddeleri

Triboloji, mekanik enerjiler kayboldukça ısı ve aşınan partiküller üreten entropi artırıcı bir işlemdir. Genellikle yağlayıcıların ve tribo malzemelerin geciktirilmesi ile birlikte bulunur ve bu da “yağlayıcı bozulması” olarak adlandırılan düşük yağlama performanslarına neden olur. Bakım ve onarıcı katkı maddeleri yağlama performansı üzerindeki olumsuz etkileri azaltır. Çoğu durumda, bozulma süreçleri, makine çalışırken sistemde biriken iç ve dış kirleticiler tarafından hızlandırılır. Bakım ve onarıcı katkı maddelerinin işlevi proaktif veya post-aktifdir (Minami, 2017).

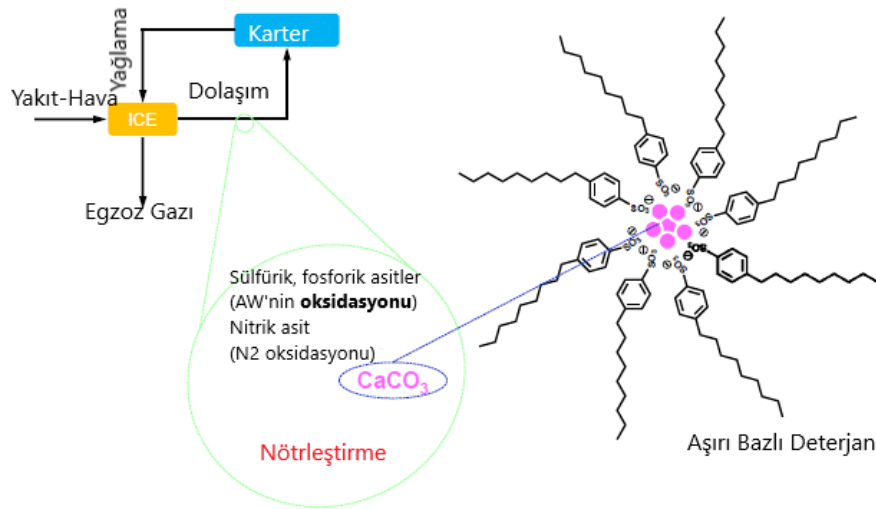
2.6.6 Antioksidanlar (AO)

Yağlar kullanım alanlarına bağlı olarak sistem gereği veya sızdırmazlık sorunları nedeniyle hava ile etkileşime girerler. Bu etkileşim nedeniyle oksidasyon tepkimelerine maruz kalırlar. Oksitlenen yağın viskozitesi artarken karbonlu maddeler ile asit bazlı artıklar ortaya çıkar. Ortaya çıkan atıklar yüzeylerde yalıtıma sebep olurken sıcaklığı atırırlar. Yağın soğutma fonksiyonunun kötüleşmesine neden olan bu durumda piston segman mekanizmasında arızaya ve aşınmaya neden olmaktadır.

Antioksidan katkıları olarak, fosfor, sülfür ve nitrojen muhtevasına sahip organik aminler, hidroksi sülfidler, fenoller, sülfidler, kalay, çinko, baryum kullanılmaktadır. (Müjdeci ve Kaleli, 2010).

2.6.7 Deterjanlar

Bazı tribo-geliştirici katkıları azot, fosfor veya kükürt atomları içerir. Bu bileşiklerin oksidasyonu mineral asitlere ve bunların türevlerine neden olur. Bu asidik bileşikler tribo malzemelere saldırabilir ve/veya ayrıca yağlama yağının bozulmasını destekleyebilir. Deterjanlar bu agresif kimyasalları nötralize eder veya etkisiz hale getirir. İnce kalsiyum karbonat parçacıkları, yüzey aktif cismi yardımı ile hidrokarbonlar içinde dağılabilir. Bu, asidik bileşiklerin oluşması üzerine alkali tuzu serbest bırakır. Yapısal özelliklerinden dolayı “aşırı bazlı deterjan” olarak adlandırılırlar. Baz sayısı ve ortalama partikül büyüklüğü bu katkı maddeleri için kalitenin ölçüsüdür (Minami, 2017).

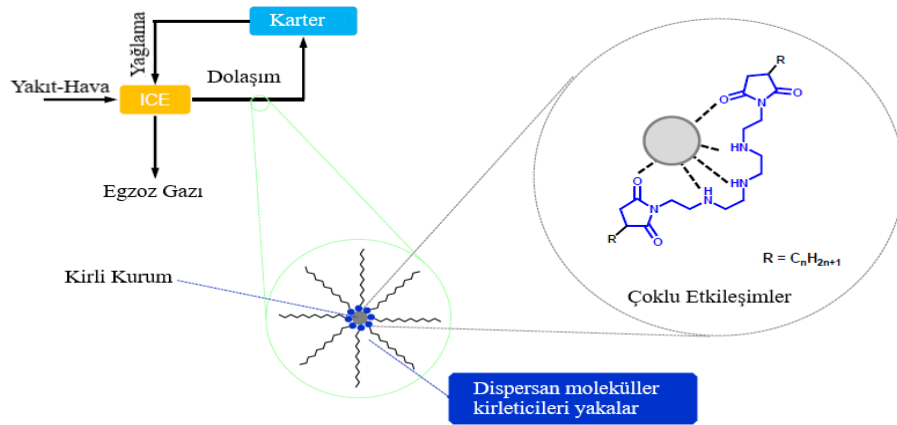


Şekil 2.19: Deterjanların etki mekanizması (Minami, 2017)

2.6.8 Dispersanlar (Dağıtıcılar)

İçten yanmalı motorlarda, yanma sonucunda kurum meydana gelir. Kurum motor yağı içerisine karıştığında aşınma ve sızdırmaya sebep olabilir. Kurum

nedeniyle bozulma daha da ilerlediğinde, organik oksitler polimerlere dönüştürülür. Bu, çözünmeyen hususlar veya tortuların ortaya çıkmasına sebep olur. Metalik malzemelerin aşınma parçacıklarının aksine, bu oligomerler ve polimerler jel benzeridir ve kolayca süzülmezler. Bir dağıtıcı molekül bu organik kirletici maddelerle etkileşime girebilir ve sıvı fazda dağılabilir. Dağıtıcıların birincil işlevi deterjanla benzer olan yüzey aktif maddedir. Bununla birlikte, dağıtıcı molekül, organik kirleticileri yeterince yakalamak ve sıvı içinde dağınık tutmak için daha fazla polar gruba sahiptir (Minami, 2017).

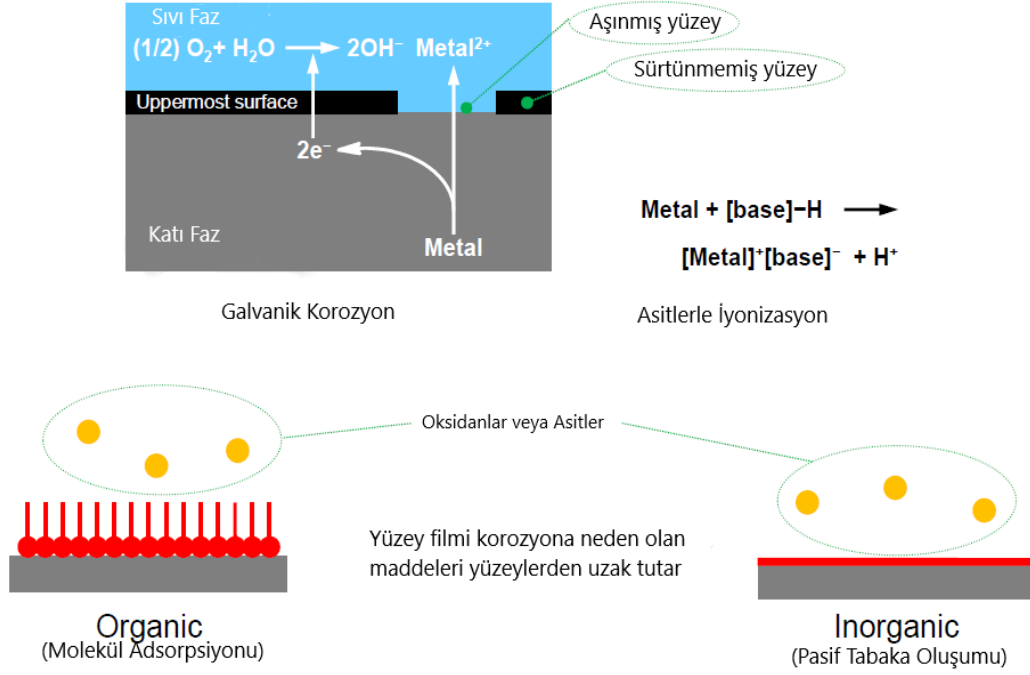


Şekil 2.20: Dispersanların çalışma mekanizması (Minami, 2017)

2.6.9 Pas Ve Korozyon Önleyiciler

Korozyon ve pas, metalik malzemelerin elektrokimyasal işlemlerle oksidatif bir bozulması olarak tanımlanır. Galvanik korozyon işlemi yağlama sistemlerinde temsili korozyon işlemidir. Kısaca mekanizma Şekil 2.21'deki gibidir. Metal yüzeyler genellikle bir oksit tabakası ile kaplanır. Tribolojik süreç oksiti uzaklaştırır ve metal yüzeyleri açığa çıkarır. Metal ve metal oksit arasındaki elektrik potansiyeli farklıdır. Yüzeyler arasında iletken bir sıvı bulunduğunda, Galvanik hücre oluşur. Metal atomu elektronları serbest bırakır ve oksidasyon sayısını artırarak metal iyonu oluşturur (bu işlem metalin oksidasyonudur). Metalden serbest kalan elektron sistemdeki bir oksijen molekülünü aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi azaltır. Baz sıvılar (hidrokarbonlar) yalıtıcıdır, ancak bazı katkı maddeleri yağlayıcının elektrik iletkenliğini artırabilir. Korozyonun bir diğer nedeni, metalin oksijensiz oluşan asidik bileşiklerle

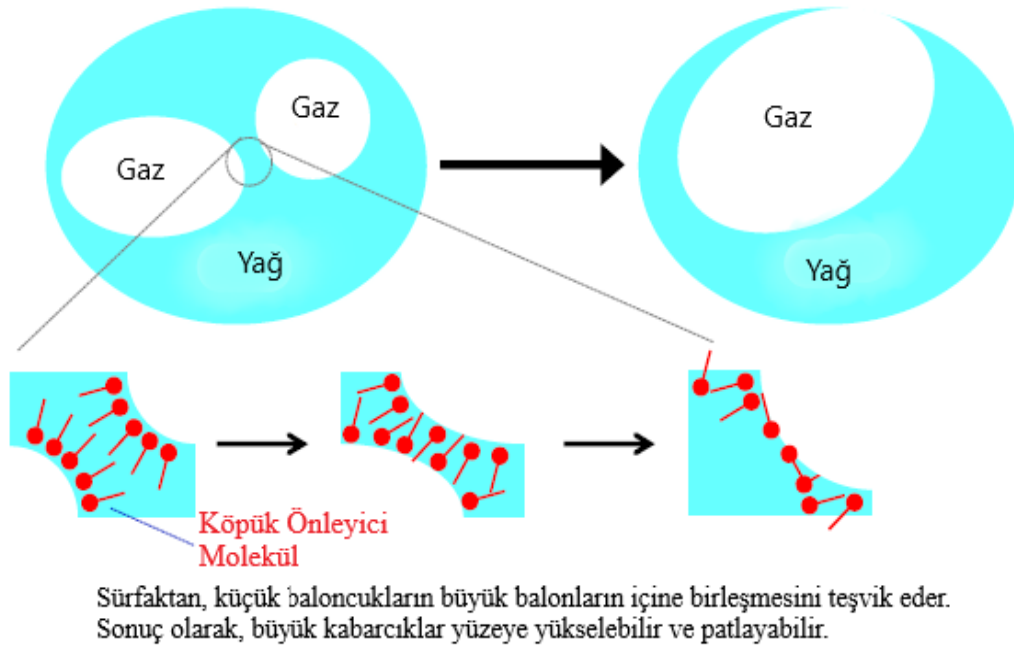
iyonlaşmasıdır. Makine duraklatılırken her iki korozyon mekanizması da statik koşullar altında gerçekleşebilir. Korozyon önleyiciler metal yüzeylerde koruyucu bir tabaka sağlar. Koruma katmanları, FM'lere benzer olan organik (adsorpsiyon tipi, organik katmanları sağlayan) veya inorganik (reaksiyon türü, pasif katmanları sağlayan) olabilir. FM'lerin aksine, filmleri korozyondan koruyanlar mekanik sağlamlığa ihtiyaç duymazlar (Minami, 2017).



Şekil 2.21: Metal korozyonu ve Korozyon Önleyici çalışma mekanizması
(Minami, 2017)

2.6.10 Köpük Önleyiciler

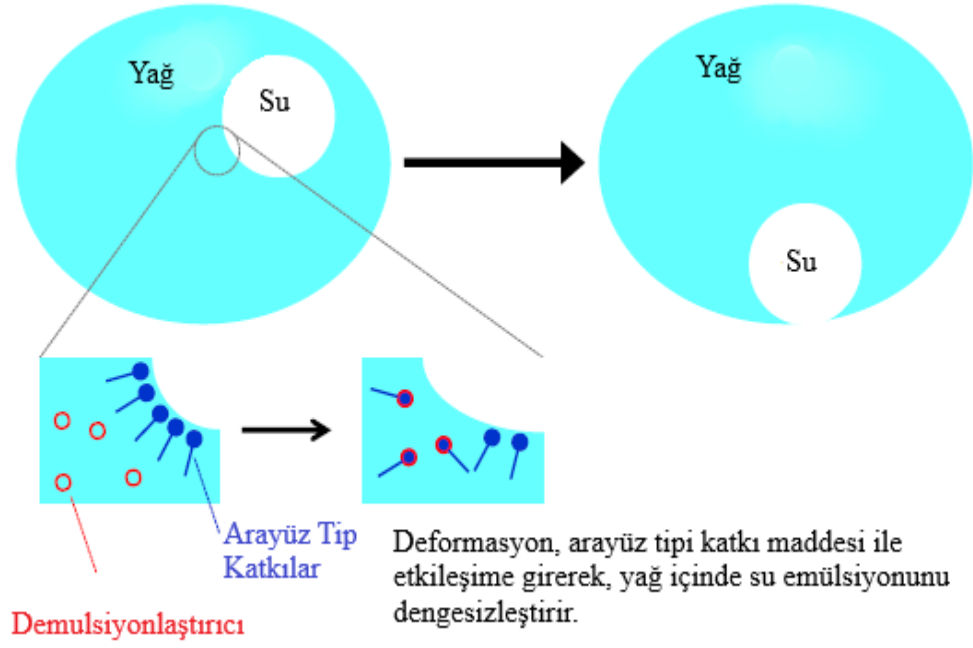
Yağlama maddeleri çalışma ve dolaşım sırasında hava alabilir. Bu, kayganlaştırıcılarda bir hava kabarcığı geliştirir ve viskozitenin düşmesine neden olur. Fiziksel değişikliklere ek olarak, baz yağların otoksidasyonu kolaylaştırılmıştır, çünkü gaz-sıvı ara yüzünün geniş bir alanı boyunca yağ-oksijen teması olasılığı artırılmaktadır. Bu bakımdan görünmez küçük kabarcıklar problemlidir. Köpük önleyiciler, gaz sıvı arayüzleri arasında etkileşime girebilen yüzey aktif cisminin benzer moleküllerden oluşur. İşlev, küçük kabarcıkları büyük bir tanede birleştirerek moleküllü sıvı fazdan serbest bırakmaya yardımcı olmaktır (Minami, 2017).



Şekil 2.22: Köpük Önleyicilerin çalışma mekanizması (Minami, 2017)

2.6.11 Demülsiyonlaştırıcılar (Emülsiyon Kırma Ajanları)

Su hemen hemen tüm yağlayıcılar için her yerde bulunan bir kirleticidir. Bu nedenle, yağlama sisteminde su tahliye sistemleri varsa, yağlama sistemleri daha verimli çalışırlar. Bu katkı maddeleri yüzey aktif madde niteliğine az çok sahiptir. Bu nedenle su, bu katkı maddelerinin yardımıyla yağ içinde su içinde yağ emülsiyonu şeklinde yayılabilir. Demülsifiye edici maddeler, Şekil 2.23'te gösterilen yüzey aktif madde tipi katkı maddelerinin etkisiz hale getirilmesiyle sudaki yağ emülsiyonunu kırarlar. Demülsifleştirici ve köpük önleyicilerin görevi, kirletici etkiye sahip gaz veya sıvıyı motor yağından serbest bırakmak ve olumsuz etkilerinden korumaktır. Çalışma fonksiyonları ise ters şekilde olup, gaz ve sıvı arabirimini köpük önleyiciler harekete geçirirken su veya arabirimini demülsifiye ediciler devre dışı bırakır (Minami, 2017).



Şekil 2.23: Demülsiyonlaştırıcıların çalışma mekanizması (Minami, 2017)

Çok Fonksiyonlu Katkı Maddeleri

Bazı katkı maddeleri kategoriler arası fonksiyonlara sahiptir, yani birden fazla alanda etkileşim gösterirler (tribo-iyileştirme, reo-iyileştirme ve sürdürme). ZnDTP'ler (Çinko dialkilditiofosfat) alkil grubunun yapısına bağlı olarak sürtünme azaltıcı, aşınma azaltıcı, antioksidanlar ve korozyon önleyici katkıları en çok kullanılan yağlayıcı katkı maddeleridir. Buradan ZnDTP'lerin hem bakımıcılar hem de tribo geliştirici olarak görev üstlendikleri anlamına gelir (Keromest ve diğ. 1998; Minami, 2017).

Yardımcı Katkı Maddeleri

Yardımcı katkı maddeleri yağlayıcıların tamamına katılmayıp, yağın kullanılacağı alana veya işe göre özel olarak eklenen katkı maddeleridir.

2.6.12 İletkenlik İyileştirici Katkılar

Yaygın olarak kullanılmayan bu katkı maddeleri özel durumlarda tercih edilirler. İletkenlik akışkanlar için kullanıldıkları alanlara göre önem taşımaktadır. Motorlarda kullanılan yağlar düşük ısı iletkenliğine sahip olduklarından bu durum soğutma için avantaj olsa da yağ içerisinde bulunan hidrokarbonların genel diğer kabiliyetleri de dikkate alınmalıdır. Yağların iletkenliğini etkileyen önemli faktör içerisindeki inorganik parçacıkların dağılmasıdır.

2.6.13 Antibiyotikler

İçeriğinde su miktarı yüksek olan sıvılar, hidrolik sıvılar veya soğutma ve yağlama amacıyla metal işleme faaliyetlerinde kullanılmaktadır. Bu sıvılar içeriklerindeki su nedeniyle depolama şartlarında biyolojik olarak bozulmaya uğrayabilirler. Bu sıvılara ilave edilecek antibiyotik katkı maddeleri biyolojik bozulmanın önüne geçebilir.

2.6.14 Renklendiriciler

Bu bileşen yağlama performansları için gerekli değildir, ancak bazen yağlama sisteminin kontrolü için gereklidir. Özel renklendirme, değiştirme veya yenileme işlemleri sırasında yanlış yağlayıcı karıştırılmasını önleyerek hataların önüne geçilebilir. Bazı uygulamalarda, sıvının renklendirilmesiyle sızıntının olduğu nokta kolayca bulunabilir.

3. TEST METODLARI

3.1 Sürtünme Katsayısı Ölçüm Yöntemleri

Makine ve motor parçalarında birlikte çalışan parçaların yüzeyleri arasında meydana gelen sürtünmeye etki eden sürtünme katsayısını ölçebilmek için çalışan yüzeylerin simüle edildiği tribometreler kullanılır. Mekanizmadaki yüzeylerin çalışma şekline bağlı olarak simüle edilen bu tribometreler ile öncelikle sürtünme katsayısı ve aşınma miktarları tespit edilebilir. Yüzeylerin temas şekillerine göre kullanılan sürtünme katsayısı ölçüm yöntemleri aşağıda anlatılmaktadır.

3.1.1 Disk Üstünde Pim (Pin On Disc)

Disk üstünde pim tribometresinde, dönen bir disk ve onun üzerine sabit olarak temas ettirilen bir pim mekanizması vardır. Disk üstünde pim tribometresi ile birbiri ile çalışan yüzeylerin kuru sürtünmeleri veya yağlayıcı malzemenin etkisi ölçülebilir. Mekanizmada disk istenen hız ile döndürülürken, pim yüzeyindeki temas basıncının değiştirilmesi amacıyla pimi tutan kola istenen oranda kuvvet uygulanabilir. Kuvvet uygulama işlemi daha önce ağırlığı belirlenmiş kuvvet ağırlıkları ile mekanik olarak veya hidrolik-pnömatik mekanizma ile uygulanabilir. Pim üzerinde uygulanan kuvvetin ne kadarının sürtünme kuvvetine dönüştüğünü ölçmek için load cell tarzı sensörler kullanılarak sürtünme kuvveti ölçümü yapılır ve bir program vasıtasıyla ölçüm sonuç değerleri bilgisayarlara aktararak sürekli kaydedilir. Ölçülen sürtünme kuvveti Bölüm 2’de verilen 2.2 denklemi kullanılarak sürtünme katsayısı hesaplanır (ASTM, 2011).

Test mekanizmasında aşağıdaki parametrelerde değişik koşullar sağlanabilir;

- **Yük:** Temas noktasındaki yüzey basıncını değiştirmek için pimi tutan kol üzerine uygulanan normal kuvvet (N)
- **Hız:** Temas eden yüzeyin çizgisel hızı (m/s)
- **Mesafe:** Test süresi boyunca pimin kaydığı toplam mesafe (m)

- **Sıcaklık:** Test ortamında yağlayıcının veya sürtünen yüzeylerin sıcaklıkları (°C)
- **Ortam:** Testin yapıldığı ortam koşulları (laboratuvar havası, bağıl nem, argon, yağlayıcı vb.).

Disk üstünde pim tribometresinde kullanılan pim silindirik veya küre şeklinde olabilir. Testler ASTM G99 standardına göre yapılmaktadır.

3.1.2 Disk Üstünde Bilye (Ball On Disc)

Disk üstünde pim mekanizması ile aynı dizayna sahip olup tüm parametre ve test koşulları disk üstünde bilye içinde geçerlidir. Disk üstünde pim testinden tek farkı disk yüzeyine temas ettirilen parçanın pim şeklinde çubuk olmayıp bilye kullanılmasıdır. Pim ile geniş bir temas yüzeyi sağlanırken bilye ile noktasal temas sağlanmaktadır. Testler ASTM G99 standardına göre yapılmaktadır.

Disk üstünde pim ile disk üstünde bilye testleri aynı mekanizma üzerinde sadece pim ve bilye tutucuları değiştirilerek yapılabilir.

3.1.3 Plaka Üzerinde Pim (Pin On Plate)

Pistonlu kaymayı incelemek için dizayn edilmiş olan bu test cihazlarında yüksek frekanslı kayma sırasında yağlayıcı maddelerin özellikleri test edilmektedir. Pin on plate veya pin on flat şeklinde isimlendirilebilir. Piston-segman ve silindir çalışma koşullarının uyarlanabileceği mekanizmada üst pim sabit alt plaka hareketli veya alt plaka sabit üst pim hareketli şeklinde iki farklı test gerçekleştirilebilir. Alt plaka sabit olması halinde, alt plaka yağa daldırılmış ve sabitlenmiş halde iken pimin bağlı olduğu kol krank-biyel mekanizmasına benzer bir düzenek ile ileri ve geri yönde aynı eksen üzerinde hareket ettirilir. Bu sayede pim ile plaka malzemeleri arasındaki sürtünmeyi azaltmak için kullanılan yağlayıcının etkisi gözlemlenebilir. Pim üzerine istenen oranda normal yük uygulanarak, farklı yük, sıcaklık ve hız koşullarında testler gerçekleştirilebilir (Abere, 2017).

Test sırasında sensörler aracılığıyla ölçülen sürtünme kuvveti bir bilgisayar yazılımı ile kayıt altına alınır ve sürtünme kuvveti normal kuvvete oranlanarak sürtünme katsayısındaki değişim gözlemlenebilir. Sistem üzerinde yapılacak değişiklik ile alt zemin bir silindire ve üzerinde hareket eden pim de bir segman bağlantısına dönüştürülerek içten yanmalı motorlardaki silindir gömleği ile segman arasındaki çalışma mekanizmasına uyarlanabilir.

3.1.4 Plaka Üzerinde Bilye (Ball On Plate)

Plaka üzerinde pim düzeneği ile aynı mekanizmada çalışmakta olup sadece üst mekanizmada yapılan değişiklik ile pim yerine bilye kullanılarak temas alanı sürtünmesi yerine noktasal sürtünme ile test yapılabilir.

Plaka üzerinde pim ile plaka üzerinde bilye testleri aynı mekanizma üzerinde sadece bilye ve pim tutucusu değiştirilerek yapılabilir.

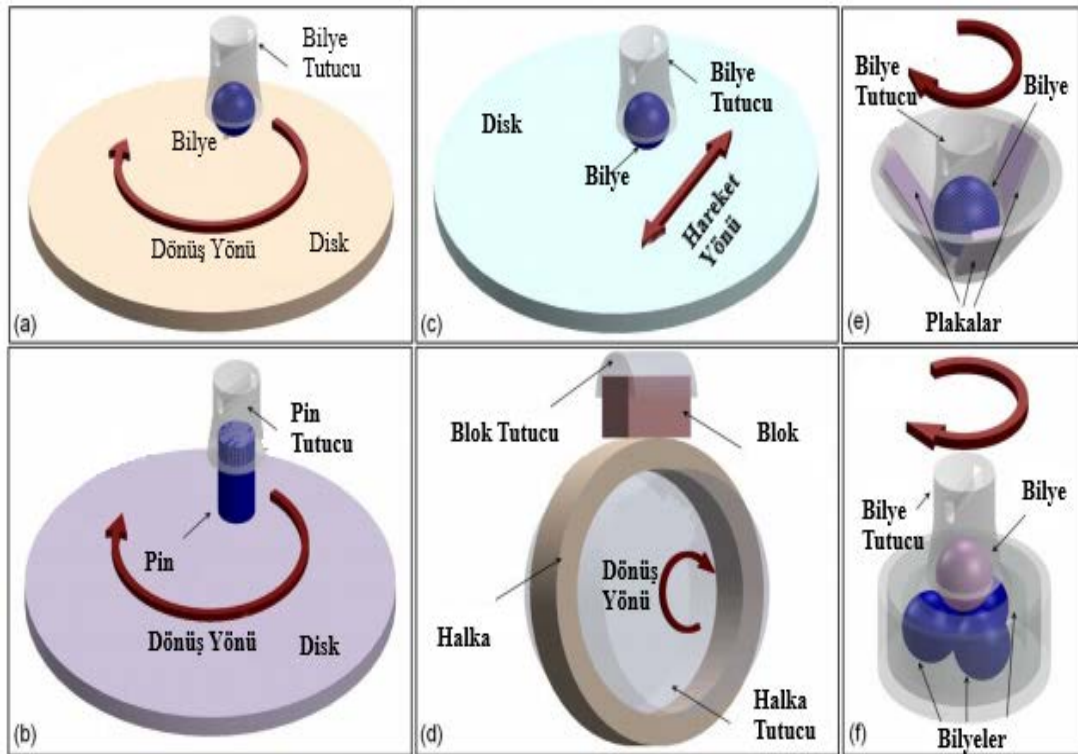
3.1.5 Üç Plaka Üstünde Bilye (Ball On Three Plates)

Sabitlenmiş üç adet plaka üzerinde döndürülen bilye testinde; konik şeklinde bir yüzeye eşit ölçülerde hazırlanmış üç adet plaka sabitlenir ve bunların üzerinde bir tutucu kol vasıtasıyla bilye getirilerek döndürülür, bu sayede plakalar üzerinde oluşan sürtünme sonucunda meydana gelen aşınma kontrol edilebilir. Bu test mekanizmasında aşındırılan malzeme sabit tutulan plakalar olup aşındırıcı malzeme bilyedir. Test işlemi sırasında plakalar bilye ile temas noktasına kadar yağa daldırılabilir veya kuru sürtünmeye maruz bırakılabilirler (A. Xu ve diğ. 2017).

Test düzeneğinde bilye üzerine uygulanan değiştirilebilir normal yük ile birlikte, sıcaklık, hız ve ortam gibi değişik parametrelerde test yapılabilir.

3.1.6 Dört Bilye (Four Ball)

Dört bilye testi temelde bir aşındırma testi olmayıp yağlayıcının özelliklerinin test edildiği bir konfigürasyondur. Bu test düzeneğinde karşılıklı çalışan parçaların etkileşimleri yerine arada kullanılan yağlayıcının özellikleri ölçüleceğinden bilyeler için genellikle AISI E 52100 çeliğinden yapılmış olup, 12.7 mm çapında ve yüzey parlatma işlemi yapıldıktan sonra kullanılmaktadır. Test işlemi için üç alt bilye sabit tutulurken üstte bulunan bilye belirlenen hızda döndürülür. Üst bilye tutucusuna normal kuvvet olarak 147 veya 392 N kuvvet uygulanır ve test 75°C’de 60 dakikalık sürede gerçekleştirilir. Sürtünme katsayısı sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranıyla tespit edilirken, aşınma oranı için üç bilyede meydana gelen aşınmanın ortalaması alınır (Budinski, 2007).



Şekil 3.1: Farklı tipteki tribometrelerin şematik gösterimi: a) Disk üstünde bilye, b) disk üstünde pim, c) Plaka üzerinde bilye, d) Halka üzerinde blok, e) Üç plaka üzerinde bilye, F) Dört bilye (Paul ve diğ. 2019)

3.1.7 Halka Üstünde Blok (Block On Ring)

Halka üstünde blok testi, belirlenen bir kuvvet ile bir test halkasına test bloğunun bastırılması ile yapılır. Belirli bir hız ile dönen halka üzerinde sabit tutulan diskin temas yüzeylerinde oluşan sürtünme kuvveti ile uygulanan normal kuvvetin oranında sürtünme katsayısı tespit edilir. Halka üstünde blok konfigürasyonu genellikle muylu ve yatakları arasındaki sürtünme katsayısı ve aşınmayı ölçmek için kullanılır. Sıcaklık, yük, hız ve çalışma ortamı gibi değiştirilebilen parametrelerde testler yapılabilir (Paul ve diğ. 2019).

3.2 İçten Yanmalı Motorlarda Sürtünme Ölçüm Yöntemleri

3.2.1 İçten Yanmalı Motorlarda Performans Ölçümleri

Richardson (2000) yaptığı çalışmada güç silindirisinin sürtünmesini genel motor performansı ile değerlendirileceğini ifade etmiştir. Bu nedenle motor performans ölçümü için iki yöntem kullanılabileceğini bunlardan ilkinin; FMEP veya P-V diyagramı olduğunu, ikincisinin ise Fren spesifik yakıt tüketimi olduğunu (BSFC – Brake Specific Fuel Consumption) ifade etmiştir (Richardson, 2000).

FMEP veya P-V diyagramı

Silindir basıncı ve yanma ile yapılan toplam işi hesaplamak, Basınç – Hacim (P-V) diyagramının integrali alınarak mümkündür. Bu değer indike ortalama efektif basıncı (IMEP - Indicated Mean Effective Pressure) verecektir (Richardson, 2000).

$$IMEP = \int_0^{360^\circ} \left(\frac{P}{V} \right) dV \quad (3.1)$$

IMEP: İndike ortalama efektif basınç

V: Silindir hacmi

P: Silindir içi maksimum basıncı

i: Çevrim başına devir sayısı

n: Motor devri

z: Silindir sayısı

Dört zamanlı bir motorda P-V diyagramını iki alt integrale ayırarak; Çevrimin giriş ve çıkış işlemlerinin integrali alındığında Pompalama Ortalama Efektif Basıncını (PMEP – Pumping Mean Effective Pressure), PMEP egzoz gazlarının silindirden atılması ve havanın alınması amacıyla yapılan iştir. Sıkıştırma hemen sonrasında yanma ve genleşme zamanlarının integrali de GIMEP (Gross Indicated Mean Effective Pressure) olarak adlandırılan Brüt İndike Ortalama Efektif Basınç işini verir. Motor tarafından ne kadar enerjinin güç aktarma organlarına iletiildiğinin göstergesi Fren ortalama İndike Basıncı (BMEP – Brake Mean Effective Pressure)'dır .

$$BMEP = \left(\frac{BP * i}{V * z * n} \right) \quad (3.2)$$

BMEP: Fren ortalama efektif basınç

i: Çevrim başına devir sayısı

BP: Fren gücü

V: Motor hacmi

n: Motor devri

z: Silindir sayısı

BMEP aynı zamanda motor çıkış miline bağlanan dinamometre ile ölçülebilir.

FMEP (Friction Mean Effective Pressure) Ortalama Sürtünme Efektif Basıncı olan adlandırılan Mekanik sürtünme enerjisi kaybıdır (Knauder ve diğ. 2019).

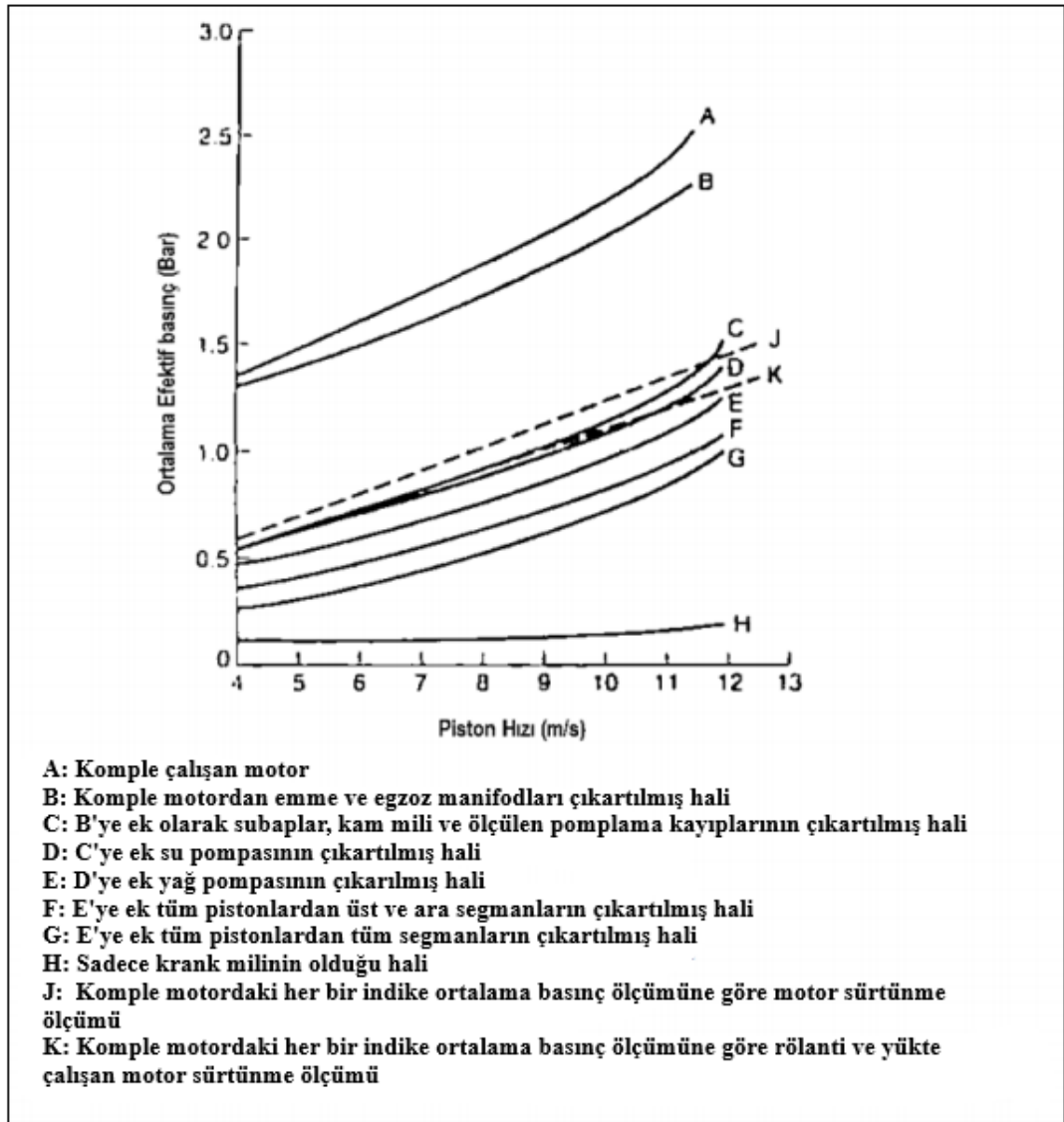
$$FMEP = IMEP - BMEP \quad (3.3)$$

Fren Spesifik Yakıt Tüketimi (BSFC)

Güç silindiri sürtünmesindeki bir değişikliği belirlemek için Fren Spesifik Yakıt Tüketimi ölçümlerini silindir basıncı verileri olmadığında alternatif yöntem olarak kullanmak mümkündür. Fren Spesifik Yakıt Tüketiminin iki ayrı ölçümü arasındaki fark, sürtünme değişikliklerini ölçmek için kullanılabilir. Bununla birlikte, güç silindiri sürtünme katkısı motorun güç çıkışına göre çok düşüktür, bu ölçümler zor olabilir. Sonuçların doğru değerlendirilebilmesi için hafif koşulları altında sürtünme azaltma incelemelerini yapmak gerekebilir. Yüksek yüklerde inceleme yapılmak istendiği takdirde sonuçların veri analiz yöntemleri ile birlikte değerlendirilmesi ve test sayısının artırılması gerekebilir (Richardson, 2000).

3.2.2 Motoring Sürtünme Ölçüm Testi

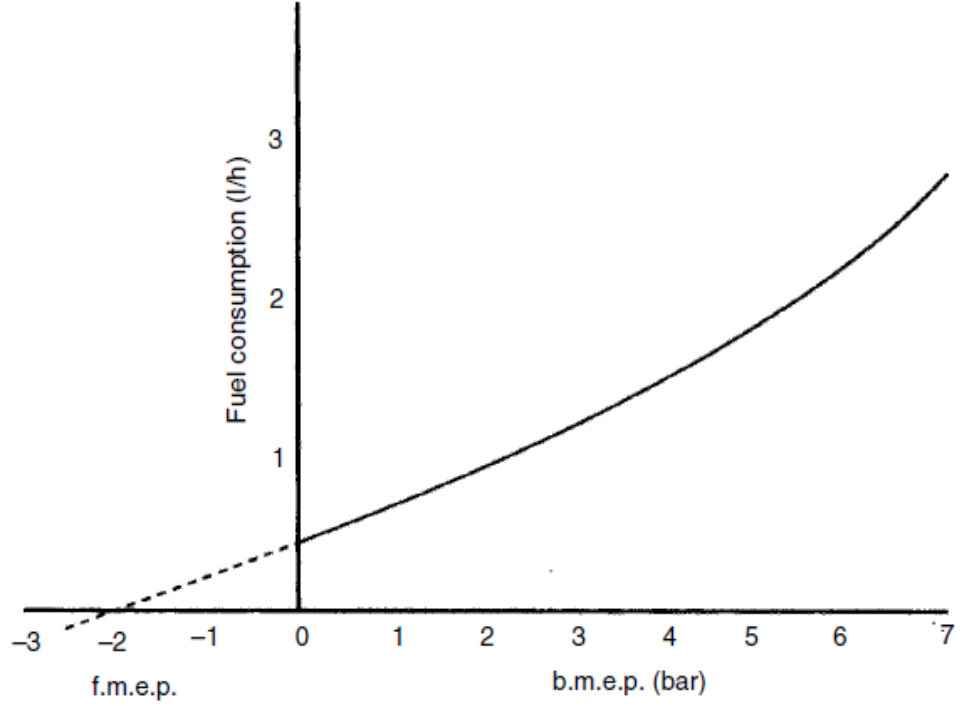
Motoring testi uygulama kolaylığı açısından en çok tercih edilen testler arasındadır. Testin ilk adımı olarak dinamometre ile tahrik edilen motorun sabit bir devirde çalışabilmesi için gereken tork ölçülür ve kaydedilir. Motor silindir kapağı olmadan tahrik edilir ve silindir içerisinde meydana gelen sürtünme ölçülür. Daha sonra segmanlar teker teker sökülür ve her segman sökümünden sonra motor tahrik edilerek segmanların sürtünmeye etkileri belirlenir. Her bir işlem sonrasında torktaki değişim sökülen parçaların tek tek sürtünmeye etkisini ifade eder. Testin tamamlanması için piston ve biyelin sürtünmeye etkisini incelemek amacıyla piston ve biyel sökülerek motor dinamometre ile döndürülür. Piston ve biyelin torktaki değişim ile sürtünmeye etkisini ifade ederken bu etkinin biyel ve piston için ayrı ayrı ölçülmesi mümkün olmayıp bu ayrımı yapabilmek için analitik yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Bu testin zayıf yönleri; yanma sonucunda oluşan silindir içi basınç etkisinin dikkate alınmaması, testin motorun çalışma sıcaklığı koşullarında yapılamaması, her bir parçanın etkisi ayrı ayrı belirlenirken birbirini etkileyen parçaların bu etkilerinin ölçülememesi şeklindedir (Aydın, 2015; Kılıç, 2007; Kovach ve diğ. 1982).



Şekil 3.2: Motoring örnek grafiği (Ferguson ve Kirkpatrick, 2001)

3.2.3 Willians Çizgi Yöntemi

Dizel motorlar için doğrudan sürüş testinin yaklaşık bir eşdeğeri Willans çizgi yöntemidir. Sabit bir hızda elde edilen fren çıkışına karşı yakıt tüketiminin bir grafiği çizilir. Çizilen eğride aşağıdaki şekildeki gibi ekstrapolasyonla eğri ikinci bölgeye doğru uzatılır ve X eksenine ile kesişmesi sağlanır. X eksenine ile kesiştiği nokta sürtünme kayıplarını ifade eder (Martyr ve Plint, 2007).



Şekil 3.3: Willans Çizgi örneği – dizel motor (Martyr ve Plint, 2007)

3.2.4 Morse Yöntemi

Çok silindirli motorlarda uygulanan bu yöntemde motor sabit hızda çalıştırılırken fren gücü bir dinamometre ile ölçülür ve değerler kaydedilir. Motor çalışması devam ederken sırasıyla her bir silindirin ateşlemesi veya yakıt enjeksiyonu kesilerek motor tekrar aynı devre çıkartılır ve güç ölçülür. İki ölçüm arasındaki fark ateşlemesi kesilen silindire ait gücü verir. Bu fark o silindirde yanma ve pompalama kayıplarının olmamasından kaynaklanır. Bu işlem tüm silindirler için tekrarlanır ve silindirlere ait güçler bulunur. Bu sayede silindirlerde piston segman gruplarının sürtünmeleri hakkında fikir sahibi olunabilir (Richardson, 2000).

4. MATERYAL VE METOD

4.1 Motor Yağı

Kullanılan yağ Petrol Ofisi firmasından tedarik edilen Petrol Ofisi Maximus LA 10W-40 tam sentetik ticari satışı yapılan motor yağıdır. Tablo 4-1’de yağın özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 4.1: Petrol Ofisi Maximus LA 10W-40 yağının özellikleri

Viskozite Sınıfı (SAE)		10W-40
Akma Noktası, °C	ASTM D- 97	-33
Yoğunluk, @ 15°C kg/m ³	ASTM D-4052	0.86
T.B.N., mgKOH/g	ASTM D-2896	10.5
COC, Parlama Noktası, °C	ASTM D-92	240
Viskozite, 40°C, mm ² /s	ASTM D-445	97.6
Viskozite, 100°C, mm ² /s		14.7
Sülfatlı Kül, Ağırlık%	ASTM D-874	1.2
Vİ	ASTM D-2270	156

4.2 Nanopartikül

Nanografi firmasından temin edilen 18-28 nm boyut aralığındaki Fe₃O₄ nanopartikülleri motor yağında iyi karıştırılabilmesi ve çökelme oluşmaması için öncelikle oleik asit ile yüzey modifikasyonu yapılmıştır. İlk olarak Fe₃O₄ nanopartikülleri, ağırlıkça %20 oleik asitli sulu bir çözeltiye ilave edilerek yüksek devirli bir karıştırıcıda 40 dakika boyunca 1000 d/d’da karıştırılmıştır. Modifiye edilmiş Fe₃O₄ nanopartikülleri daha sonra beş kez damıtılmış su ve etanol ile yıkandı. Son olarak, modifiye edilmiş Fe₃O₄ nanopartikülleri 24 saat boyunca 50°C’de vakumlu bir fırında kurutuldu. İşlem sonrasında Fe₃O₄ nanopartiküllerinin görüntüsü aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.1: Fe₃O₄ Nanopartiküllerinin yüzey modifikasyonu sonrası görüntüsü

Tedarik edilen Fe₃O₄ nanopartiküllerinin teknik özellikleri tablo 4-2'deki gibidir;

Tablo 4.2: Fe₃O₄ Nanopartiküllerinin teknik özellikleri

Safılık (%)	98.45+
Kitle Yoğunluğu (g/cm ³)	0.9
Ortalama Parçacık Boyutu (nm)	18-28
Renk	koyu kahverengi
Biçim	küresel
Gerçek Yoğunluk (g/cm ³)	5.1
Özgül Yüzey Alanı (m ² /g)	>55

Tablo 4.3: Fe₃O₄ Nanopartiküllerinin element analizi

Ca	K	Cr	SiO ₂	Mn
0.023	0.0012	0.0016	0.14	0.086

4.3 Nanopartikül Katkılı Yağın Hazırlanması

10W-40 motor yağı ile Fe₃O₄ nanopartikülleri baz yağ ve 5 ayrı oranda nanopartikül ile karışım hazırlanmıştır. Test işlemleri için 400 mL baz yağ içerisine

0.4, 2, 4, 6 ve 8 gram Fe_3O_4 nanopartikülleri 0.1 mg hassasiyette hassas terazi ile tartılarak eklenmiştir.



Şekil 4.2: Ölçümlerde kullanılan 0.1 mg hassasiyetli hassas terazi

Tartım işleminden sonra her karışım oranı için hazırlanan 400 mL yağ ve Fe_3O_4 nanopartikülleri ultrasonik karıştırıcı ile 1 saat boyunca karıştırılmıştır.



Şekil 4.3: Soğutucu ünite

Karıştırma işlemi sırasında karışım yağının aşırı ısınmaya karşı korumak için soğutucu ünite kullanılmıştır. Soğutucu ünite yağ karışımının çevresinde 4°C'de saf su dolaştırılarak karışımın yüksek sıcaklıklara çıkmasını önlemiştir.



Şekil 4.4: İnfrared sıcaklık ölçüm cihazı

Ultrasonik karıştırıcı ile karıştırma işlemi sırasında karışım yağının sıcaklığı sürekli takip edilerek hem karışım yağının hem de ultrasonik karıştırıcının probunun aşırı ısınmaya karşı korumak için sürekli sıcaklık ölçümü yapılarak sıcaklığın yükseldiği durumlarda ultrasonik karıştırıcı kapatılarak cihazın ve karışım yağının soğuması sağlanmıştır.



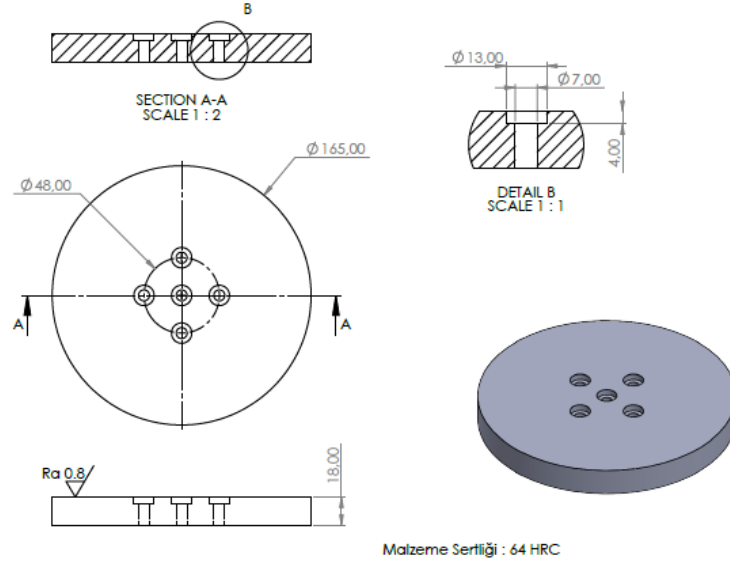
Şekil 4.5: Ultrasonik karıştırıcı

Karıştırma işlemi için Hielscher UP400S tipi ultrasonik karıştırıcı kullanılmıştır. Karıştırma işleminde çevrim ayarı 1 konumunda ve genlik değeri %70 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.6: Ultrasonik karıştırıcı ve soğutucu ünite

4.4 Disk Üstünde Bilye Test Düzeneği



Şekil 4.7: Disk üstünde bilye testinde kullanılacak olan diskin imalat resmi

Disk üstünde bilye testinde kullanılacak olan disk yukarıdaki çizimde görüldüğü haliyle 100Cr6 çeliğinden yaptırılmıştır. Disk tornada işlendikten sonra

yüzey kalitesi 08 kalitesinde taşlanmış ve daha sonra ısıtıl işleminden geçirilerek sertliği 64 HRC'ye çıkartılmıştır. 100Cr6 çeliğinin element analizi aşağıdaki tablodaki gibidir;

Tablo 4.4: 100Cr6 Çeliğinin element analizi

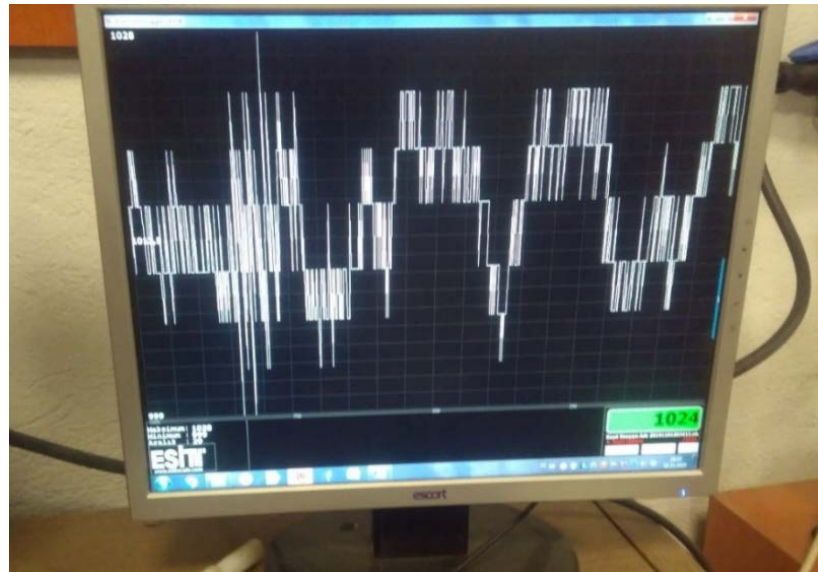
C	Cr	Si	Mn	Smax	Pmax	Mo	Sertlik
0.93-1.05	1.35-1.60	0.15-0.35	0.25-0.45	0.015	0.025	≤0.1	64 HRC

Disk üzerinde çalışacak çelik bilyeleri AISI 420-B çeliğinden 8 mm çapında tedarik edilmiştir. AISI 420-B çeliğinin element analizi aşağıdaki gibidir;

Tablo 4.5: AISI 420-B Çelik bilye element analizi

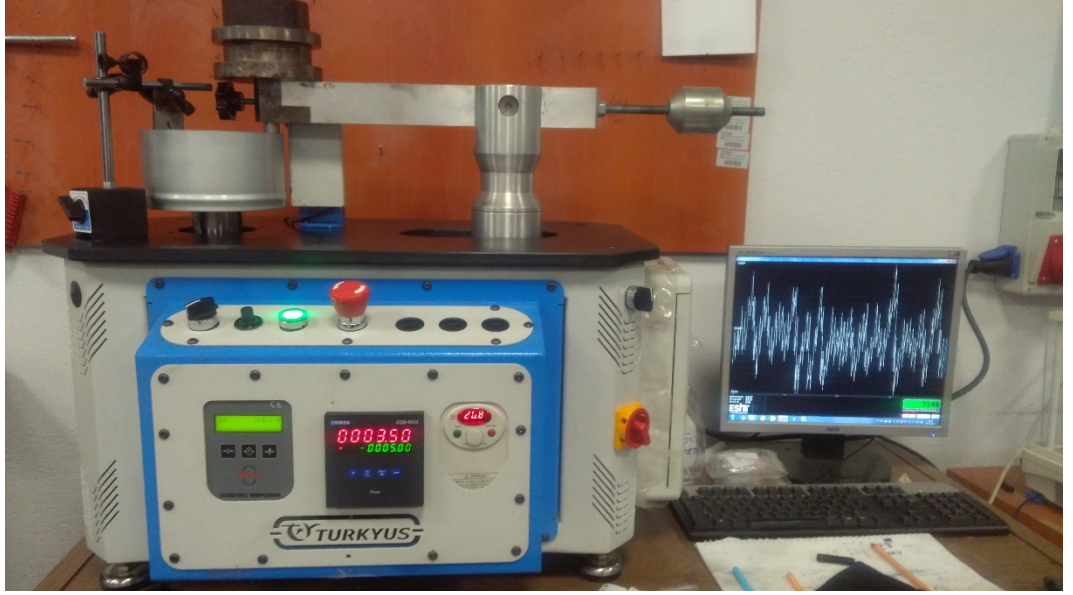
C	Cr	Si	Mn	Smax	Pmax	Ni	Sertlik
0.15 max	12.00 14.00	1.00 max	1.00 max	0.3	0.45	0.15 max	50 HRC

Disk üstünde bilye ile yapılan test işlemi sırasında sürtünme kuvveti loadcell vasıtasıyla ölçülmekte ve RS232 bağlantısı ile bir bilgisayara aktarılmaktadır. Bilgisayara aktarılan değerler ESİT yazılımı ile kayıt edilmektedir.



Şekil 4.8: Disk üstünde bilye test cihazı veri kayıt programı ESİT

Disk üstünde bilye testleri üniversitemiz, Makine ve İmalat Mühendisliği temel imalat laboratuvarında bulunan TURKYUS marka cihaz ile yapılmıştır. Cihaz üzerinde değişik yük koşullarında test yapabilmek için hazırlanmış ağırlıklar kullanılmakta olup, bu ağırlıklar bilye taşıma kolu üzerine koyularak istenen oranda normal yükün elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 4.9: Disk üstünde bilye test cihazı

Disk üstünde bilye cihazında yapılan testler 13 farklı hız değerinde yapıldığından dolayı hızın ayarlanması işlemi cihaz üzerinden yapılırken manuel devir ölçüm takometresi ile ayarlanan hız değerleri kontrol edilmektedir.



Şekil 4.10: Manuel devir ölçüm takometresi

4.5 İçten Yanmalı Motor Test Düzeneği

İçten yanmalı motor testlerinin yapılabilmesi için Genpower marka GBG1200A tipinde jeneratör tedarik edilmiştir. Jeneratöre ait teknik bilgiler aşağıdaki, tabloda gösterilmektedir.

Tablo 4.6: Genpower GBG 1200A Jeneratör teknik özellikleri

JENERATÖR ÖZELLİKLERİ	
Maksimum Çalışma Gücü (VA)	1200
Sürekli Çalışma Gücü (VA)	900
Sürekli Çıkış Akımı (A)	4
Doğru Akım Çıkışı	0
Gerilim (Volt)	230
Frekans (Hz)	50
Güç Faktörü (Cos Q)	1
MOTOR ÖZELLİKLERİ	
Model	152 F
Tip	Hava Soğutmalı 4 Zamanlı OHV 25° Tek Silindirli
Silindir Hacmi (cm ³)	98
Maksimum Çıkış Gücü (watt-3600 d/d)	1838
Yakıt Depo Kapasitesi (mL)	3500
Yakıt Sarfıyatı (g/Kwh)	450
Çalıştırma Şekli	İpli
Sürekli Çalışma Süresi (saat)	6
Yağ Kapasitesi (mL)	350
Gürültü Seviyesi (Db(A) 7 metre)	63

Jeneratör 98 cm³ silindir hacminde buji ile ateşlemeli 2.5 BG maksimum güç veren içten yanmalı motora sahiptir. Motordan jeneratöre redüksiyon kullanılmadan birebir oranında tork ve devir aktarımı krank mili vasıtasıyla sağlanmaktadır. Jeneratörün üzerinde 220 volt çıkış geriliminin alınması için bir adet priz yer almaktadır. Elektronik güç yükleme işlemi bu priz üzerinden gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.11: Genpower GBG 1200A Jeneratör

Jeneratörün sabit yük altında tükettiği yakıtı ölçebilmek için Chroma marka 63804 model elektronik yük cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4.12: Chroma marka elektronik yük cihazı

Anlık yakıt tüketiminin takip edilmesi Radwag marka WTC 2000 tipinde 0.01g hassasiyetinde terazi ile ölçülmüştür.



Şekil 4.13: Motor testinde anlık yakıt ölçümünde kullanılan terazi

Test ve ölçüm işlemlerinin aynı parametrelerde yapılması için 5 dakika aralıklarla karter sıcaklığı ve motor devri ölçülmüştür.



Şekil 4.14: Motor test işlemi sırasında motor devrinin ölçülmesi

4.6 Test Süreci

Disk üstünde bilye testi için öncelikle testlerin yapılacağı hız ve normal yüklerin belirlenmesi amacıyla stribek eğrisi model olarak alındı. Oluşturacağımız stribek eğrisine göre 20N, 40N ve 60N normal kuvvetler çalışma yapmak için seçildi. Seçilen kuvvetlere göre stribek eğrisinin yağlama rejimleri için aşağıdaki tabloda yer alan hızlar belirlendi.

Tablo 4.7: Disk üstünde bilye testi için Stribeck Eğrisine göre disk dönüş hızları

Normal Kuvvet	Disk Dönüş Hızı (d/d)	Açısal Hız (rad/s)	Temas Yarıçapı (m)	Viskozite (mm/s ²)	Çizgisel Hız (m/s)	Stribeck Eğrisi X Eksen
60N	10	0.88	0.07	97.6	0.06	0.10
60N	42	4.39	0.07	97.6	0.31	0.50
60N	75	7.90	0.07	97.6	0.55	0.90
60N	110	11.41	0.07	97.6	0.80	1.30
40N	95	9.95	0.07	97.6	0.70	1.70
40N	117	12.29	0.07	97.6	0.86	2.10
40N	140	14.63	0.07	97.6	1.02	2.50
40N	167	17.55	0.07	97.6	1.23	3.00
20N	97.5	10.24	0.07	97.6	0.72	3.50
20N	112	11.70	0.07	97.6	0.82	4.00
20N	125	13.17	0.07	97.6	0.92	4.50
20N	140	14.63	0.07	97.6	1.02	5.00
20N	150	16.09	0.07	97.6	1.13	5.50

Belirlenen üç normal kuvvet için toplamda 13 farklı hız değeri seçilerek stribek eğrisinin sınır, karışık ve hidrodinamik yağlama rejimleri için sürtünme katsayısındaki değişimi görebilmek amacıyla baz yağdan başlanarak beş ayrı nanopartikül katkılı yağ test işlemleri 5 dakikalık sürelerde yapılmış ve ölçülen sürtünme kuvveti için sonuç değerleri ESİT yazılımı ile kaydedilmiştir. Testler tamamlandıktan sonra tablodaki her bir X değeri için ölçülen sürtünme kuvveti uygulanan normal kuvvete bölünerek sürtünme katsayısı değeri elde edilmiştir.

Disk üstünde bilye testinde elde edilen verilere bağlı olarak en düşük sürtünme katsayısının elde edildiği karışım oranlarından iki tanesi içten yanmalı motorda baz yağ ile birlikte test edilmiştir. Test işlemi için elektronik güç ünitesi ile jeneratör çıkışına 500 watt değerine karşılık gelecek şekilde elektronik yük uygulanmıştır.

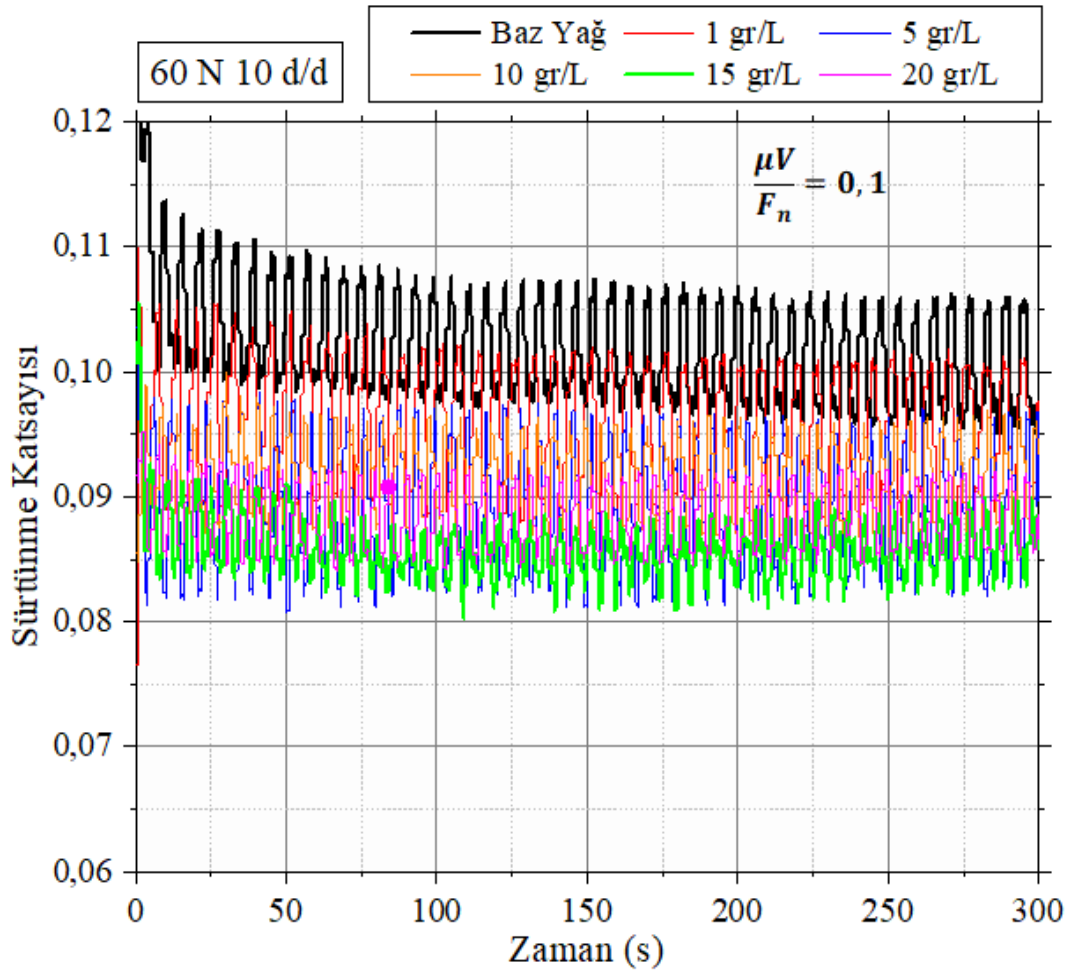
Yükleme işlemi sırasında jeneratör 25 dakika çalıştırılmış ve 5 dakika aralıklarla karter sıcaklığı ile motor devri ve anlık yakıt tüketim değerleri ölçülmüştür.

Baz yağın test işlemi bittikten sonra motor karteri içerisinde bulunan baz yağ boşaltılmış, karter amonyak ile temizlenip kurutulduktan sonra 15 gr/L nanopartikül katkılı yağ kartere doldurulmuştur. İçten yanmalı motorun karter yağ kapasite 0.35 L'dir. 15 gr/L nanopartikül katkılı yağın test işlemi bittikten sonra karterden 15 gr/L nanopartikül katkılı yağ boşaltılmış, karter amonyak ile temizlenmiş ve kurutulduktan sonra kartere 20 gr/L nanopartikül katkılı motor yağı ilave edilerek test işlemi tamamlanmıştır.

5. ELDE EDİLEN BULGULAR

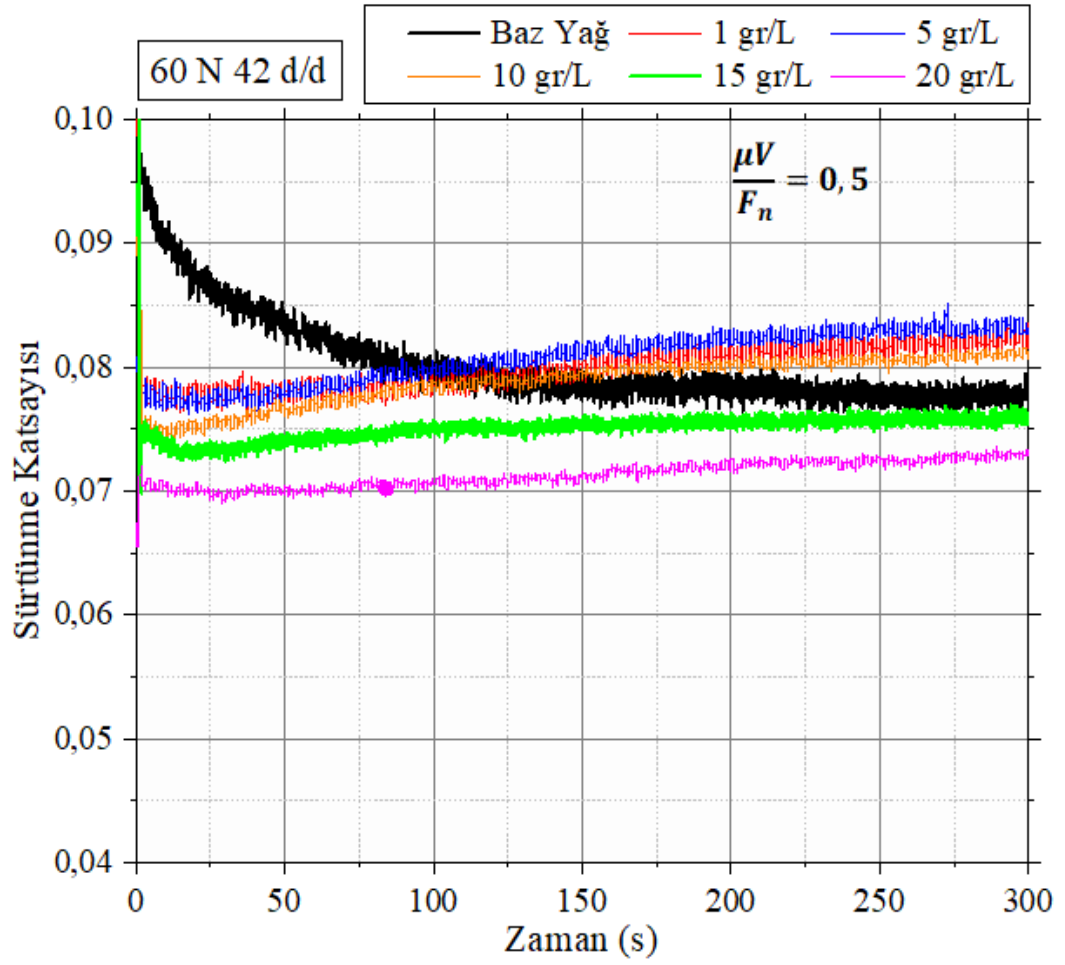
5.1 Disk Üstünde Bilye Verileri

Disk üstünde bilye testi sonunda elde edilen verilerin grafikleri aşağıda sıralanmıştır. 3 farklı yük ve toplamda 13 farklı hızda baz yağ ile birlikte 5 adet farklı oranlarda Fe₃O₄ nanopartikül katkılı yağlar ile yapılan testler yük ve hız bazında grafiklendirilmiş ve her grafikte baz yağın grafiği gösterilmiştir.



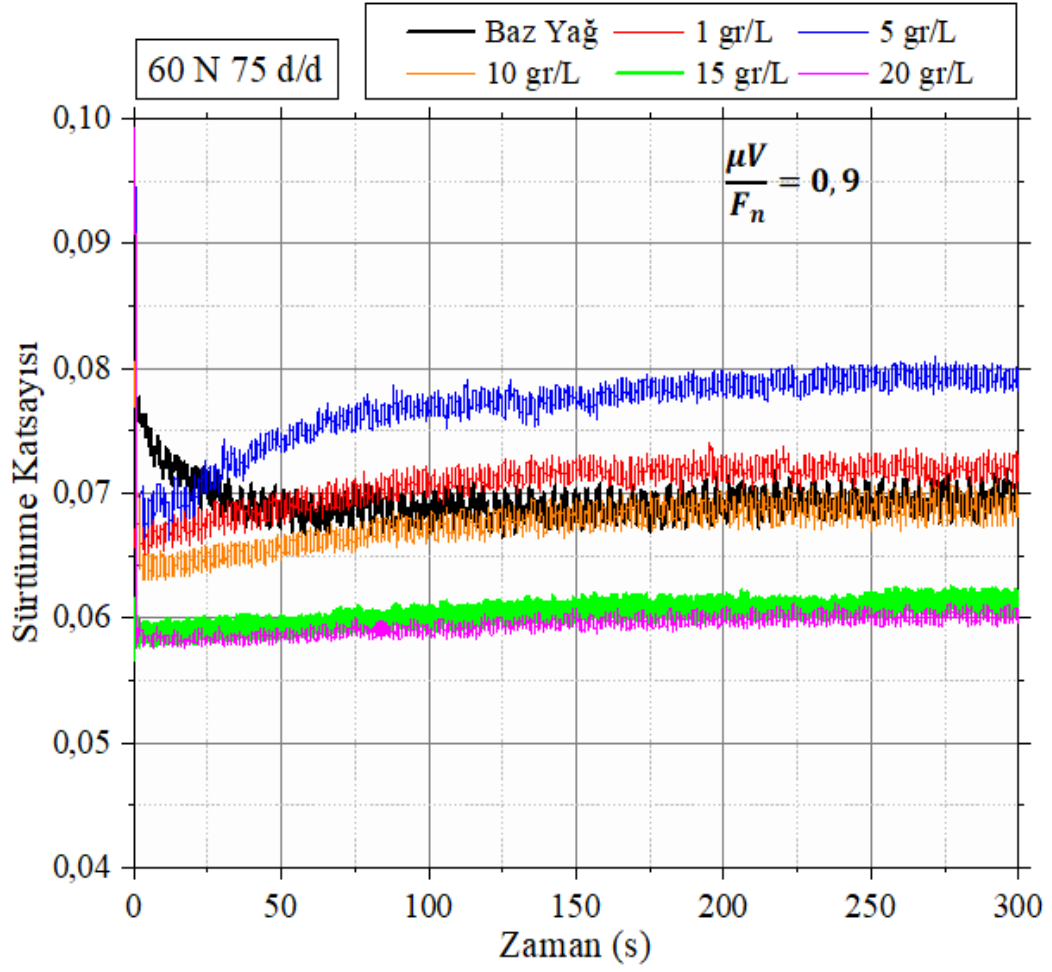
Şekil 5.1: 60N Normal kuvvet ve 10 d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 5.1’de 60N 10 d/d hız ile gerçekleştirilen testte bütün oranlarda NP katkılı yağlar baz yağa göre iyileşme sağlamışlar ve en büyük iyileşmeyi %15 ile 15 gr/L oranında NP katkılı yağ sağlamıştır.



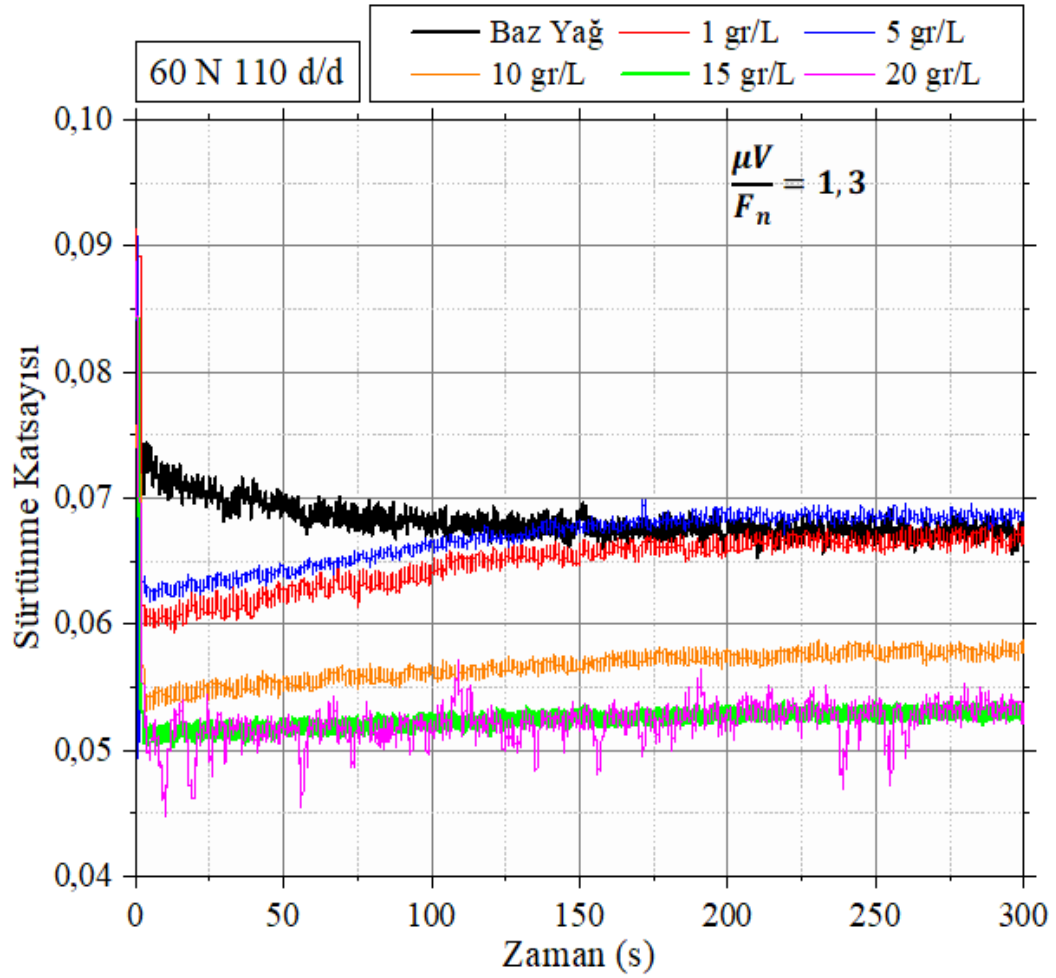
Şekil 5.2: 60N Normal kuvvet ve 42d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 5.2’de 60N normal yük ve 42 d/d hızda test başlangıcında tüm yağlar sürtünme katsayısında baz yağa göre iyileşme sağlamışken testin 100. saniyesi ile birlikte nanopartikül katkılı bazı yağlar baz yağıdan daha yüksek sürtünme katsayısı ortaya koymaktadır. Bu yük ve hızda 10 gr/L, 15 gr/L ve 20 gr/L oranında NP katkılı yağlar sürtünme katsayısında %2, %7 ve %11 oranında iyileşme sağlamıştır.



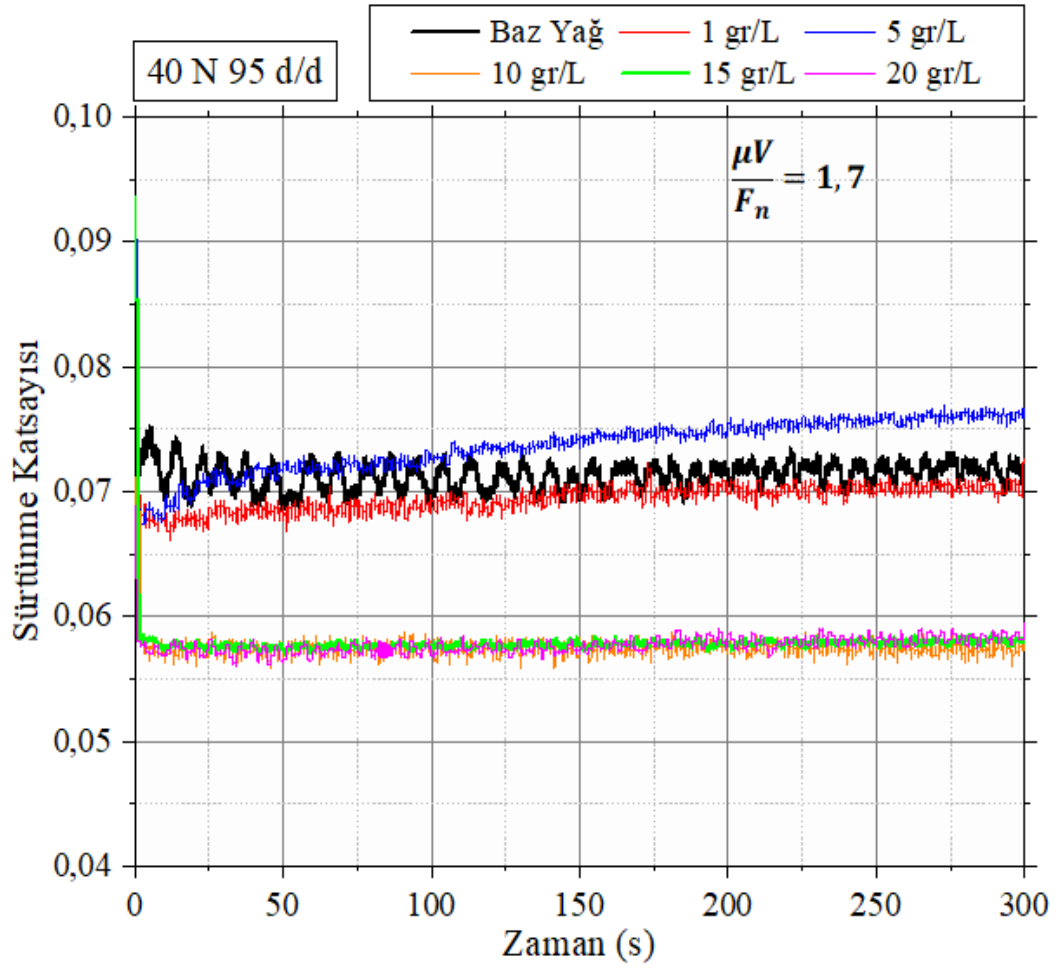
Şekil 5.3: 60N Normal kuvvet ve 75 d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 5.3'te 60N normal kuvvet ve 75 d/d hızda yapılan testte 1 gr/L ve 5 gr/L katkılı yağlar baz yağdan daha yüksek bir sürtünme katsayısı ortaya koyarken 10 gr/L baz yağa yakın bir eğri çizmektedir. 15 gr/L oranında NP katkılı yağ sürtünme katsayısında %13 iyileşme sağlarken 20 gr/L oranında NP katkılı yağ %14 oranında iyileşme sağlamıştır.



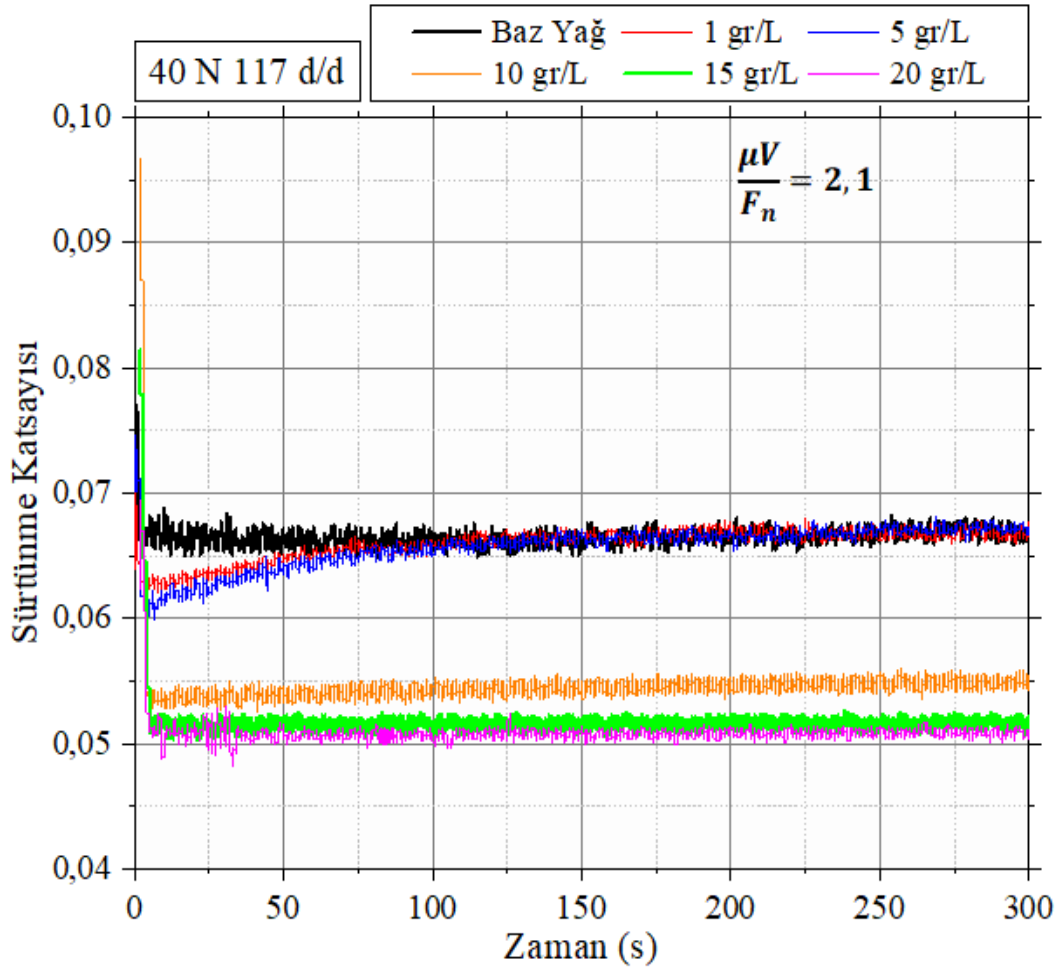
Şekil 5.4: 60N Normal kuvvet ve 110 d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 5.4'te 60N normal kuvvet ve 110 d/d hızda gerçekleştirilen testte 1 gr/L ve 5 gr/L oranlarında NP katkılı yağlar test başlangıcında sürtünme katsayısında düşüş sağlarken testin 100 saniyesi ile baz yağın sürtünme katsayısına benzer bir eğri çizmektedirler. 10 gr/L oranında NP katkılı yağ sürtünme katsayısında %17 iyileşme sağlamıştır. Birbirine çok yakın bir eğri çizen 15 gr/L ve 20 gr/L oranlarında NP katkılı yağlar %23 ve %24 oranlarında iyileşme sağlamıştır.



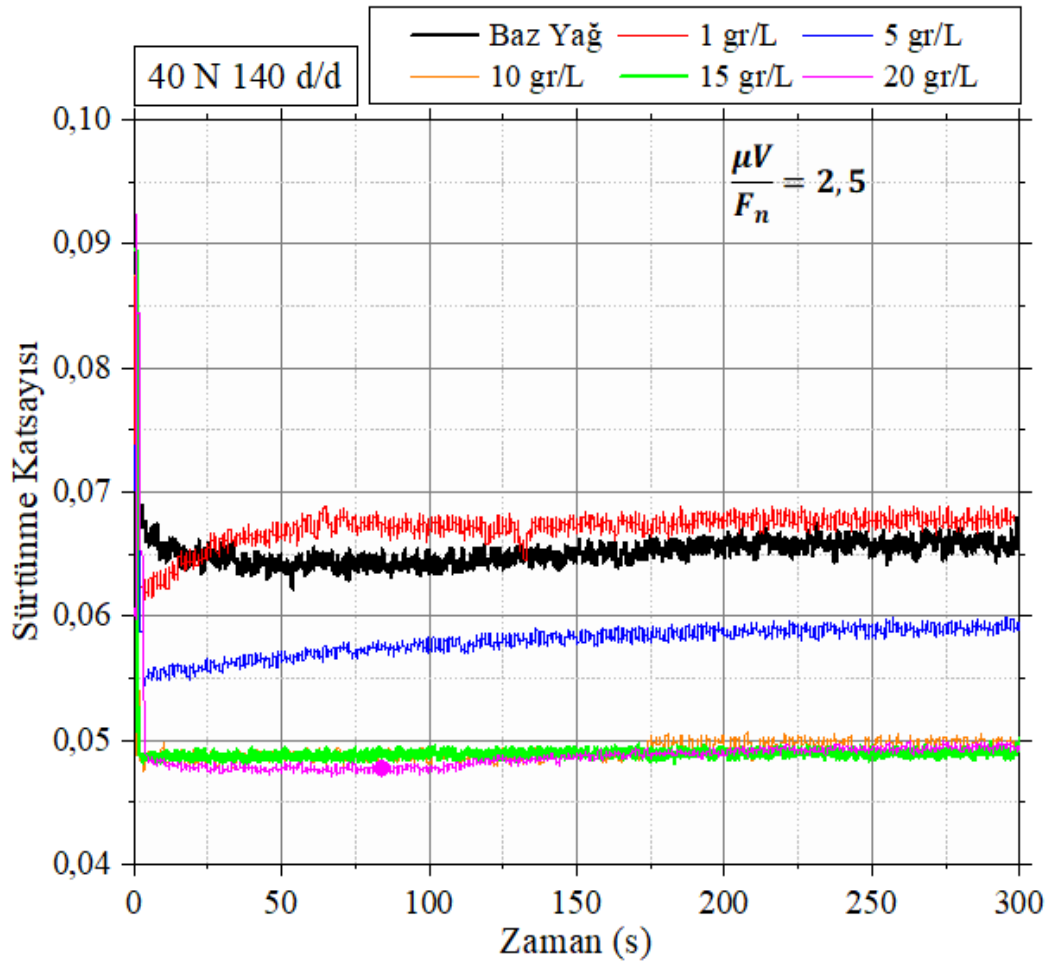
Şekil 5.5: 40N Normal kuvvet ve 95 d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 5.5'te 40N normal kuvvet ve 95 d/d'da test gerçekleştirilmiştir. 5 gr/L oranında NP katkılı yağ sürtünme katsayısını baz yağa göre arttırırken 1 gr/L NP katkılı yağ sürtünme katsayısında %3 gibi bir iyileşme sağlamıştır. 10 gr/L NP katkılı yağ sürtünme katsayısında %20 ile bu yük ve hızda en büyük iyileşmeyi sağlarken birbiri ile örtüşen bir grafik çizen 15 gr/L ve 20 gr/L NP katkılı yağlar %19 iyileşme sağlamıştır.



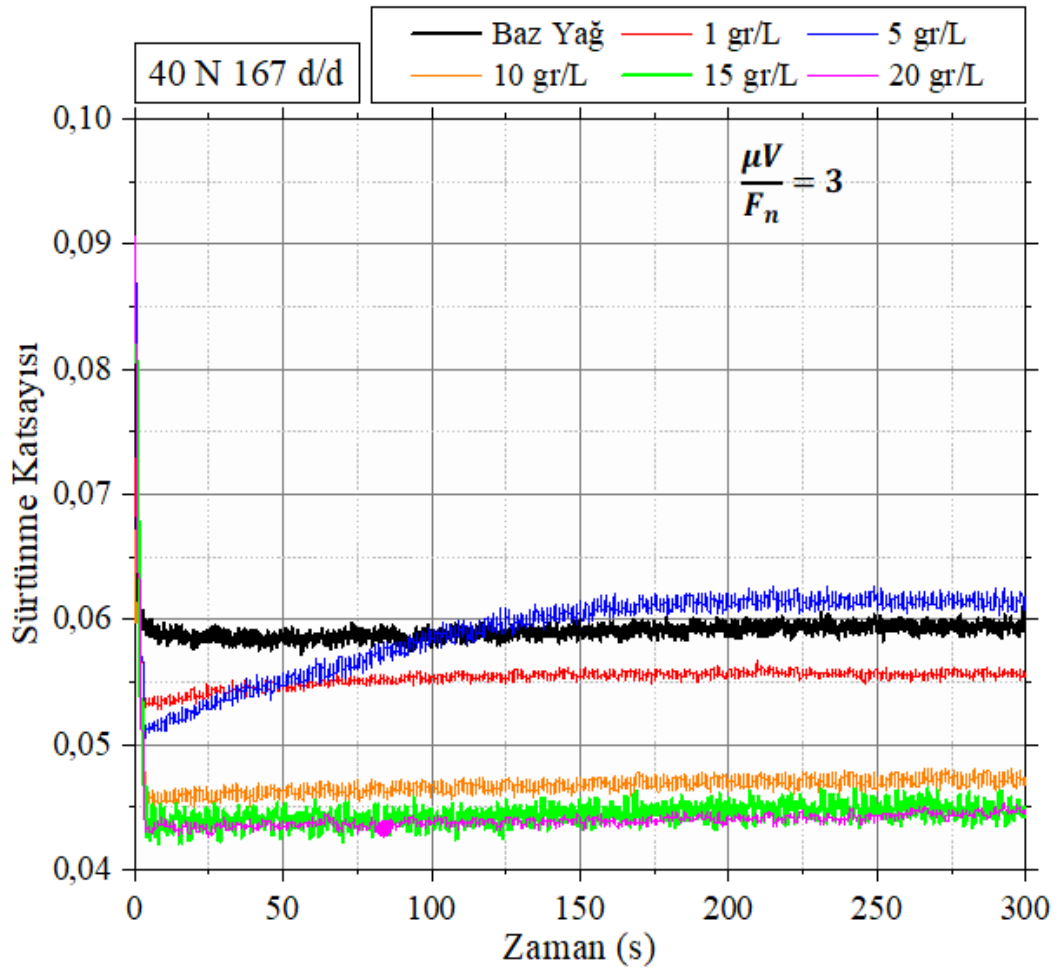
Şekil 5.6: 40N Normal kuvvet ve 117 d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 5.6'da 40N normal yük ve 117 d/d hızda gerçekleştirilen testte 1 gr/L ve 5 gr/L NP katkılı yağ başlangıçta baz yağa göre sürtünme katsayısında yaklaşık %10'luk bir iyileşme sağlamışken testin ilk 50 saniyesinden sonra baz yağ ile aynı değerde sürtünme katsayısı ölçülmüştür. 10 gr/L, 15 gr/L ve 20 gr/L NP katkılı yağlar sırasıyla %18, %23 ve %24 oranında sürtünme katsayısında iyileşme sağlamıştır.



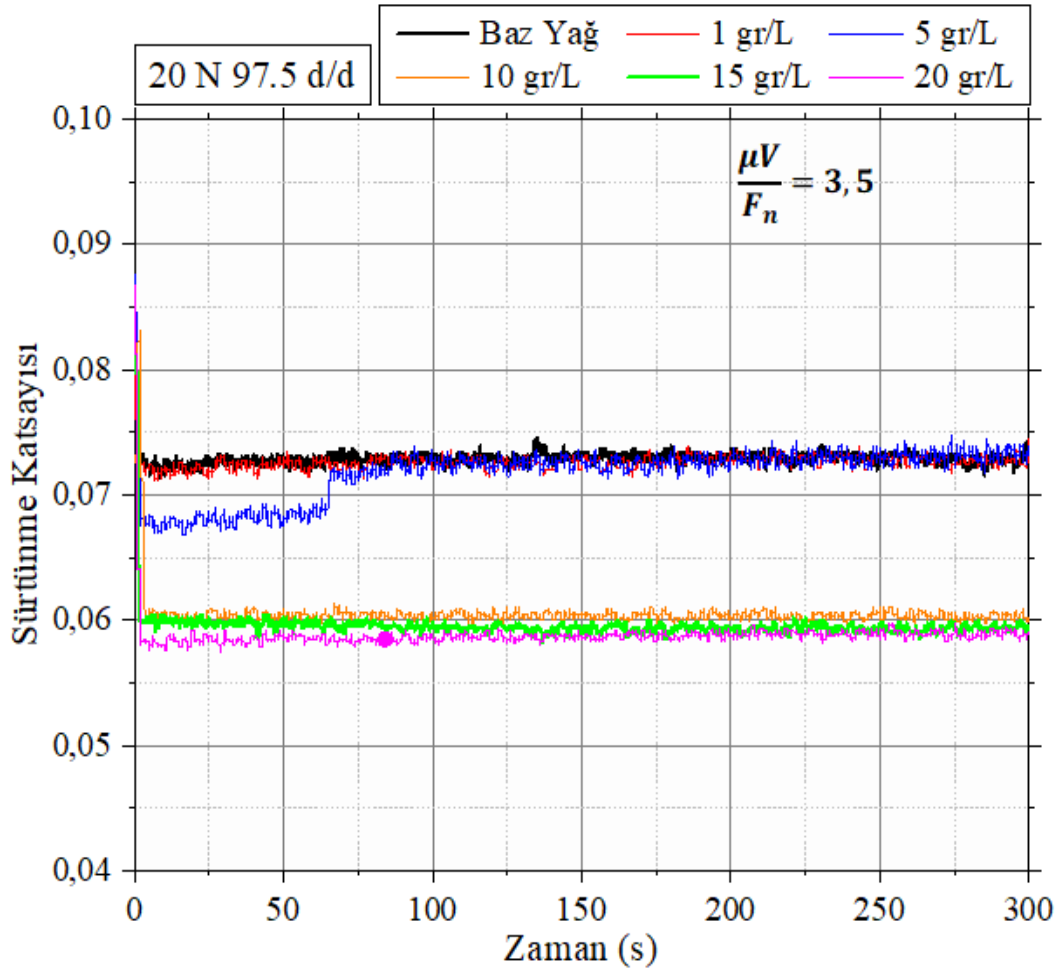
Şekil 5.7: 40N Normal kuvvet ve 140 d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 5.7’de 40N normal yük ve 140 d/d hızdaki testte 1 gr/L NP katkılı yağ baz yağa göre daha yüksek bir sürtünme katsayısı ölçülmesine neden olurken 5 gr/L NP katkılı yağ sürtünme katsayısında %11 iyileşme sağlamıştır. 10 gr/L, 15gr/L ve 20gr/L oranlarında NP katkılı yağlar ise sürtünme katsayısında sırasıyla %25, %25 ve %26 oranında iyileşme sağlamıştır.



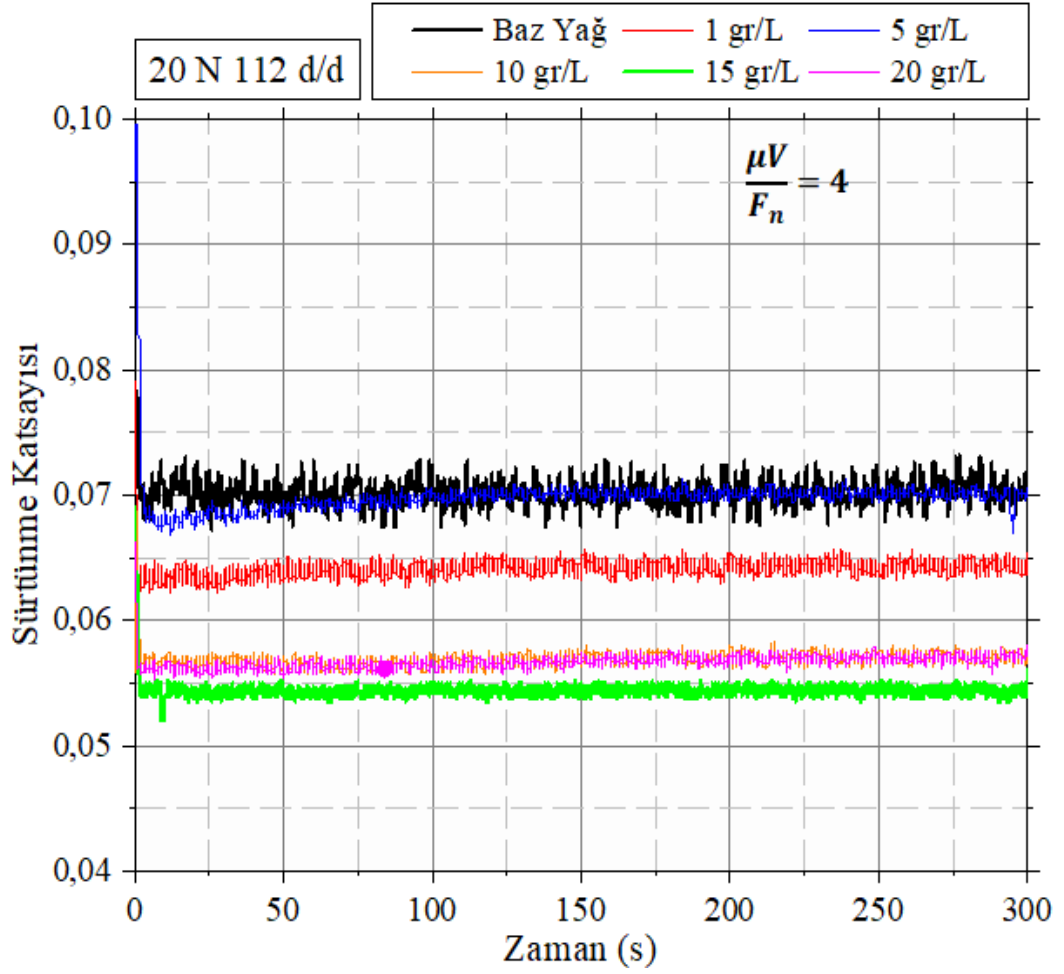
Şekil 5.8: 40N Normal kuvvet ve 167 d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 5.8’de 40N normal yük ve 167 d/d hızda yapılan testte 5gr/L oranında NP katkılı yağ sürtünme katsayısında test başlangıcında %15 oranında iyileşme sağlamışken zamanla bu iyileşme seviyesi düşmekte ve testin 100 saniyesinden itibaren baz yağdan daha kötü bir sürtünme katsayısı ölçülmesine neden olmaktadır. Bu yükselmeye rağmen test süresinde 5 gr/L oranında NP katkılı yağ sürtünme katsayısında ortalama %1’lik iyileşme sağladığı görülmektedir. Bu yük ve hızda sürtünme katsayısında en büyük iyileşmeyi 20 gr/L oranında NP katkılı yağ %26’lık bir değişim sağlamıştır.



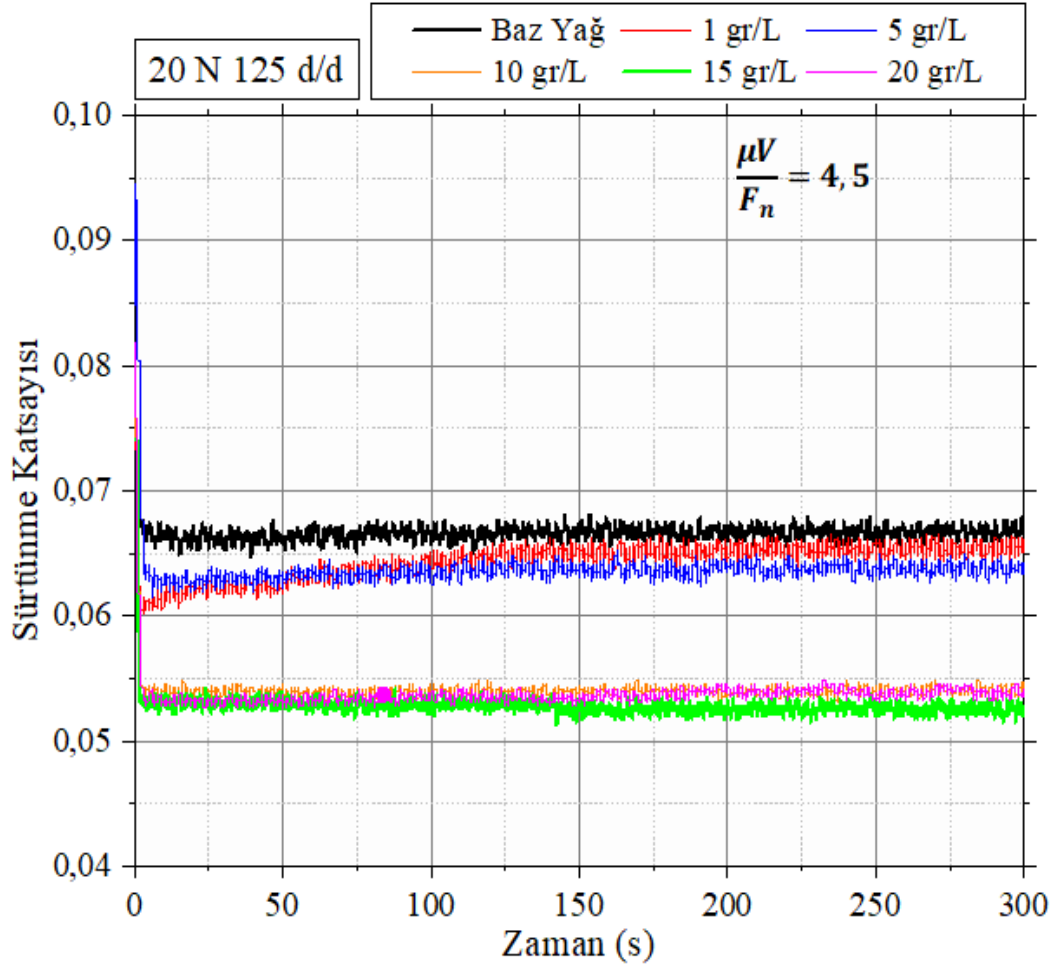
Şekil 5.9: 20N Normal kuvvet ve 97.5d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 5.9'da 20N normal yük ve 97.5 d/d hızda yapılan testin grafiği yer almaktadır. Bu testte 1gr/L ve 5 gr/L oranlarında Fe₃O₄ nanopartikül katkılı yağ baz yağ ile hemen hemen aynı sürtünme katsayısı değerini verirken, 10 gr/L, 15 gr/L ve 20 gr/L oranlarında nanopartikül katkılı yağlar için sürtünme katsayısı 0.06 civarında ölçülmüş olup, sürtünme katsayısının en düşük değeri 20 gr/L oranındaki nanopartikül katkılı yağ ile elde edilmiştir.



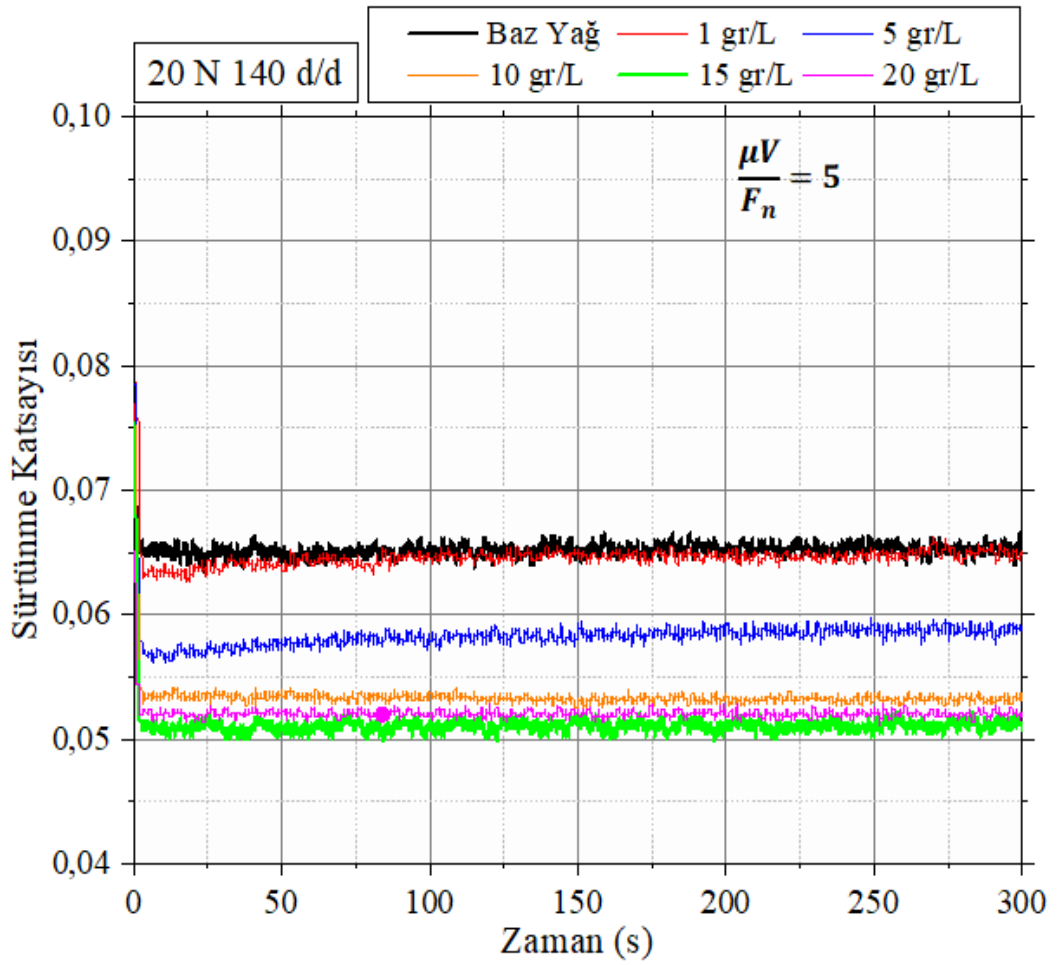
Şekil 5.10: 20N Normal kuvvet ve 112d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 5.10’da 20N normal yük ve 112 d/d hızda gerçekleştirilen testte 5 gr/L oranındaki nanopartikül katkılı yağ, baz yağ ile hemen hemen aynı sürtünme katsayısı değerini verirken 1 gr/L nanopartikül katkılı yağ için sürtünme katsayısı 0.65 olarak ölçülmüştür. Bu hızda yapılan testlerde 10 gr/L ile 20 gr/L oranlarında nanopartikül katkılı birbiri ile örtüşen bir eğri gösterirken 15 gr/L katkılı yağ bu yük ve hız için en düşük sürtünme katsayısının elde edilmesini sağlamıştır.



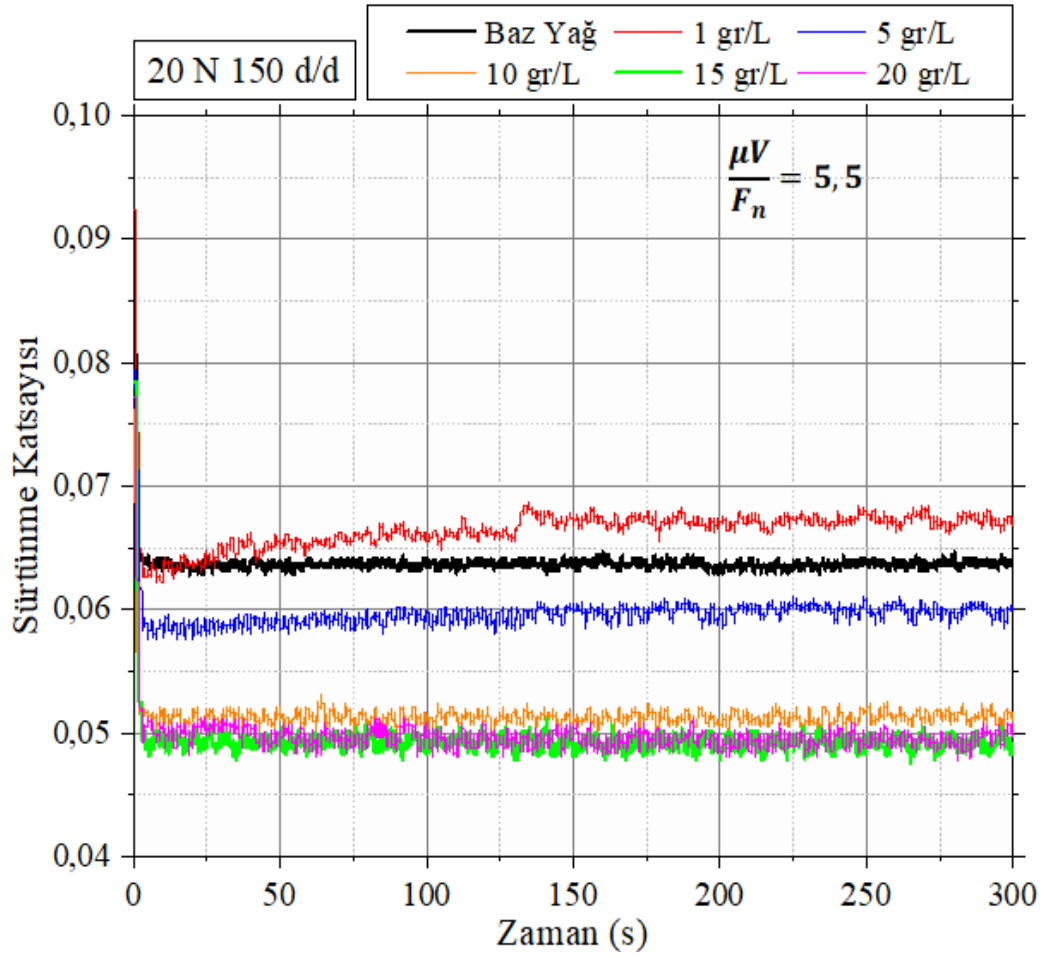
Şekil 5.11: 20N Normal kuvvet ve 125d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 5.11’de 20N kuvvet ve 125 d/d hız ile yapılan testte 1 gr/L ile 5 gr/L NP katkılı yağlar sırasıyla %3 ve %5 iyileşme sağlarken, 10 gr/L ve 20 gr/L NP katkılı yağlar %19 ve %20 oranında iyileşme sağlamıştır. Bu testte en büyük iyileşmeyi %21 ile 15 gr/L NP katkılı yağ sağlamıştır.



Şekil 5.12: 20N Normal kuvvet ve 140d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 5.12’de 20N normal yükte 140 d/d hızda baz yağ ile 1 gr/L NP katkılı yağ benzer özellikler sergilerken 10gr/L, 15 gr/L ve 20 gr/L NP katkılı yağlar sırasıyla baz yağa göre sürtünme katsayısında %18, %22 ve %20 oranlarında iyileşme sağlamışlardır.



Şekil 5.13: 20N Normal kuvvet ve 150 d/d hızda baz yağ ve nanopartikül katkılı yağın sürtünme katsayısı grafiği

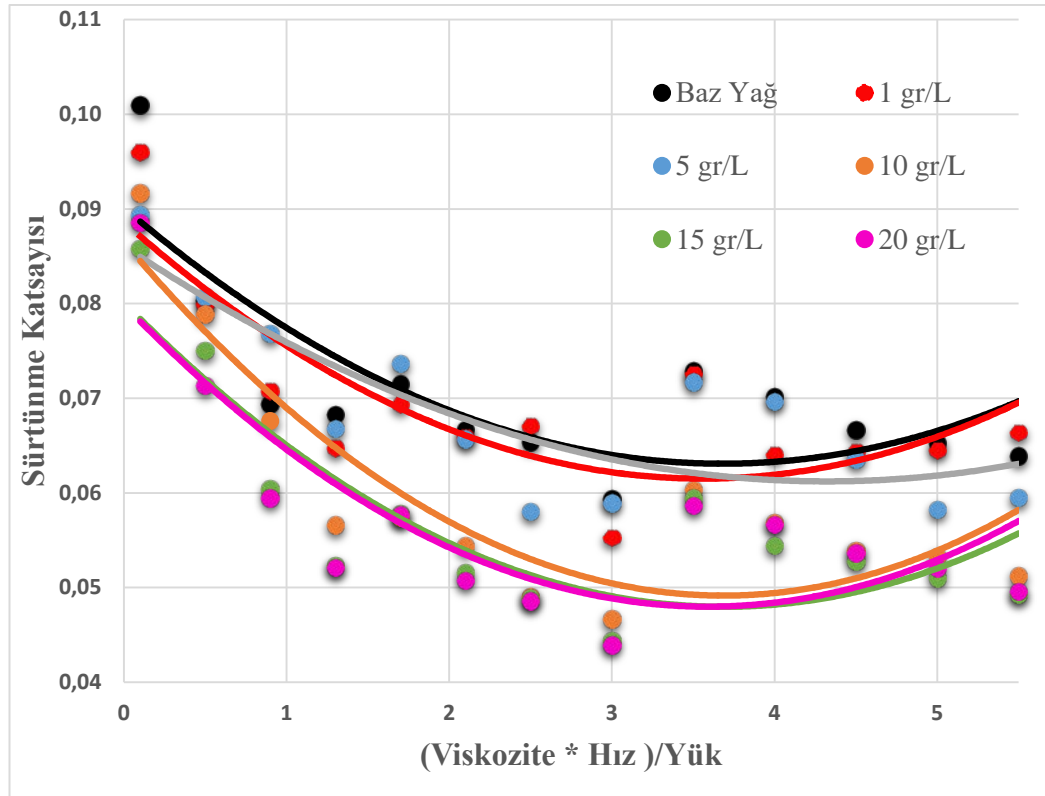
Şekil 5.13'te 20N normal kuvvet ve 150 d/d ile yapılan testte 1 gr/L oranında NP katkılı yağ, baz yağa göre sürtünme katsayısında artışa sebep olmuştur. 5 gr/L oranında NP katkılı yağ sürtünme katsayısında %7 iyileşme sağlamıştır. 10 gr/L, 15 gr/L ve 20 gr/L NP katkılı yağlar sürtünme katsayısında sırasıyla %20, %23 ve %22 oranında iyileşme sağlamışlardır.

Tablo 5.1'de Disk üstünde bilye test cihazında gerçekleştirilen testler sonucunda belirlenen parametrelere göre ölçülen sürtünme katsayıları gösterilmektedir.

Tablo 5.1: Disk üstünde bilye testi sonunda elde edilen sürtünme katsayıları

Test Parametreleri			Sürtünme Katsayıları					
x	Normal Kuvvet (N)	Dönüş Hızı (d/d)	Baz Yağ	1 gr/L	5 gr/L	10 gr/L	15 gr/L	20 gr/L
0.1	60	10	0.101	0.096	0.089	0.092	0.086	0.089
0.5	60	42	0.080	0.080	0.081	0.079	0.075	0.071
0.9	60	75	0.069	0.071	0.077	0.068	0.060	0.059
1.3	60	110	0.068	0.065	0.067	0.057	0.052	0.052
1.7	40	95	0.072	0.069	0.074	0.057	0.058	0.058
2.1	40	117	0.067	0.066	0.066	0.054	0.052	0.051
2.5	40	140	0.065	0.067	0.058	0.049	0.049	0.049
3	40	167	0.059	0.055	0.059	0.047	0.044	0.044
3.5	20	97.5	0.073	0.073	0.072	0.060	0.059	0.059
4	20	112	0.070	0.064	0.070	0.057	0.054	0.057
4.5	20	125	0.067	0.064	0.064	0.054	0.053	0.054
5	20	140	0.065	0.065	0.058	0.053	0.051	0.052
5.5	20	150	0.064	0.066	0.060	0.051	0.049	0.050

Tablo 5-1'deki değerlerle çizilen stribeck eğrisi Şekil 5.14'te gösterilmiştir.



Şekil 5.14: Disk üstünde bilye testleri sonunda elde edilen Stribeck Eğrisi

5.2 İçten Yanmalı Motor Testi Verileri

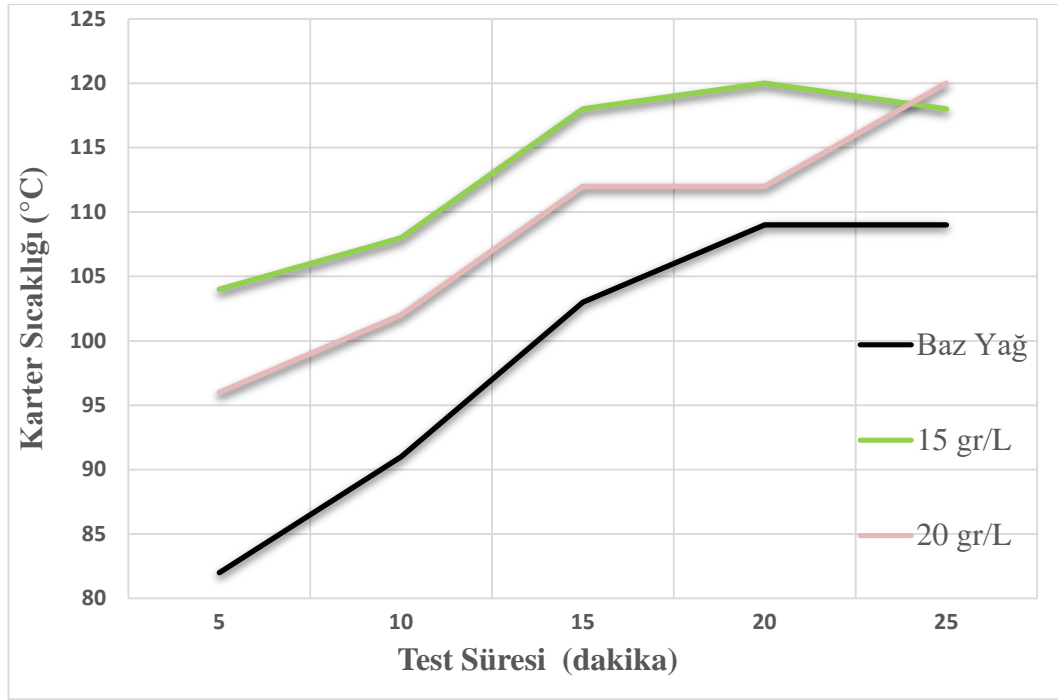
İçten yanmalı motor testi sonucunda elde edilen veriler Tablo 5.2’de gösterilmektedir.

Tablo 5.2: İçten yanmalı motor testi sonucunda elde edilen veriler

	Baz Yağ			15 g/L			20 g/L		
Süre (dakika)	Devir (d/d)	Sıcaklık (°C)	Tüketim (gr)	Devir (d/d)	Sıcaklık (°C)	Tüketim (gr)	Devir (d/d)	Sıcaklık (°C)	Tüketim (gr)
5	2977	82	34.5	2950	104	38.4	2956	96	38.92
10	2965	91	36.7	2939	108	37.6	2942	102	37.55
15	2973	103	36.74	2944	118	39.08	2954	112	37.41
20	2945	109	36.66	2957	120	34.62	2926	112	37.72
25	2960	109	36.86	2948	118	38.58	2920	120	37.8
Toplam Tüketim (gr/25 d)			181.46	Toplam Tüketim (gr/25 d)		188.28	Toplam Tüketim (gr/25 d)		189.4

Motor testinde öncelikle baz yağ test edilmiş ve test süresince hem sıcaklık hem de devir değerleri ölçülmüştür. Baz yağın testinin tamamlanmasının ardından 15 gr/L oranında nanopartikül katkılı yağ test edilmiş ve en son olarak 20 gr/L oranında nanopartikül katkılı yağ test edilerek süreç tamamlanmıştır. Tüm testler ikişer defa tekrar edilmiş ve sonuçlarının ortalama değerleri alınmıştır.

Şekil 5.15’te görüldüğü şekliyle sıcaklık değerleri incelendiğinde baz yağın test süresince sıcaklık değerlerinin nanopartikül katkılı yağlara göre daha düşük olduğu görülmektedir. Karter sıcaklık değerinin daha düşük olmasının nedeni motorun çalışması sırasında ortaya çıkan sürtünmenin düşük olması ve bu nedenle soğutma ve sürtünme azaltma için kullanılan yağın dolaşım sırasında daha az ısınmasından kaynaklanmaktadır.

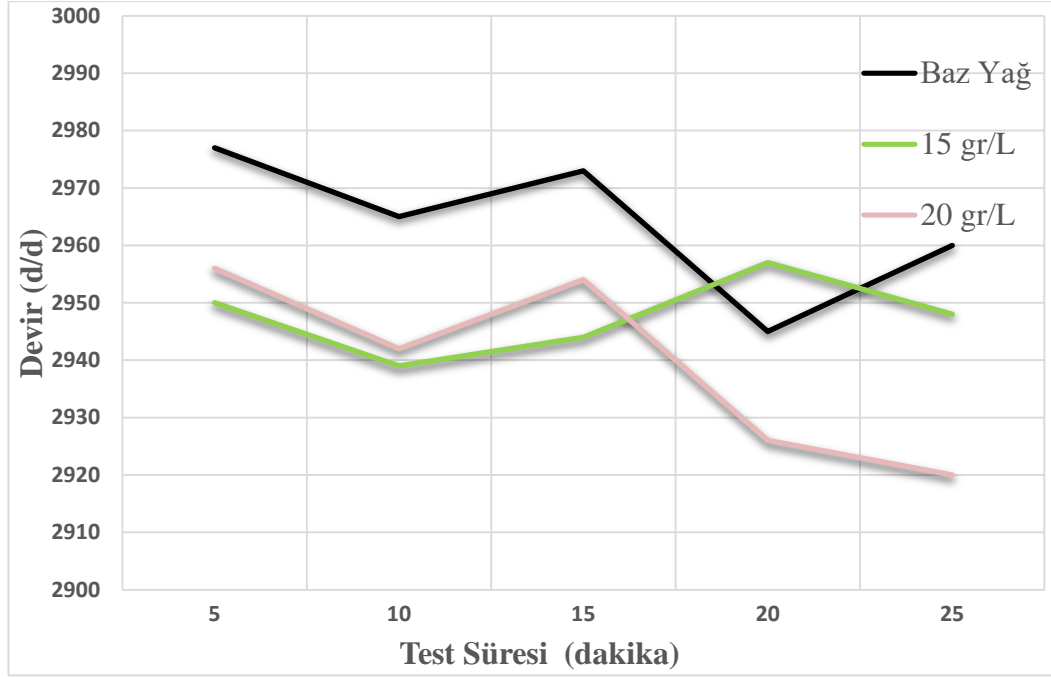


Şekil 5.15: İçten yanmalı motor testi sonucunda oluşan sıcaklık grafiği

15 gr/L oranında nanopartikül katkılı yağ test sırasında en yüksek karter sıcaklığına ulaşmasına rağmen Şekil 5.16’da yer alan devir değerlerinde de görüldüğü üzere devir dalgalanması en düşük olmasına rağmen beşer dakikalık süreler sonunda ölçülen devir değerlerinde en düşük değişime sahiptir. Beşer dakikalık süreler sonunda ölçülen devir değerlerine bağlı olarak motorun en kararlı çalışma koşulu 15 gr/L oranında nanopartikül katkılı yağ ile sağlandığı görülmektedir.

Teste tabi tutulan üç farklı yağın yirmi beş dakikalık testler sonucunda en düşük yakıt tüketimi 181.46 gram ile baz yağ testinde elde edilmiştir. 15 gr/L nanopartikül katkılı yağ ile yapılan testte yakıt tüketimi miktarı 188.28 gram ölçülürken, 20 gr/L nanopartikül katkılı yağ ile yapılan test sonucunda 189.4 gram olarak ölçülmüştür.

Yakıt tüketim miktarları oransal olarak karşılaştırıldığında baz yağa göre 15 gr/L nanopartikül katkılı yağ yakıt tüketimini %3.76 arttırırken, 20 gr/L nanopartikül katkılı yağ yakıt tüketimini %4.38 oranında arttırmıştır.



Şekil 5.16: İçten yanmalı motor testi sonucunda oluşan devir grafiği

Baz yağın test sırasında ölçülen devir değerlerinin ortalamasının en yüksek ortalamaya sahip olduğu görülmektedir. Jeneratörden uygulanan elektronik yükü karşılamak için baz yağ ile yapılan teste harcanan negatif kuvvet düşük olması nedeniyle devir değeri yüksek olmasına rağmen en düşük yakıt tüketimine sahip olduğu görülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Fe_3O_4 nanopartikülleri ile yapılan testlerde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

60 N normal kuvvet uygulanarak yapılan testlerde sürtünme katsayısının diğer yük koşullarına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. 60N normal kuvvet altında, 10 d/d hızda baz yağ sürtünme katsayısı 0.101 iken 15 gr/L oranında NP katkılı yağ ile sürtünme katsayısı 0.0858'e kadar düştüğü ve %15 iyileşme elde edildiği görülmüştür.

60N normal kuvvet uygulanarak yapılan deneyler stribeck eğrisinin sınır sürtünmesi bölgesine girmekte olup, sınır sürtünme koşullarında sürtünme katsayısında en büyük iyileşmeyi 15 gr/L oranında Fe_3O_4 nanopartikül karıştırılmış yağ sağlamıştır. Fe_3O_4 nanopartikülleri sürtünen iki yüzey arasına girerek yağlama yağının sürtünme azaltma etkisini arttırmaktadır.

40N normal kuvvet ile yapılan testler stribeck eğrisine göre karışık ve elastohidrodinamik sürtünme bölgesine girmekte olup, sürtünme katsayısının en düşük olduğu gölge burasıdır. Bu bölgede yapılan testlerde 1 gr/L ve 5 gr/L oranlarında nanopartikül katkılı yağlar, bazı hızlarda baz yağa göre daha yüksek sürtünme katsayısı özellikleri gösterirken; 10 gr/L, 15 gr/L ve 20 gr/L oranlarında nanopartikül katkılı yağlar baz yağa göre tüm dönüş hızlarında daha düşük sürtünme katsayısı elde edilmesini sağlamışlardır.

20 gr/L oranında Fe_3O_4 nanopartikül katkılı yağ karışık ve elastohidrodinamik bölgede tüm hızlarda en iyi sürtünme katsayısını vermiş olup, 40N normal yük ve 167 d/d hızda baz yağ sürtünme katsayısı 0.0594 iken bu oranda %26 iyileşme ile 0.0439 değerine düşürmüştür.

20N normal yük ile birlikte stribeck üzerinde elastohidrodinamik sürtünme bölgesinden hidrodinamik sürtünme bölgesine geçiş olmaktadır. Sürtünme katsayısında hidrodinamik bölge ile birlikte artış yaşanmaya başlarken bu bölgede en iyi sürtünme azaltma özelliği 15 gr/L oranında nanopartikül katkılı yağdan gelmiştir. Hidrodinamik bölgede sürtünme katsayısındaki iyileşmenin 15 gr/L oranında en düşük olduğu, oran arttıkça, sürtünme katsayısındaki iyileşmenin azaldığı görülmüştür.

Fe_3O_4 nanopartikülleri kullanımının 15 gr/L ve 20 gr/L oranlarında kullanılması halinde baz yağın sürtünme katsayısı ortalamasını %20 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir.

İçten yanmalı motorlarda kullanılan 10W40 yağı ve bu yağa ilave edilen Fe_3O_4 nanopartikülleri ile yapmış olduğumuz testlerde 15 gr/L oranındaki yağın en iyi sürtünme azaltma etkisini gösterdiği, nanopartikül oranındaki artışın 20 gr/L'den sonra sürtünme azaltma etkisini kaybettiği bu nedenle bundan sonraki araştırmalarda 15 gr/L oranının altındaki ve üstündeki değerlerin daha detaylı araştırmasının yapılması önerilmektedir.

İçten yanmalı motora sahip jeneratör ile yapılan testte baz yağın 15 gr/L ve 20 gr/L oranlarında nanopartikül katkılı yağlara göre daha düşük yakıt tükettiği ve karter sıcaklığının nanopartikül katkılı yağlara göre daha düşük olduğu, bu nedenle sürtünme performansı olarak iyi bir sonuç verdiği görülmüştür.

Motor testinde kullanılan jeneratör motorunun yağlama sistemi basınçlı yağlama olmayıp çarptırma yağlama sistemine sahiptir, bu nedenle motorun çalışan parçaları arasında meydana gelen sürtünme kuru sürtünme ile karışık sürtünme bölgesindedir. Disk üstünde bilye testlerinde elde ettiğimiz stribeck eğrisine göre özellikle kuru sürtünme bölgesinde yağ katkı maddelerinin baz yağa göre çok etkin bir iyileştirme sağlamadığı görülmüştür.

Disk üstünde bilye testi sonuçlarını motor testleri ile birleştirmeden değerlendirmek katkı maddelerinin içten yanmalı motorlar üzerindeki etkisini tespit edebilmek için yeterli bir yöntem olmadığı görülmüştür. Disk üstünde bilye testinde 15 gr/L ve 20 gr/L oranlarında nanopartikül katkılı yağlar baz yağa göre %20 oranında sürtünme kuvvetinde iyileşme sağlamışken motor testinde baz yağa göre daha fazla yakıt tüketimine sebep olmuşlardır.

İçten yanmalı motor testi için tam basınçlı yağlama sistemine sahip olmayan motorlarda bütün sürtünme rejimleri meydana gelmeyeceğinden katkı maddesinin hangi yük ve hız altında ne kadar olumlu veya olumsuz etki ettiğinin tespit edilmesi mümkün olmayacağından, yağ katkı maddelerinin içten yanmalı motorlarda etkisinin

tespit edilebilmesi için test motorunun tam basınçlı yağlama sistemine sahip olması önerilmektedir.

Nanopartiküllerin yüzey modifikasyonunda oleik asit kullanımı haricindeki yöntemlerinde denenmesinin sonuca etkisinin araştırılması önerilmektedir.

Yağ katkı maddelerinin sadece ilk kullanılacak yağlarda değil de belirli bir süre motorda kullanılmış olan yağların yağlama özelliklerine etkisinin de araştırılması önerilmektedir.

7. KAYNAKLAR

Abere, J. O. , “Improved Performance of Bio-lubricant By Nanoparticles Additives” PhD Thesis, The University of Sheffield, Mechanical Engineering, Sheffield, (2017).

Affatato, S., Bermúdez, M.-D., Burstein, L., Jackson, M. J., Jiménez, A.-E., Morrell, J. S., Zhang, L., “*Tribology for Engineers*”, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 68-71, (2011).

ASTM Standard G99-05, “Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus”, *ASTM International*, Berlin, doi:10.1520/G0099-05R10.2, (2011).

Aydın, Z., “Deniz Taşıtlarında Kullanılan Farklı Yağların Segman-Silindir Çifti Yüzeylerindeki Tribolojik Özelliklerine Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gemi İnşaatı Ve Gemi Makineleri Anabilim Dalı, İstanbul, (2015).

Baş, H. ve Karabacak, Y. E., “Investigation of the Effects of Boron Additives on the Performance of Engine Oil”, *Tribology Transactions*, 57 (4), 740–748, doi:10.1080/10402004.2014.909549, (2014).

Basshuysen, R. van ve Schäfer, F., “*Internal Combustion Engine Handbook*”, Panama: SAE International, 279-303, (2004).

Blau, P. J., “*Friction Science And Technology*”, Florida: CRC Press, 1-30, (2009).

Budinski, K. G., “*Guide to Friction, Wear, and Erosion Testing*”, Conshohocken: ASTM International, 60-75, (2007).

Çelik, O. N., Ay, N. ve Göncü, Y., “Effect of Nano Hexagonal Boron Nitride Lubricant Additives on the Friction and Wear Properties of AISI 4140 Steel”, *Particulate Science and Technology*, 31 (5), 501–506, doi:10.1080/02726351.2013.779336, (2013).

Demirtas, S., Kaleli, H., Khadem, M. ve Kim, D.-E., “Characterization of the friction and wear effects of graphene nanoparticles in oil on the ring/cylinder liner of internal

combustion engine”, *Industrial Lubrication and Tribology*, 71 (5), 642–652, doi:10.1108/ILT-05-2018-0170, (2019).

Demirtas, S., Kaleli, H., Khadem, M., Kim, D., “Tribotest of engine piston ring/cylinder liner pairs with different nanoparticles added into engine oil”, *Industrial Lubrication and Tribology*, doi:10.1108/ILT-07-2018-0284, (2018).

Durak, E., “Experimental Study of Friction Coefficient of The Journal Bearing Supplied with Boric Acid Addition Lubricant”, *Journal of Balikesir University Institute of Science and Technology*, 5 (1), 121–129, (2003).

Gao, C., Wang, Y., Hu, D., Pan, Z., Xiang, L., “Tribological properties of magnetite nanoparticles with various morphologies as lubricating additives”, *Journal of Nanoparticle Research*, 15 (3), 1502. doi:10.1007/s11051-013-1502-z, (2013).

Ghaednia, H., Hossain, M. S., Jackson, R. L., “Tribological Performance of Silver Nanoparticle–Enhanced Polyethylene Glycol Lubricants”, *Tribology Transactions*, 59 (4), 585–592, doi:10.1080/10402004.2015.1092623, (2016).

Holmberg, K., Andersson, P., Erdemir, A. “Global energy consumption due to friction in passenger cars”, *Tribology International*, 47, 221–234, doi:10.1016/j.triboint.2011.11.022, (2012).

Hu, C. H., Qi, F. J., Jiang, H., Liu, Q., Zhang, X., Cao, J., “Study on Tribological Behaviors of FeS Solid Lubrication Duplex Layer under n-Fe₃O₄ Additive Lubricating”, *Advanced Materials Research*, 652–654, 1427–1431, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.652-654.1427, (2013).

Ilie, F. ve Covaliu, C., “Tribological Properties of the Lubricant Containing Titanium Dioxide Nanoparticles as an Additive”, *Lubricants*, 4 (2), 12, doi:10.3390/lubricants4020012, (2016).

Ingole, S., Charanpahari, A., Kakade, A., Umare, S. S., Bhatt, D. V., Menghani, J., “Tribological behavior of nano TiO₂ as an additive in base oil”, *Wear*, 301 (1–2), 776–785, doi:10.1016/j.wear.2013.01.037, (2013).

Kaleli, H. ve Durak, E., “Effects of boron oil fortifier on friction and pressure distribution in engine journal bearings”, *Industrial Lubrication and Tribology*, 55 (3), 121–127, doi:10.1108/00368790310470958, (2003).

Kamal, M., Ali, A., Xianjun, H., Abdelkareem, M. A. A., “Recent Advances in Nanolubricant Additives for Fuel Economy in Automotive”, *IAPE'19: International Conference on Innovative Applied Energy*, Oxford, 2 (1), 3–6, (2019). doi:http://dx.doi.org/10.17501,

Keromest, C., Durand, J.-P., Gateau, P., Tessier, M., Maréchal, E., “Lubricant applications phosphosulphurised antiwear and extreme pressure vi improver polymer additives: Synthesis, properties, and lubricant applications”, *Lubrication Science*, 10 (3), 179–197, doi:10.1002/ls.3010100302, (1998).

Kılıç, İ. “İçten Yanmalı Motorlarda Sürtünme Kayıpları”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2007).

Knauder, C., Allmaier, H., Sander, D. E., Sams, T., “Investigations of the Friction Losses of Different Engine Concepts. Part 1: A Combined Approach for Applying Subassembly-Resolved Friction Loss Analysis on a Modern Passenger-Car Diesel Engine”, *Lubricants*, 7 (5), 39, doi:10.3390/lubricants7050039, (2019).

Kovach, J. T., Tsakiris, E. A., Wong, L. T., “Engine Friction Reduction for Improved Fuel Economy”, *International Congress & Exposition Detroit*, 820085, Michigan, 3-11, (1982).

Laad, M. ve Jatti, V. K. S., “Titanium oxide nanoparticles as additives in engine oil”, *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 30 (2), 116–122, doi:10.1016/j.jksues.2016.01.008, (2018).

Martyr, A. J. ve Plint, M. A., *Engine Testing Theory and Practice*, Burlington: Elsevier Ltd., 276-280, (2007).

Minami, I., “Molecular Science of Lubricant Additives”, *Applied Sciences*, 7 (5), 445, doi:10.3390/app7050445, (2017).

Müjdecı, S., “İçten Yanmalı Motorlarda Ticari Yağ Katkı Maddelerinin Sürtünme, Aşınma ve Motor Performansına Etkilerinin Deneysel Olarak Araştırılması”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2009).

Müjdecı, S. ve Kaleli, H., “Engine Oil Additives, Their Properties And Interactions”, *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 28, 138–149, (2010).

Padgurskas, J., Rukuiza, R., Prosyčėvas, I. ve Kreivaitis, R., “Tribological properties of lubricant additives of Fe, Cu and Co nanoparticles”, *Tribology International*, 60, 224–232, doi:10.1016/j.triboint.2012.10.024, (2013).

Paul, G., Hirani, H., Kuila, T. ve Murmu, N. C., “Nanolubricants dispersed with graphene and its derivatives: an assessment and review of the tribological performance”, *Nanoscale*, 11 (8), 3458–3483, doi:10.1039/C8NR08240E, (2019).

Richardson, D. E., “Review of Power Cylinder Friction for Diesel Engines”, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 122 (4), 506–519, doi:10.1115/1.1290592, (2000).

Song, X., Zheng, S., Zhang, J., Li, W., Chen, Q. ve Cao, B., “Synthesis of monodispersed ZnAl₂O₄ nanoparticles and their tribology properties as lubricant additives”, *Materials Research Bulletin*, 47 (12), 4305–4310, doi:10.1016/j.materresbull.2012.09.013, (2012).

Thottackkad, M. V., Rajendrakumar, P. K. ve Prabhakaran, N. K., “Tribological analysis of surfactant modified nanolubricants containing CeO₂ nanoparticles”, *Tribology-Materials Surfaces&Interfaces*, 8 (3), 125–130, doi:10.1179/1751584X13Y.0000000051, (2014).

Trivedi, K., Kothari, A., Parekh, K. ve Upadhyay, R. V., “Effect of Particle Concentration on Lubricating Properties of Magnetic Fluid”, *Journal of Nanofluids*, 7 (3), 420–427, doi:10.1166/jon.2018.1472, (2018).

Tung, S. C., McMillan, M. L., Becker, E. P. ve Schwartz, S. E., *Handbook Of Lubrication And Tribology*, Florida: CRC Press, 5-8, (2006).

Vadiraj, A., Manivasagam, G., Kamani, K. ve Sreenivasan, V. S., “Effect of nano oil additive proportions on friction and wear performance of automotive materials” *Tribology in Industry*, 34 (1), 3–10, (2012).

Wu, N., Hu, N., Zhou, G. ve Wu, J., “Tribological properties of lubricating oil with micro/nano-scale WS₂ particles”, *Journal of Experimental Nanoscience*, 13 (1), 27–38, doi:10.1080/17458080.2017.1405164, (2018).

Wu, Y. Y., Tsui, W. C. ve Liu, T. C., “Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives”, *Wear*, 262 (7–8), 819–825, doi:10.1016/j.wear.2006.08.021, (2007).

Xu, A., Tian, P., Wen, S., Guo, F., Hu, Y., Jia, W., Tian, Y., “Differences in Tribological Behaviors upon Switching Fixed and Moving Materials of Tribo-pairs including Metal and Polymer”, *Scientific Reports*, 7 (1), 13041, doi:10.1038/s41598-017-13262-x, (2017).

Xu, Y., Geng, J., Peng, Y., Liu, Z., Yu, J. ve Hu, X., “Lubricating mechanism of Fe₃O₄@MoS₂ core-shell nanocomposites as oil additives for steel/steel contact”, *Tribology International*, 121 (January), 241–251, doi:10.1016/j.triboint.2018.01.051, (2018).

Young, H. D. ve Freedman, R. A., *University physics with modern physics*, San Fransisco: Jim Smith, 146-149, (2015).

Yu, H., Xu, Y., Shi, P., Xu, B., Wang, X. ve Liu, Q. “Tribological properties and lubricating mechanisms of Cu nanoparticles in lubricant”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 18 (3), 636–641, doi:10.1016/S1003-6326(08)60111-9, (2008).

Zhang, B.-S., Xu, B.-S., Xu, Y., Gao, F., Shi, P.-J. ve Wu, Y.-X. “Cu nanoparticles effect on the tribological properties of hydrosilicate powders as lubricant additive for steel–steel contacts.” *Tribology International*, 44 (7–8), 878–886, doi:10.1016/j.triboint.2011.03.002, (2011).

Zhang, M., Wang, X., Liu, W. ve Fu, X. “Performance and anti-wear mechanism of Cu nanoparticles as lubricating oil additives”. *Industrial Lubrication and Tribology*, 61 (6), 311–318, doi:10.1108/00368790910988426, (2009).

Zhou, G., Zhu, Y., Wang, X., Xia, M., Zhang, Y. ve Ding, H., “Sliding tribological properties of 0.45% carbon steel lubricated with Fe₃O₄ magnetic nanoparticle additives in baseoil”, *Wear*, doi:10.1016/j.wear.2013.01.027, (2013).

8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mustafa ALVER

Doğum Yeri ve Tarihi : Alaçam 01.02.1982

Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Elektronik posta : mustafaalver@pau.edu.tr

İletişim Adresi : Pamukkale Üniversitesi Denizli Teknik
Bilimler Meslek Yüksekokulu Motorlu Araçlar Ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü
Otomotiv Teknolojisi Programı