

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

**NANO-GRAFEN OKSİT KATKILI MOTOR YAĞININ
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN VE MOTOR
PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖZGÜR ÇETİN

DENİZLİ, OCAK - 2021

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



**NANO-GRAFEN OKSİT KATKILI MOTOR YAĞININ
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN VE MOTOR
PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖZGÜR ÇETİN

DENİZLİ, OCAK - 2021

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Birimi tarafından 2019FEBE035 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.

ÖZGÜR ÇETİN

ÖZET

**NANO-GRAFEN OKSİT KATKILI MOTOR YAĞININ TRIBOLOJİK
ÖZELLİKLERİNİN VE MOTOR PERFORMANSINA ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÖZGÜR ÇETİN
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ÖZER CAN)**

DENİZLİ, OCAK - 2021

Günümüzde artan ulaşım faaliyetleri Dünya üzerindeki enerji kaynaklarının büyük bölümünü tüketmektedir. Farklı kaynaklarla üretilen enerjinin çok önemli bir bölümü mekanik sistemlerde oluşan sürtünmeyi yenmek için harcanmaktadır. İçten yanmalı motorlarda ise enerji kaybının ana etkenlerden birisi hareketli motor parçaları arasında meydana gelen sürtünme ve aşınmadır. Sürtünme ve aşınmayı en aza indirmek için çeşitli motor yağları kullanılmaktadır. Bununla birlikte, gelişen nanoteknolojik malzemelerden oluşan katkı maddelerinin motor yağlarına ilave edilerek motor yağının sürtünme özelliklerinin geliştirilmesi önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada 10W-40 tam sentetik motor yağına katkı maddesi olarak farklı miktarlarda ilave edilen grafen oksit (GO) tribolojik özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. GO nanoparikülü motor yağına 4 farklı oranda (0,5-1,0-1,5-2,0 mg/mL) katılarak, ultrasonik karıştırıcı yardımıyla homojen olarak karıştırılmıştır. Hazırlanan GO katkılı motor yağlarının sürtünme ve aşınma gibi tribolojik performansları disk üstü bilye mekanizmasında incelenmiştir. Ayrıca GO katkılı motor yağlarının ve baz motor yağının viskozite, viskozite indeksi, ısıl iletkenlik gibi fiziksel özellikleri standartlara uygun yöntemler kullanılarak belirlenmiştir.

Yapılan tribolojik çalışmalar sonucunda baz motor yağı içerisinde yağlama performansı en yüksek olan optimum GO konsantrasyonun 1,5 mg/mL GO içeren yağlayıcının olduğu belirlenmiştir. Triboloji testleriyle GO katkılı motor yağının baz motor yağına göre sürtünmeyi %17 ve aşınmayı %44 oranında azalttığı görülmüştür. Belirlenen katkı oranına sahip GO katkılı motor yağı ve baz motor yağı ile gerçek motor testleri yapılmıştır. Yapılan motor testleri sonucunda, GO katkılı motor yağının baz motor yağına göre sürtünmeye harcanan gücü ortalama %3,7 azalttığı, tork ve gücü arttırarak motorun mekanik verimini %1,47 oranında geliştirdiği görülmüştür. Bununla birlikte, özgül yakıt tüketiminin %2,6 oranında azalmasıyla daha ekonomik, daha dayanıklı ve daha az zararlı emisyon salınımı sağlayabilecek potansiyelde olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: İçten yanmalı motorlar, triboloji, nanopartiküller, motor yağı katkıları, grafen oksit (GO).

ABSTRACT

INVESTIGATION OF NANO-GRAPHENE OXIDE ADDED ENGINE OIL TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS AND THE EFFECTS ON ENGINE PERFORMANCE

MSC THESIS

ÖZGÜR ÇETİN

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

AUTOMOTIVE ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. ÖZER CAN)

DENİZLİ, JANUARY 2021

Increasing transportation activities today consume most of the energy resources in the World. A very important part of the energy produced by different sources is spent to overcome the friction in mechanical systems. One of the main factors of energy loss in internal combustion engines is the friction and wear between moving engine parts. Various engine oils are used to minimize friction and wear. However, it becomes important to improve the friction properties of the engine oil by adding the additives made up of developing nanotechnological materials to the engine oils.

In this study, the tribological properties of nano-graphene oxide (GO) added in different amounts as an additive to 10W-40 fully synthetic engine oil were experimentally investigated. GO nanoparticle was added to engine oil in 4 different proportions (0,5-1,0-1,5-2,0 *mg/mL*) and mixed homogeneously with the help of an ultrasonic mixer. The tribological performances such as friction and wear of the engine oils with GO additives were examined in the ball-on-disc mechanism. In addition, the physical properties such as viscosity, viscosity index, thermal conductivity of GO additive engine oils and base engine oils were determined using methods in accordance with the standards.

As a result of the tribological studies, it was determined that the optimum GO concentration in the base engine oil with the highest lubrication performance is the lubricant containing 1.5 *mg/mL* GO. With the tribology tests, it was seen that the engine oil with GO additives reduced the friction by 17% and the wear by 44% compared to the base engine oil. Real engine tests were carried out with GO-added engine oil and base engine oil with the specified additive ratio. As a result of the engine tests, it was observed that the engine oil with GO additives reduced the engine friction power spent on friction by an average of 3.7% compared to the base engine oil, and improved the mechanical efficiency of the engine by 1.47% by increasing break torque and power. However, it has been seen that it has the potential to provide more economical, more durable and less harmful emission by reducing the specific fuel consumption by 2.6%.

KEYWORDS: Internal combustion engines, tribology, nanoparticles, engine oil additives, graphene oxide (GO).

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	x
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Bilgisi	4
1.1 Çalışmanın Amacı	12
2. TRİBOLOJİ.....	13
2.1 Sürtünme	14
2.1.1 Sürtünme Çeşitleri	18
2.2 Yağlama.....	19
2.2.1 Yağlama Rejimleri	22
2.2.1.1 Sınır Yağlama.....	22
2.2.1.2 Karma (Karışık Yağlama)	23
2.2.1.3 Elasto-Hidrokinamik Yağlama (EHD).....	23
2.2.1.4 Hidrokinamik Yağlama.....	24
2.2.2 Yağlama Rejimleri ve Stribeck Eğrisi	25
2.3 Aşınma.....	29
2.3.1 Aşınma Mekanizmaları.....	31
2.3.1.1 Adhezyon (Yapışma) Aşınması	32
2.3.1.2 Abrazyon Aşınma.....	33
2.3.1.3 Korozyon (Tribokimyasal) Aşınması.....	34
2.3.1.4 Yorulma (Pitting) Aşınması	35
2.4 İçten Yanmalı Motorlar ve Triboloji	36
2.4.1 İçten Yanmalı Motorlarda Sürtünme	36
2.4.2 İçten Yanmalı Motorlarda Aşınma	37
2.4.3 Motor Parçaları Arasında Meydana Gelen Etkileşimler.....	38
2.4.3.1 Piston ve Silindir Bloğu Arasındaki Etkileşim	39
2.4.3.2 Segmanlar ve Silindir Bloğu Arasındaki Etkileşimler	40
2.4.3.3 Piston Pimi ve Piston Arasındaki Etkileşimler	41
2.4.3.4 Krank Mili ve Krank Mili Yatakları Arasındaki Etkileşimler	41
2.4.3.5 Kam Mili, Kam ve Supaplar Arasındaki Etkileşimler	42
3. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA KULLANILAN YAĞLAYICI	
 MADDELER VE ÖZELLİKLERİ.....	43
3.1 Motor Yağları	43
3.1.1 Sıvı Yağlayıcılar	45
3.1.1.1 Mineral Yağlar	45
3.1.1.2 Tam Sentetik Yağlar	46
3.1.1.3 Yarı Sentetik Yağlar.....	47
3.2 Yağlama Sistemleri	47
3.2.1 Yağlama Sistemi Çeşitleri	48
3.3 Motor Yağı Katkı Maddeleri ve Görevleri.....	48
3.4 İçten Yanmalı Motor Yağlarında Olması Gereken Genel Özellikler	50

4. İÇTEN YANMALI MOTOR YAĞLARI İÇİN NANOPARTİKÜL KATKILARI.....	53
4.1 Nanopartiküllerin Sınıflandırılması.....	53
4.2 Yağ Katkısı Olarak Nanopartiküller.....	54
4.3 Nanopartiküllerin Yağlama Mekanizmaları.....	55
4.3.1 Yuvarlanma / Rulman Mekanizması.....	56
4.3.2 Koruyucu Film Oluşturma Mekanizması.....	56
4.3.3 Parlatma (Pürüzsüzleştirme) Etkisi Mekanizması.....	56
4.3.4 Tamir (Kendi Kendini Onaran) Etki Mekanizması.....	56
4.4 Nanopartiküllerin Performans Parametreleri.....	57
4.4.1 Nanopartiküllerin Boyutu.....	57
4.4.2 Nanopartiküllerin Dağılımı.....	57
4.4.3 Nanopartikülün Şekli ve Yapısı.....	58
4.4.4 Nanopartiküllerin Konsantrasyonu.....	58
4.5 Grafen, Grafenin Özellikleri ve Grafen Oksit.....	59
5. TEST YÖNTEMLERİ.....	61
5.1 Sürtünme Ölçüm Yöntemleri.....	61
5.1.1 Disk Üstü Bilye (Ball On Disc) Test Yöntemi.....	62
5.2 Aşınma Ölçüm Yöntemleri.....	62
5.2.1 Ağırlık Kaybı Yöntemi.....	63
5.2.2 Kalınlık Farkı Yöntemi.....	63
5.2.3 İz Değişim Yöntemi.....	63
6. METERYAL VE METOD.....	64
6.1 Grafen.....	64
6.2 Grafen Oksit Sentezi.....	64
6.3 Motor Yağı.....	67
6.4 Grafen Oksit Katkılı Motor Yağının Hazırlanması.....	67
6.5 Viskozite Ölçümü.....	70
6.6 Viskozite İndeksi Hesaplamaları.....	73
6.7 Yoğunluk Ölçümü.....	74
6.8 Isıl İletkenlik Katsayısının Belirlenmesi ve Hesaplamalar.....	75
6.9 Ball On Disk Test Cihazı ve Çalışma Mekanizması.....	78
6.10 Troboloji Test Parametrelerinin Belirlenmesi.....	81
6.11 Aşınma Çaplarının Ölçülmesi.....	82
6.12 Aşınma Miktarının Belirlenmesi.....	84
6.13 SEM Analizleri.....	85
6.14 Motor Testi ve Sürtünme Hesaplamaları.....	86
6.14.1 Motor Teknik Özellikleri.....	86
6.14.2 Motor Test Dinamometresinin Özellikleri.....	87
6.14.3 Motor Test Koşulları.....	89
6.14.4 Motor Sürtünme Hesaplamaları.....	90
7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	97
7.1 GO'nun Baz Yağda Dağılım Kararlılığı ve Homojenliği.....	97
7.2 Viskozite ve Viskozite İndeksi.....	100
7.3 Yoğunluk Sonuçları.....	102
7.4 Isıl İletkenlik Sonuçları.....	104
7.5 Sürtünme Katsayısı ve Stribeck Eğrisi.....	108
7.6 Aşınma Miktarı Sonuçları.....	121
7.7 Yüzey Analiz Sonuçları.....	131
7.8 Motor Test Sonuçları.....	134

8. SONUÇ VE ÖNERİLER	147
9. KAYNAKLAR.....	153
10. ÖZGEÇMİŞ.....	163



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Tribolojik Sistem	13
Şekil 2.2: Tribolojik Sistemin Temel Yapı Taşları	14
Şekil 2.3: İtme Veya Çekme Kuvveti Etkisi Altındaki Cisimde Sürtünme Kuvvetinin Şematik Gösterimi.....	15
Şekil 2.4: Statik ve Kinetik Sürtünmenin Şematik Gösterimi.....	17
Şekil 2.5: Kayma, Yuvarlanma, Dönme ve Çarpma Hareketlerinin Şematik Gösterimi	17
Şekil 2.6: Stribeck Eğrisi ve Sürtünme Çeşitleri	19
Şekil 2.7: Bağlı Ömür ve Lamda Oranı	21
Şekil 2.8: Sınır Yağlama Mekanizması	23
Şekil 2.9: Elasto-hidrokinamik Yağlama Mekanizması	24
Şekil 2.10: Hidrokinamik Yağlama Mekanizması	25
Şekil 2.11: Yüzey Pürüzlülüğünün Stribeck Eğrisi Üzerindeki Etkisi	26
Şekil 2.12: Sürtünme Katsayısı ve Sommerfeld Sayısı.....	27
Şekil 2.13: Yağlama Rejimleri, Yağ Filmi Kalınlığı ve Stribeck Eğrisi.....	28
Şekil 2.14: Stribeck Eğrisi ve İçten Yanmalı Motor Bileşenleri.....	29
Şekil 2.15: Aşınma Türlerinin Çalışma Mekanizması	32
Şekil 2.16: Adhezyon Aşınması Çalışma Mekanizması	32
Şekil 2.17: İki ve Üç Parçalı Abrasyon Aşınması	33
Şekil 2.18: Yorulma aşınmasının oluşma mekanizması	35
Şekil 2.19: Yakıt Enerjisinin Kaybolduğu Alanlar	36
Şekil 2.20: Motorda Yakıttan Elde Edilen Enerjinin Dağılımı	37
Şekil 2.21: Bir Motorda Meydana Gelen Sürtünme Kayıpları	38
Şekil 2.22: Motorda Mekanik Sürtünme Kayıplarının Dağılımı	38
Şekil 2.23: Piston-Segman-Pim Arasındaki Sürtünmenin Dağılımı	39
Şekil 2.24: Segman Sürtünme Dağılımı.....	40
Şekil 3.1: Motor Yağı İçeriği	44
Şekil 3.2: Ham Petrol Damıtma Eğrisi	45
Şekil 3.3: Motordaki Tam Basınçlı Yağlama Sistemi.....	48
Şekil 4.1: Yağlayıcı Katkı Maddelerinin Zamansal Gelişimi	53
Şekil 4.2: Tribolojik Çalışmalar İçin Nanopartiküllerin Sınıflandırılması	54
Şekil 4.3: Nanopartiküllerin Yağlama Mekanizmaları	55
Şekil 4.4: Grafitin Diğer Formları.....	60
Şekil 5.1: Farklı Konfigürasyonlara Sahip Tribometrelerin Şematik Gösterimi.....	61
Şekil 6.1: Grafen Oksit Yapısının Hazırlanması.....	65
Şekil 6.2: Grafen Oksitin Fırında Kurutulması	65
Şekil 6.3: Grafen Oksit Levhası	66
Şekil 6.4: Grafen Oksitin Kurutulmadan Önceki ve Sonraki Durumları	66
Şekil 6.5: 1×10^{-4} g Hassasiyette Ölçüm Terazisi	67
Şekil 6.6: UP400S Ultrasonik Karıştırıcı ve Soğutmalı Karıştırma Kabı.....	68
Şekil 6.7: Ultrasonik Karıştırmadan Önce ve Sonra Grafen Oksit Katkılı Motor Yağının Görüntüleri	68
Şekil 6.8: Soğutucu Devirdaim Ünitesi ve Ultrasonik Karıştırma Cihazı	69
Şekil 6.9: Infrared Sıcaklık Ölçer AR5200	69

Şekil 6.10: Viskozite Ölçüm Cihazı.....	70
Şekil 6.11: Viskozite Ölçüm Cihazı Ölçüm Birimi ve Ölçüm Haznesi.....	70
Şekil 6.12: Isıtıcılı Manyetik Karıştırıcı.....	71
Şekil 6.13: Soğutucu Akışkanın -17 °C Olduğu Durum.....	71
Şekil 6.14: Viskozite Ölçüm Cihazı ve Gösterge Ünitesi.....	72
Şekil 6.15: Viskozite ölçümü ve Viskozite-Sıcaklık grafiği.....	72
Şekil 6.16: Yoğunluk Ölçüm Cihazı.....	74
Şekil 6.17: Isıl İletkenlik Katsayısı Ölçüm Ünitesi ve Bağlantıları.....	75
Şekil 6.18: Silindirik Ölçüm Ünitesi Kesit Görünümü.....	75
Şekil 6.19: Isı İletim Katsayısı Deney Düzenegi.....	76
Şekil 6.20: Kayıp Isı ve Sıcaklık Farkı Arasındaki Bağlantıyı Gösteren Cihaz Kalibrasyon Eğrisi	77
Şekil 6.21: Ball On Disk Test Cihazı.....	78
Şekil 6.22: Sürtünme Diski İmalat Teknik Resmi	79
Şekil 6.23: Aşındırma Cihazı Veri Kayıt Programı ESİT.....	80
Şekil 6.24: Ball On Disk Aşındırma Test Cihazı ve Veri Aktarım Sistemi.....	80
Şekil 6.25: Optik Devir Ölçüm Takometresi	81
Şekil 6.26: Aşınma Çapı belirlemek İçin Kullanılan Optik Mikroskop.....	82
Şekil 6.27: Bilye Tutucu Aparat ve Bilye	83
Şekil 6.28: Optik Mikroskop ve NIS-Elements D Programı.....	83
Şekil 6.29: 100 kat büyütülmüş optik görüntü ve çap belirleme (0,5 mg/ml GO, 40 N,140 d/dk).....	84
Şekil 6.30: 500 Kat Büyütülmüş Optik Görüntü (0,5 mg/ml GO, 40 N,140 d/dk).....	84
Şekil 6.31: Küresel Yapıdaki Aşınmanın Hesaplanması	85
Şekil 6.32: Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	85
Şekil 6.33: Antor 6 LD 400 Test Motoru.....	87
Şekil 6.34: Motor Test Dinamometresi.....	88
Şekil 6.35: Yakıt Ölçüm Sistemi ve Yakıt Hattı Bağlantıları	88
Şekil 6.36: Dinamometre Otomasyon ve Veri Aktarım Program Ekranı	89
Şekil 7.1: a) Karışımdan 3 Saat Sonra, b) Karışımdan 1 Gün Sonra, c) Karışımdan 8 Gün Sonra, d) Karışımdan 15 Gün Sonra, e) Karışımdan 21 Gün Sonra, f) Karışımdan 30 Gün Sonra Katkılı Yağın Görüntüleri (BY: Baz yağ, MK: Mekanik Karıştırma, UK: Ultrasonik Karıştırma).....	98
Şekil 7.2: Numunelerin Optik Mikroskop Görüntüleri, a) Baz Yağ, b) Mekanik Karıştırma İşlemine Tabi Tutulmuş Yağ, c) Ultrasonik Karıştırma İşlemine Tabi Tutulmuş Yağ.....	99
Şekil 7.3: Baz Yağ ve Farklı Konsantrasyonlara Sahip GO Katkılı Motor Yağlarının Viskozitelerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi.....	101
Şekil 7.4: Yağ Yoğunluğunun Sıcaklık İle Değişimi.....	104
Şekil 7.5: Baz Yağa ve Farklı GO Konsantrasyonlarına Sahip Katkılı Motor Yağlarının Isı İletim Katsayıları.....	106
Şekil 7.6: Tüm Sıcaklıklardaki Isı iletim Katsayılarının Ortalaması ve Baz Yağa Göre Isı İletimindeki Artış Miktarı.....	107
Şekil 7.7: 60 N – 10 d/dk ve $\eta V/F_n = 0,1$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği.....	109
Şekil 7. 8: 60 N – 42 d/dk ve $\eta V/F_n = 0,5$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği.....	110

Şekil 7.9: 60 N - 75 d/dk ve $\eta V/F_n = 0,9$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği.....	110
Şekil 7.10: 60 N - 110 d/dk ve $\eta V/F_n = 1,3$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği.....	111
Şekil 7.11: 40 N - 95 d/dk ve $\eta V/F_n = 1,7$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği.....	112
Şekil 7.12: 40 N - 117 d/dk ve $\eta V/F_n = 2,1$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği.....	112
Şekil 7.13: 40 N - 140 d/dk ve $\eta V/F_n = 2,5$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği.....	113
Şekil 7.14: 40 N - 167,5 d/dk ve $\eta V/F_n = 3,0$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği.....	113
Şekil 7.15: 20 N - 97,5 d/dk ve $\eta V/F_n = 3,5$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği.....	114
Şekil 7.16: 20 N - 112 d/dk ve $\eta V/F_n = 4,0$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği.....	115
Şekil 7.17: 20 N - 125 d/dk ve $\eta V/F_n = 4,5$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği.....	115
Şekil 7.18: 20 N - 140 d/dk ve $\eta V/F_n = 5,0$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği.....	116
Şekil 7.19: 20 N-150 d/dk ve $\eta V/F_n = 5,5$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği.....	116
Şekil 7.20: Yağlama Rejimlerine Göre Ayrılmış Stribeck Eğrisi	119
Şekil 7.21: Sınır Yağlama Bölgesinde Çalışan Bilyelerdeki Aşınma Miktarları.....	124
Şekil 7.22: Karma Yağlama Bölgesinde Çalışan Bilyelerdeki Aşınma Miktarları.....	126
Şekil 7.23: Hidrodinamik Yağlama Bölgesinde Çalışan Bilyelerdeki Aşınma Miktarları	128
Şekil 7.24: Tüm Yağlama Rejimlerindeki Ortalama Aşınma Miktarı	129
Şekil 7.25: Baz Yağ ve farklı GO Konsantrasyonlarına Sahip Katkılı Yağların Ortalama Sürtünme Katsayıları ve Aşınma Miktarları.....	130
Şekil 7.26: Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Miktarındaki Yüzdesel Azalmalar	131
Şekil 7.27: Aşınma Çapında Yüzey Morfoloji Analizi (SEM) ve Yüzey Element Analizi (EDS). a: Baz Yağda Çalışmış Bilye. b:1,5 mg/mL GO katkılı Yağda Çalışmış Bilye	133
Şekil 7.28: 40 °C Karter Yağ Sıcaklığında Yağların Motor Performansına Etkisinin Karşılaştırılması	136
Şekil 7.29: 80 °C Karter Yağ Sıcaklığında Yağların Motor Performansına Etkisinin Karşılaştırılması	137
Şekil 7.30: 100 °C Karter Yağ Sıcaklığında Yağların Motor Performansına Etkisinin Karşılaştırılması	138
Şekil 7.31: 80 °C Motor Yağ Sıcaklığında Baz Motor Yağı ve Katkılı Motor Yağının Motor Torku, Gücü , Termik Verimi ve Özgül Yakıt Tüketimine Etkisinin Karşılaştırılması.....	140
Şekil 7.32: 1700 d/dk Motor Devirlerinde ve Farklı Sıcaklıklarda Baz Motor Yağının ve GO Katkılı Motor Yağının	

Motored Sürtünme Gücüne ve Sürtünme Gücündeki Azalmaya Etkisinin Karşılaştırılması.....	142
Şekil 7.33: 2200 d/dk Motor Devirlerinde ve Farklı Sıcaklıklarda Baz Motor Yağının ve GO Katkılı Motor Yağının Motored Sürtünme Gücüne ve Sürtünme Gücündeki Azalmaya Etkisinin Karşılaştırılması.....	142
Şekil 7.34: 2800 d/dk Motor Devirlerinde ve Farklı Sıcaklıklarda Baz Motor Yağının ve GO Katkılı Motor Yağının Motored Sürtünme Gücüne ve Sürtünme Gücündeki Azalmaya Etkisinin Karşılaştırılması.....	143
Şekil 7.35: Tüm Motor Devirlerinde ve Farklı Motor Yağ Sıcaklıklarında Baz Motor Yağı ve GO Katkılı Motor Yağının Ortalama Motored Sürtünme Gücüne ve Sürtünme Gücündeki Azalmaya Etkisinin Karşılaştırılması.....	144
Şekil 7.36: Motor Hızı ve Motor Yağ Sıcaklığına Göre Mekanik Verimin Değişimi.....	146



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Grafen Katkılı Yağların Sürtünme ve Aşınmaya Etkileri.....	11
Tablo 2.1: Katı Cisimler Arasında Meydana Gelen Sürtünme Mekanizmaları.....	18
Tablo 2.2: Temas Yüzeyleri İçin Yumuşak ve Şiddetli Aşınma.....	30
Tablo 2.3: Endüstriyel Makinalarda Meydana Gelen Aşınma Türleri ve Yoğunlukları.....	31
Tablo 2.4: İçten Yanmalı Motorlarda Meydana Gelen Aşınma Türleri.....	31
Tablo 3.1: Yağların Moleküler Yapısı	47
Tablo 3. 2: Motor Yağı Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması ve Özellikleri ..	49
Tablo 6.1: Grafit Elemental Analiz Sonuçları (Aytaş 2016).....	64
Tablo 6.2: Grafenin Nanopartikülünün Bazı Özellikleri.....	64
Tablo 6.3: Grafen ve Grafen Oksit (GO) Özelliklerinin Karşılaştırılması.....	66
Tablo 6.4: Maximus LA 10W-40 Tam Sentetik Motor Yağı Tipik Özellikleri.....	67
Tablo 6.5: Yoğunluk Ölçüm Cihazı Teknik Özellikleri.....	74
Tablo 6.6: Disk Çeliği Element Analizi	79
Tablo 6.7: AISI 420-B Çelik Bilye Element Analizi	79
Tablo 6.8: Ball On Disk Testleri İçin Stribeck Eğrisine Göre Disk Dönüş Hızlarının Belirlenmesi	81
Tablo 6.9: Antor 6 LD 400 Test Motorunun Teknik Özellikleri	86
Tablo 7.1: Yağlayıcıların Kinematik Viskoziteleri ve Viskozite İndeksleri (VI).....	102
Tablo 7.2: Ortalama Sürtünme Katsayıları ($COF-\mu$).....	117
Tablo 7.3: Stribeck Eğrisi X değerine Göre Farklı Yağlayıcılarda Çalışan Bilyelere Ait Aşınma Çapları (μm)	122
Tablo 7.4: Sınır Yağlama Bölgesinde Çalışmış Bilyelerin Aşınma Çapları.....	123
Tablo 7.5: Karma Yağlama Bölgesinde Çalışmış Bilyelerin Aşınma Çapları.....	125
Tablo 7.6: Hidrodinamik Yağlama Bölgesinde Çalışmış Bilyelerin Aşınma Çapları.....	127

SEMBOL LİSTESİ

f_k	:	Kinetik Sürtünme Kuvveti
μ_k	:	Kinetik Sürtünme Katsayısı
f_n	:	Normal Sürtünme Kuvveti
λ	:	Yağ Filmi Kalınlığı
h_0	:	Minimum Yağ Filmi Kalınlığı
h	:	Ortalama Yağ Filmi Kalınlığı
R_{qc}	:	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
f	:	Sürtünme Katsayısı
η	:	Viskozite
W	:	Dönme Hızı
p	:	Temas Basıncı
S	:	Sommerfeld Sayısı
N	:	Dönme Hızı
R	:	Delik Yarıçapı
C	:	Radyal Boşluk
L	:	Uzunluk
V	:	Bağıl Hız
F_n	:	Sürtünme Yüzeyine Gelen Yük
K	:	Aşınma Katsayısı
Q	:	Archard Aşınma Matematiksel Denklemi
W	:	Aşınma Temas Yüğü
k	:	Isı İletim Katsayısı
H	:	Malzemenin Yüzey Sertliği
n_R	:	Çevrim Başına Devir Sayısı
D	:	Pistonun Yer Değiştirmesi
BP	:	Fren Gücü
d/dk	:	Devir/ Dakika
$BSFC$	:	Fren Özgöl Yakıt Tüketimi
mep	:	Ortalama Etkili Basınç
F_{mep}	:	Sürtünme Ortalama Etkili Basıncı
b_{mep}	:	Fren Ortalama Etkili Basıncı
i_{mep}	:	İndike Ortalama Etkili Basıncı
m_{mep}	:	Motored Ortalama Etkili Basınç
$(f_{mep})_m$	:	Motored Sürtünme Ortalama Etkili Basıncı
V_H	:	Toplam Strok Hacmi
n	:	Motor Devri
P_e	:	Motor Gücü
M_d	:	Motor Torku
η_m	:	Mekanik Verim
Be	:	Saatlik Yakıt Tüketimi
be	:	Özgöl Yakıt Tüketimi
η_t	:	Termik Verim
$\dot{m}_f$	:	Yakıt Debisi
Q_{HV}	:	Yakıt Alt Isıl Değeri
c_m	:	Ortalama Piston Hızı

ÖNSÖZ

Öncelikle tez çalışmam boyunca her şeyin daha iyi olması için çabalayan ve katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmanı hocam Doç. Dr. Özer CAN'a teşekkür ederim.

Tez dönemi boyunca daima yardımcı olan Doç. Dr. Erol İLERİ ve değerli çalışma arkadaşlarıma, yardımını esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Erkan ÖZTÜRK'e, grafen oksit katkısının hazırlanması konusunda destek olan Prof. Dr. Cem GÖK'e, viskozite ölçümünde yardımcı olan Prof. Dr. Nazım USTA'ya, ultrasonik karıştırma cihazı ile karışım hazırlamada destek olan Prof. Dr. Numan KURTULMUŞ ile Arş. Gör. İnan AĞIR'a ve Ball on disk cihazının kullanımında yardımcı olan Doç. Dr. İsmail OVALI'ya teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmam boyunca değerli vakitlerini aldığım, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve eşime teşekkürü bir borç bilirim.

1. GİRİŞ

İki temas yüzeyi arasında meydana gelen sürtünme, mekanik sistemlerin başa çıkmaya çalıştığı en eski sorunlardan biridir (Ali ve diğ.2019). Sürtünme, dünya üzerinde büyük miktarda enerjinin tükenmesine neden olan ve günlük hayatımızda oldukça yaygın gerçekleşen bir durumdur. Bununla birlikte, etkin bir şekilde kontrol edilemediği takdirde sürtünme; ciddi aşınmalara, verim kayıplarına ve mekanik arızalara sebep olmaktadır (Chen ve diğ. 2016). Ayrıca dikkat edilmesi gereken bir diğer konuda sürtünme ve aşınmayla boşa giden enerjiyi yeniden elde etmek için dünya üzerindeki toplam enerjinin yaklaşık olarak %23'ünün tekrar tüketilmesinin gerekmesidir (Mao ve diğ. 2018). Enerjinin günümüz koşullarında giderek daha kıymetli bir hal alması, enerji talebinin artması ve enerji kaynaklarının hızla tükenmesinden dolayı sürtünmeyi ve aşınmayı azaltmak hatta ortadan kaldırmak için gelişen teknoloji ile birlikte bu konu üzerindeki çalışmalar hız kazanmıştır (Chen ve diğ. 2016).

Birbiriyle çalışan motor parçaları arasında meydana gelen sürtünme ve aşınma içten yanmalı motorlarda enerji kaybının önemli bir nedenidir. İçten yanmalı motorlarda üretilen toplam gücün yaklaşık olarak %17-20'si sürtünmeyi yenmek için harcanmaktadır (Ali ve diğ. 2018^a). Mekanik sistemlerde meydana gelen sürtünmeyi azaltmanın en etkili yollarından biri hareketli parçalar arasında sıvı, katı veya gaz yapılarında yağlayıcıların kullanılmasıdır. Sıvı yağlayıcılar birbirine göre izafi hareket eden parçalar arasında yağlama filmi meydana getirerek metal-metal teması engeller, sürtünmeyi ve aşınmayı en aza indirir (Berman ve diğ. 2014). Yağlayıcıların kullanıldığı birçok alan bulunmaktadır. Günümüzde otomotiv motor yağları yağlayıcı pazarının yaklaşık olarak yarısını kapsadığından yağlayıcıların ana uygulama alanlarını motor yağları oluşturmaktadır (Ramón-Raygoza ve diğ 2016; Zulkifli ve diğ. 2017).

Yağlayıcı maddenin çalışma performansının büyük bölümü yağlayıcı içerisinde yer alan katkı maddelerinin özelliklerine bağlıdır (Chen ve diğ. 2016). Otomotiv yağlarına, performanslarını ve verimliliklerini arttırmak için antioksidanlar, aşınma önleyiciler, deterjanlar, sürtünme düşürücüler, dispersanlar ve daha birçok

özelliğe sahip katkı maddesi eklenmektedir. Fakat bu geleneksel katkıları içeren motor yağları yüksek sıcaklık ve yüksek basınçlarda sürtünme ve aşınma önleme görevlerini tam olarak yerine getiremezler. Bundan dolayı günümüzde makinelerin kullanım şartlarının değişmesi ve teknolojik gelişmelerle yüksek performansa sahip, verimli, düşük maliyetli ve çevre açısından olumsuz etkiye sahip olmayan yeni yağlayıcı katkı maddeleri için araştırmalar yapılmaktadır (Ramón-Raygoza ve diğ. 2016). Ayrıca günümüzde kullanılan geleneksel motor yağlama maddelerinin kullanılması, zararlı egzoz emisyonlarına ve zararlı partikül maddelere neden olduklarından çevre açısından büyük risk oluşturmaktadır. Bundan dolayı günümüzdeki araştırmalar yeni nesil yeşil katkı maddeleri olarak da bilinen çevre dostu katkı maddeleri üzerine oldukça yoğunlaşmıştır.

Günümüzdeki teknolojik gelişmelerle birlikte nanomalzeme alanı hızla gelişmekte ve çok daha küçük yapılar üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Nanoteknoloji alanındaki bu gelişmeler ile tribolojik sistemlerde büyük sorun teşkil eden sürtünme ve aşınmayı azaltmak için yağlayıcı katkı maddeleriyle ilgili birçok yeni çalışma yapılmaktadır. Yapılan çalışmalarda üzerinde yoğun olarak çalışılan bir diğer malzeme de grafen oksit (GO) nanomalzemesidir.

Grafen oksitin temel yapıtaşı olan grafen, 2004 yılında Rus bilim adamları tarafından keşfedilmiş ve o zamandan günümüze kadar birçok çalışmanın temel noktası olmuştur. İki boyutlu bir malzeme olan grafen, geleneksel malzemelerin sahip olmadığı benzersiz sürtünme ve aşınma özelliklerine sahiptir. İyi bilinen termal, elektrik, optik ve mekanik özelliklerinin yanı sıra grafen katı veya kolloidal sıvı yağlayıcı olarak da kullanılabilir. Yoğun şekilde paketlenmiş ve atomik olarak pürüzsüz yüzeyi üzerindeki kimyasal inertliği, aşırı dayanıklılığı ve etkileyici tribolojik davranışları grafenin başlıca olumlu özellikleridir. Bununla birlikte grafenin yüksek seviyedeki aşınma dayanımı ile malzeme aşınmasını engellemesi de dikkat çekici bir diğer özelliğidir (Kumar ve Wani, 2018; Eswaraiah ve diğ. 2011).

Grafen; sürtünmeyi azaltıp, sürtünmeden kaynaklı aşınmayı en aza indirerek hem araç motorlarının fazla yakıt tüketmesini hem de boşa harcanan sürtünme enerjisini korunmasını sağlayabilmektedir. (Kumar and Wani, 2018). Ayrıca bir yağlayıcı katkısı maddesi olarak oldukça iyi tribolojik özelliklere sahip GO, karbon

(C), hidrojen (H) ve oksijen (O) elementlerinden meydana geldiğinden aynı zamanda çevre dostu yeni nesil yeşil katkı maddeleri olarak kabul edilebilir (Chen ve diğ. 2016).

Mükemmel sürtünme azaltma ve aşınma engelleme mekanizmalarına sahip nanoyapıdaki grafen ve türevleri baz yağlayıcılar içerisinde katkı maddeleri olarak kullanılabilir. Nanopartiküllerin tribolojik sistemlerde, sürtünme ve aşınma mekanizmalarındaki rolleri şu şekildedir.

- 1- Grafen nanopartikülleri iki boyutlu yapısı ve çok küçük boyutuyla temas yüzeyleri arasına kolay bir şekilde girerek, verimli bir yağlama sağlarlar.
- 2- Temas yüzeyleri arasında bir yağlayıcı film tabakası oluştururlar. Bu tabaka iki temas yüzeyini birbirinden ayırmak için koruyucu bir film görevi görür.
- 3- Temas yüzeyinde yer alan iç bükey alanları ve çukurları doldurarak yüzeyi pürüzsüz hale getirir ve parlatırlar. Aynı zamanda hasar alan bölgelerde biriken nano partiküller, yüzey kusurlarını kapatarak yüzeyi onarma görevi görür.
- 4- İki boyutlu grafen, akışkan yönünde sırayla dizilerek yağlayıcının akışını kolaylaşmasını ve viskozitenin düşmesini sağlayarak sürtünmenin azalmasını ve yağlayıcının yük taşıma kapasitesinin artmasını sağlar.
- 5- Grafen yüksek kimyasal kararlılığı ile sıvılara ve gazlara karşı geçirimsizdir. Bundan dolayı sistemde yer alan yağlayıcının veya diğer aktif elementlerin yüzeylere kimyasal bir reaksiyon oluşturmasını önleyerek, korozyonunu ve oksidasyonu yavaşlatır (Xiao and Liu 2017).

Yukarıda tribolojik özellikleri bahsedilen ve günümüzde güncel bir çalışma alanı meydana getiren grafen oksit, eşsiz özellikleri ve yüksek tribolojik performansı ile merak uyandırmaktadır. Günümüzde kadar grafenin motor yağı katkısı olarak kullanımının sınırlı olmasının temel nedeni, yağ içerisinde grafenin yapılarının bir araya gelerek çökelti oluşturmalarında kaynaklı idi. Günümüzde grafen yapılarının bu sorunları oksijen içeren gruplardan yararlanılarak grafen yapılarının modifiye edilmesi veya fonksiyonel hale getirilerek dağılımının daha kararlı hale getirilmesi ile çözülebilmektedir (Ismail 2017).

Grafen oksitin (GO) tribolojik açıdan yüksek performansa sahip olması ve motor yağı katkısı olarak kullanılmasına engel oluşturan durumların ortadan kaldırılmasıyla bu yapı motor yağları için etkin bir nanopartikül katkı maddesi

olabilmiştir. Bu çalışmada da içten yanmalı motorlarda meydana gelen sürtünme ve aşınmaların azaltılabilmesi için motor yağı katkısı olarak grafen oksit nanopartikülünün tribolojik özellikleri araştırılacak ve gelecek çalışmalar için bir katkı sağlanacaktır.

1.1 Literatür Bilgisi

Gupta ve diğerleri, hidrojene hint yağının polietilen glikol (PEG200) türevi içerisinde farklı konsantrasyonlarda indirgenmiş grafen oksit (rGO) katkı maddesini ilave etmişlerdir. Çalışmadaki amaç, yağa katılan katı katkı maddelerinin konsantrasyonlarının önemli bir özellik olduğunu belirtmektir. Testlerde kullanılan rGO katkıları 5-6 nm kalınlığa sahiptir. Triboloji testleri öncesinde deneylerde kullanılacak yağ oda sıcaklığında 1 saat boyunca ve 25 KHz'lik ultrasonik frekansta karıştırılmıştır. Çalışmada 0,02-0,03-0,05-0,15-0,2-0,3-0,5 ve 1,0 mg/mL rGO konsantrasyonları ve saf baz yağ numuneleri kullanılmıştır. Testlerde 316 kalite 25 mm çapta paslanmaz çelik diske karşı 2 mm çapa sahip 100Cr6 çelik bilyesi kullanılmıştır. 0,5 cm/s doğrusal hız ve 500 mN yük şartlarında yapılan testler sonucunda 0.2 mg/mL rGO katkı maddesi eklenmiş PEG200 yağının, baz yağa kıyasla çelik-çelik yüzeyler arasındaki sürtünmeyi %70, aşınmayı ise %50 oranında azalttığı görülmüştür. Böylece düşük konsantrasyonlardaki nanopartikül katkılarının kayganlıkta etkisiz olduğu, sürtünmeyi ve aşınmanın düşük konsantrasyonlarda baz yağ tarafından domine edildiği görülmüştür. Tersine yüksek konsantrasyonlarda ise yağ tabakası içerisinde toplanan rGO nanopartiküllerinin bir katı gibi davranıp yağlamayı kötüleştirdiği belirtilmiştir (Gupta ve diğ. 2016).

Eswaraiah ve diğerleri, Modifiye Hummer yöntemiyle elde ettikleri grafen oksit (GO) nanopartiküllerinin motor yağı katkısı olarak performansını incelemişlerdir. Deneyler baz yağ ve 0,0125-0,025-0,04-0,05-0,06 mg/mL GO katkılı motor yağlarında yapılmıştır. Tribolojik testler için dört bilyeli test makinesi kullanılmıştır. Testlerde kullanılan bilye çapı 12,7 mm'dir. Sürtünme ve aşınma testleri, 600 rpm dönme hızında, 75 °C sıcaklıkta, 392 N'lik sabit yük altında, 60 dakikalık süreyle ve ASTM D5183 standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney sonucunda 0,025 mg/mL GO katkılı motor yağının baz motor yağına göre sürtünme

katsayısını %80, aşınmayı %33 azaldığı tespit edilerek, GO konsantrasyonundaki yoğunluğun artması sonucunda sürtünme yüzeylerinde meydana gelen topaklaşmanın yağlamayı olumsuz etkilediği belirtilmiştir (Eswaraiah ve diğ. 2011).

Kumar ve Wani, çevre dostu olarak kabul ettikleri grafen oksit'in (GO), yağlayıcı katkı maddesinin olarak temel tribolojik performansını incelemişlerdir. Çalışmada AISI 52100 yatak çeliğinden yapılmış 9,5 mm çapındaki çelik bilye malzemesinin, Al-25Si alaşımlı bir disk yüzeyinde sürtünme ve aşınması araştırılmıştır. Testler 5 farklı karışımda yapılmıştır. Bunlar; kuru, etanol, etanol + ağırlıkça %0,5 GO, SAE 20W-50, SAE 20W-50 + ağırlıkça %0,5 GO karışımlarıdır. GO nanopartikülünün etanol ve SAE 20W50 motor yağı içerisine iyi bir şekilde dağılabilmesi için 50 °C sıcaklıkta, ultrasonik bir karıştırıcı ile 40 kHz'de 2 saat boyunca karıştırılmıştır. Test sırasında test numuneleri 120m kayma mesafesinde, 2mm kayma stroğunda ve 5 N yük altında 16,66 dakika boyunca teste tabi tutulmuştur. Test sonucunda SAE 20W-50 motor yağına ağırlıkça %0,5 GO konsantrasyonun ilave edildiği yağlayıcı maddenin yağsız çalışmaya (kuru ortam) göre sürtünme katsayısı 0,22'den 0,057'ye düşürdüğü yani yaklaşık %26 azalttığı, aşınmayı ise %60-80 oranında azalttığı görülmüştür. Böylece GO'nun, AL-Sİ alaşımları için korozyona daha dayanıklı ve kullanımı kolay bir yağlayıcı katkısı olduğu ve otomobil yağlayıcı uygulamaları için gelecek vaat ettiğini bildirmişlerdir (Kumar ve Wani 2018).

Senatore ve diğerleri, grafen oksit (GO) nanopartiküllerinin mineral yağlar içerisindeki tribolojik davranışlarını, sınır, karışık ve elastohidrodinamik yağlama rejimleri için geniş bir çerçevede incelemişlerdir. Deneylerde baz yağ olarak SN 150 motor yağı ile katkı maddesi olarak da ağırlıkça %0,1 konsantrasyonunda GO kullanılmıştır. GO katkı maddesinin SN150 motor yağına iyi bir şekilde karışabilmesi için Turrax T25 dijital homojenleştirici ile 20 dakika karıştırılmıştır. Testler 25, 50, ve 80 °C sıcaklıklarda 30, 60 ve 90 N'luk yükler altında ve her bir test yaklaşık 1 saat süreyle yapılmıştır. Testlerin sonucunda baz yağa göre ağırlıkça %0,1 GO katkılı yağda sürtünme katsayısı 30 N'luk yük altında ortalama %20'den fazla azaldı. En iyi aşınma azalması ise 30 N'luk yük altında karışık ve elastohidrodinamik (EHL) yağlama rejimlerinde gözlemlenmiş ve aşınma miktarının ortalama %30 azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca elde ettikleri sonuçlar grafen oksit nanoparçalarının çelik yüzeyler arasındaki doğrudan teması önlediği ve böylece katkı maddesi olarak kullanıldığı baz

yağın sürtünme davranışını iyileştirmek için koruyucu bir film oluşturduğunu görülmüştür (Senatore ve diğ. 2013).

Rasheed ve diğerleri, API 20W-50 SN/CF motor yağına grafen nanoyağlayıcı katkı maddesinin eklenmesiyle, ısı transferi ve sürtünmenin nasıl etkilendiğini incelemişlerdir. Motor yağı içerisine 8, 12 ve 60 *nm* boyutlarında ve ağırlıkça %0,01 grafen ilave edilmiştir. Farklı grafen boyutları ve baz yağ ile birlikte toplamda 4 farklı yağ konsantrasyonu incelenmiştir. Yağ testleri dört toplu bir tribometre kullanılarak ASTM D 4172 standartlarında 1200 *rpm* devrinde ve 75 °C yağ sıcaklığında yapılmıştır. 100 saatlik motor çalışması sonucunda sürtünme için segmanlar incelenmiş ve çalışma boyunca ısı transferi kontrol edilmiştir. 80 °C grafen katkılı motor yağının baz yağa göre yağın ısı iletkenliğini %23, motorun ısı transfer hızını ise %70 artırdığı ve sürtünme katsayısını da %21 azalttığı tespit edilmiştir. G12 katkılı motor yağının yağlama performansının G8 ve G60'a göre daha iyi olduğu, termal performansının ise tüm katkılar için aynı olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan yağ analizine göre, grafenin motor yağları için önemli bir katkı maddesi olduğunu ve daha iyi anlaşılması için daha fazla geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymuşlardır (Rasheed ve diğ. 2016).

Mungse ve Khatri, kimyasal olarak fonksiyonel hale getirilmiş olan grafen oksit katkısını (GO), 10W-40 motor yağı katkı maddesi olarak kullanmışlardır. Deneylerde baz yağ ve baz yağı katkı maddesi olarak indirgemiş grafen oksit (rGO) ve rGO tabakalarının karboksil bölgelerinde amit bağlantısı ile hazırlanan işlevselleştirilmiş ODA-rGO nano katkıları kullanılmıştır. Deneyleri yapmak için dört toplu tribometre kullanılmıştır. Testler 392 *N* yük, 1200 *rpm*, 75 °C sıcaklıkta ve 1 saat süreyle yapılmıştır. Baz yağa 0,01-0,02-0,03-0,04 ve 0,05 *mg/mL* oranlarında GO, rGO ve ODA-rGO katkı maddeleri eklenmiştir. En iyi sürtünme sonuçları 0.02 *mg/mL* ODA-rGO konsantrasyonunda elde edilmiştir. Sürtünme katsayısında ortalama %35 ve aşınma çapında ortalama %36'lık bir azalma meydana gelmiştir. ODA-rGO tabakalarındaki uzun alkil zincirlerinin olması 10W-40 motor yağı içerisinde katkı maddesinin kararlı bir şekilde dağılmasını ve tribolojik performansının verimli kullanabilmesini sağladığı görülmüştür. Bu çalışma ile çelik bilyeler arasındaki sürtünme ve aşınma azaltılarak, enerji tasarrufunu sağlanabilmiştir (Mungse ve Khatri 2014).

Zhang ve diğerleri, grafen tabakalarını oleik asitle modifiye etmiş ve bu katkı maddesini yağlama yağları içerisine belli konsantrasyonlarda ekleyerek bir inceleme yapmışlardır. Baz yağ olarak bir dişli yağı olan PAO9 yağını kullanmışlardır. Oleik asitle modifiye edilmiş grafen nano parçacıkları ağırlıkça %0,01-0,02-0,04-0,06-0,08 ve 0,1 konsantrasyonlarında baz yağa eklenmiştir. Grafen nanopartiküllerinin PAO9 dişli yağı içerisinde homojen bir şekilde dağılması için katkılı yağlar 15 dk ultrasonik bir karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Sürtünme testler dört bilyeli bir tribometre test cihazında yapılmıştır. Bilye malzemesi GCr15 olup, çapları 12,7 mm ve sertlikleri ise 64-66 HRC'dir. Testler 400 N yük ve 1450 rpm dönme hızı koşulunda yapılmaktadır. Yapılan testler sonucunda en düşük sürtünme katsayısının ağırlıkça %0,02 grafen konsantrasyonunda, aşınma miktarının da en düşük ağırlıkça %0,06 grafen konsantrasyonunda elde edilmiştir. Sürtünme katsayısındaki toplam azalma %17 iken, aşınma miktarındaki toplam azalma %14 civarındadır. Konsantrasyon arttıkça sürtünme bölgelerinde yığılan nano grafen yapılarının aşındırıcı olarak işlev gördüğü ve sürtünme katsayısını arttırdığı tespit edilmiştir. Bunu ispatlayabilmek için ağırlıkça %0,06 ile %5 konsantrasyonlarında deneyler yapılmış ve %5 konsantrasyonda kuru sürtünme meydana geldiği, yüzeyde birçok çizilme olduğu ve aşınmanın arttığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, ağırlıkça %0,02 ile %0,06 grafen konsantrasyonlarının yağlayıcının tribolojik özelliklerini iyileştirdiği ve grafenin yağlayıcı katkı maddesi olarak ümit verici bir malzeme olduğunu belirtmişlerdir (Zhang ve diğ. 2011).

Guo ve Zhang, baz yağ olarak kullandıkları Polyalfaolefin-2 (PAO2) yağına ağırlıkça %0,05-0,1-0,5 konsantrasyonlarında grafen nanopartikülünü katarak bir araştırma yapmışlardır. Yağlayıcı içerisinde katkı maddelerinin iyi bir şekilde dağılabilmesi için 30 dakika ultrasonik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Testler dört toplu tribometre ile standartlar dahilinde 120-400 N'luk yükler altında, 100-400 rpm kayma hızında, oda sıcaklığında ve %25 nemli ortamda yapılmıştır. Test sonucunda ağırlıkça %0,05 grafen katkısı içeren PAO2 yağının sürtünme katsayısını ortalama %78 oranında azalttığını ve aşınma miktarını da 120 N yük ve 250 rpm dönme hızında %16 oranında azaltmıştır. Elde ettikleri sonuçlar ile saf yağlama maddesinin sürtünme ve aşınmayı önleyici özelliğinin grafen ilavesiyle geliştirildiği, mükemmel tribolojik özelliğinden dolayı grafenin, tibofilm yağlayıcı tabaka oluşturarak temas yüklerini taşıyabilen ve metal temas yüzeylerinde doğrudan teması önleyen bir yağlayıcı katkı maddesi olduğu görülmüştür. Sonuç olarak çok katmanlı grafen nanopartikülünün,

düşük sürtünme ve aşınma sağlamaya yönelik tribolojik uygulamalar için ilgi çekici bir yağlayıcı madde olduğunu bu çalışma ile gösterilmiştir (Guo ve Zhang 2016).

Patel ve diğerleri, saf baz yağ içerisine ağırlıkça %0,01 indirgenmiş grafen oksit (rGO) ilave ederek bir araştırma yapmışlardır. Araştırmada $2,0 \text{ mg/cm}^3$, $2,9 \text{ mg/cm}^3$ ve $7,5 \text{ mg/cm}^3$ gibi farklı yoğunluklara sahip rGO malzemesi kullanılmıştır. Saf yağ ile katkı maddeleri önce mekanik bir karıştırıcı ile en az 20 dakika karıştırılmış ve ardından yine 20 dakika boyunca ultrasonik bir karıştırıcıda karıştırılmıştır. Her bir test dört toplu bir tribometrede; 1200 rpm devir, 147 N yük, $75 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık ve 20 dakika süre ile yapılmıştır. Testler sonucunda 2.0 mg/cm^3 yoğunluğa sahip rGO konsantrasyonunun saf yağa göre sürtünme katsayısını %6,3 ve aşınma miktarını da %10,63 oranında azalttığı görülmüştür. SEM testleri sonucunda rGO'nun yüzeyler arasını tribofilm ile kapladığını ve metal-metal yüzeyler arasındaki sürtünmeyi önleyip, yüksek yüklerde bile aşınmayı azaltacağı görülmüştür. Ayrıca test sonucunda rGO'nun baz yağa göre sürtünmeyi ve aşınmayı azaltıp daha yüksek konsantrasyonlarda daha iyi sonuç alınabileceği belirtilmiştir (Patel ve diğ. 2019^b).

Omrani ve diğerleri, motor yağlamada tribolojik açıdan popüler olan kanola (kolza) yağı içerisine %0,3-0,5-0,7 ve 1 konsantrasyonlarında grafit ve grafen ilave ederek araştırma yapmışlardır. Testlerde otomotiv motor pistonlarının imalatında sıklıkla kullanılan Alüminyum 2024 malzeme seçilmiştir. Katkı maddelerini baz kanola yağı içerisine oda sıcaklığında çalkalama yöntemiyle ve $60 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta, 2 saat ultrasonik yöntemle homojenize dağıtılmıştır. Tüm testler pin on disk tribometre test cihazında yapılmış, çalışmalar 10 N yük, 20 mm/s kayma hızı, 1500 m kayma mesafesi ve oda sıcaklığı şartlarında yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda ağırlıkça %0,7 grafen nanopartikülü içeren kanola yağının diğer katkılı yağlara ve baz yağa göre daha iyi performans sergilediği, sürtünme katsayısını %26, aşınma miktarını da %83 azalttığı gösterilmiştir. Genel olarak test varyasyonlarında grafenin motor yağının tribolojik özellikleri geliştirmek için grafitten daha etkili olduğu tespit edilmiş ve bunun nedeninin de nano boyutlarda olan grafen yapısının temas halinde çalışan yüzeyler arasına kolay bir şekilde nüfuz edebilme kabiliyetinin grafitten daha iyi olmasına bağlanmıştır. Ayrıca çalışmada katkı maddesi konsantrasyonunun tribolojik açıdan önemli olduğu ve baz yağa aşırı katkı maddesi ilavesiyle yağda topaklaşma oluştuğu, bundan dolayı yağlamanın kötüleştiği belirtilmiştir (Omrani ve diğ. 2019).

Patel ve Kiani, indirgenmiş grafen oksit (rGO) nanopartiküllerinin konuldukları baz yağın tribolojik özelliklerinin doğrudan etkilediğini analiz etmek için baz yağı %99,9 saflıkta seçmişlerdir. Baz yağ içerisine ağırlıkça %0,01-0,05 ve 0,1 konsantrasyonunda rGO katkı maddesi ilave edilmiştir. rGO'nun baz yağ içerisinde homojen bir şekilde dağılabilmesi için 20 dk mekanik bir karıştırıcıda ardından 10 dakika da ultrasonik bir karıştırıcı da karıştırılmıştır. Testler disk üstü bilye (Ball on disk) cihazında yapılmış, sürtünme çifti olarak SS440C malzemeden yapılmış 6mm çapta bilye ve AISI 316 L malzemeden yapılmış 50 mm çapta paslanmaz çelik disk kullanılmıştır. Tüm deneylerde 30 N yük, 150 rpm dönme hızı, 24 °C ortam sıcaklığı, %40 oranda nemli ortam ve test süresi olarak da 20 dk parametreleri kullanılmıştır. Test sonucunda ağırlıkça %0,05 rGO konsantrasyonu, sürtünme katsayısında %51,85'lik bir azalma ve aşınma miktarında da yaklaşık %50'lik bir azalma ile en iyi konsantrasyon olarak belirlenmiştir. Yüksek konsantrasyonda parçacıkların zamanla kabın alt bölgelerinde biriktiği görülmüştür. Bundan dolayı ağırlıkça %0,1 konsantrasyonundan daha fazla nano yağ katkılarının baz yağ içerisine iyi bir şekilde dağıtılamadığı ve yüksek oranlardaki katkıları baz yağ içerisinde dağıtabilmek için dağıtıcı maddelerin kullanılması gerektiği uygun görülmüştür (Patel ve Kiani 2019^a).

Zhe ve diğerleri, yapısında yalnızca karbon (C), hidrojen (H) ve oksijenin (O) yer aldığı ve çevre dostu olarak kabul edilen grafen oksit (GO) nanopartikülünün bir yağ katkısı olarak performansını incelemişlerdir. Baz yağ olarak doğalgazdan elde edilmiş bir motor yağı GTL8 kullanılmıştır. Baz motor yağına ağırlıkça %0,01 ile %5 konsantrasyonunda GO katkı maddesi eklenmiştir. GO katkı maddelerinin motor yağına iyi bir şekilde dağılmasını sağlamak için katkılı yağ 1 saat boyunca ultrasonik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Testlerde düzlemsel sürtünme hareketi yapan disk üstü bilye (ball on disk) cihazı kullanılmıştır. Testler 100 N yük ve 50 °C sıcaklık şartlarında yapılmıştır. Test sonucunda ağırlıkça %0,5 GO konsantrasyonu içeren katkılı motor yağının sürtünme katsayısını %10 ila %20 oranında düşürdüğü bulunmuştur. Ağırlıkça %1 konsantrasyon oranına kadar katkı arttıkça sürtünme katsayısının azalacağı fakat bu orandan sonra sürtünme katsayısının çok az oranda azalacağı ve ağırlıkça %0,5'ten az olduğu durumlarda testler arasındaki farkın ihmal edilebilecek kadar az olduğu belirtilmiştir. Ayrıca yağlama maddesinin çalışma sıcaklığı aralığının GO ile arttığı ve optimize edilmiş GO nano katkı maddesi konsantrasyonunun ağırlıkça %5 olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Chen ve diğ. 2016).

Ali ve diğerleri, otomotiv motorlarında enerji tasarrufu sağlamak ve egzoz emisyonlarını azaltmak amacıyla geliştirmiş oldukları grafen (Gr) nano yağlama maddesini kullanarak motor yağının tribolojik davranışlarını iyileştirmek için çalışma yapmışlardır. Baz yağ olarak Castrol EDGE Professional (5W30) motor yağı kullanılmıştır. Grafen nanopartikülü baz yağ içerisine ağırlıkça %0,03-0,2-0,4 ve 0,6 konsantrasyon oranlarında katılmıştır. Baz yağ içerisinde katkı maddesinin homojen bir şekilde dağıtılabilmesi için 4 saat mekanik bir karıştırıcıda katkılı yağ karıştırılmıştır. Yağ ve motor testleri sonucunda baz yağa ağırlıkça %0,4 konsantrasyonda grafenin katıldığı durumda en iyi sürtünme ve aşınma sonuçlarına ulaşılmıştır. Bu durumda sürtünmedeki gelişim baz yağa göre %29-35 oranında, aşınmadaki azalma ise %22-29 oranında olmuştur. Genel motor sürtünmesi %6 oranında azaltılırken gerçek motor torku ve gücü %7 ila 10 arasında arttırılmıştır. Ayrıca toplam kümülatif yakıt kütlesi %17 oranında azalırken egzoz emisyonları referans yağa kıyasla %2,79 ila 5,42 oranında azalmıştır (Ali ve diğ. 2018^a).

Paul ve diğerleri, grafen ve türevleriyle oluşturulan nanopartikül katkılı motor yağlarının tribolojik performansının detaylı bir şekilde incelemesini yapmışlardır. Lamel yapıli grafenin mükemmel özellikleri ile temas yüzeyleri arasında sürtünme ve aşınmanın azaltılmasına yardımcı olduğu gösterilmiştir. Nanopartikül katkılı yağlama maddelerinin tribolojik performansının dispersiyon kararlılığı, katkı maddesi morfolojisi, katkı maddesi konsantrasyonu, katkılı yağ test koşulları, katkı maddesi katmanlarının sayısı gibi birçok parametreye bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Grafen nanopartiküllü yağlama maddelerinin tribolojik performansının ise büyük ölçüde katkı maddesi konsantrasyonu, grafen katmanlarının sayısı, uygulanan yük ve kayma hızı gibi faktörler tarafından kontrol edildiğı bildirilmiştir. Ayrıca katkı maddeli yağların performansının belirlenmesinde motor yağlama durumlarından sınır, karma ve hidrodinamik yağlama rejimleri gibi tüm yağlama aralığı için oluşturulan Stribeck eğrisi, sürtünme değişiminin bir görünümünü oluşturduğu ve bununda farklı çalışmaların karşılaştırılmasına yardımcı olduğu öngörülmüştür (Paul ve diğ. 2019).

Ayrıca günümüzde yoğun olarak çalışılan, grafen ve türevleriyle hazırlanan katkılı yağlayıcılara ait diğer çalışmalar ve performansları Tablo 1.1’de görölmektedir.

Tablo 1.1: Grafen Katkılı Yağların Sürtünme ve Aşınmaya Etkileri

Sıra No.	Baz Yağ	Nanopartikül Madde	Boyut	Konsantrasyon	Sürtünme Katsayısındaki Değişim	Aşınma Çapındaki Değişim	Kaynak
1	PEG	rGO	5-6 μm	0.02 mg/ml	%70	%50	B. Gupta ve diğ. 2016
2	-	GO	< 2 nm	0.025 mg/ml	%80	%33	Eswaraiah ve diğ. 2011
3	SAE 20W-50	GO	-	Ağırlıkça %0,5	%26	%60-80	Kumar ve Wani, 2018
4	SN 150	GO	-	Ağırlıkça %0,1	%16	%30	Senatore ve diğ. 2013
5	API 20W-50 SN/CF	Grafen	8-12-60 nm	Ağırlıkça %0,01	%21	-	Rasheed ve diğ. 2016
6	SAE 25W-50	MLG-Cu	-	Ağırlıkça %0,5	%63	%35	Ramón-Raygoza ve diğ. 2016
7	SAE 10W-40	ODA-rGO	-	0,02 mg/ml	%35	%36	Mungse ve Khatri, 2014
8	PAO9	Grafen	-	Ağırlıkça %0,02-0,06	%17	%14	Zhang ve diğ. 2011
9	PAO2	Grafen	10 μm	Ağırlıkça %0,05	%78	%16	Guo ve Zhang, 2016
10	Hidrolik Yağı	GO	-	Ağırlıkça %1	%27,9	%14,1	Mao ve diğ. 2018
11	-	rGO	-	Ağırlıkça %0,01	%6,3	%10,63	Patel ve diğ. 2019 ^b
12	Kanola Yağı	Grafen	10-25 μm	Ağırlıkça %0,7	%26	%83	Omrani ve diğ. 2019
13	Saf Yağ	rGO	-	Ağırlıkça %0,05	%51,85	%50	Patel ve Kiani, 2019 ^a
14	GTL8	GO	-	Ağırlıkça %0,5	%10-20	-	Chen ve diğ. 2016
15	SN 350	MGP	10-15 nm	Ağırlıkça %0,075	-	-	Lin ve diğerleri, 2011
16	5W-30	Grafen	3-10 nm	Ağırlıkça %0,4	%29-35	%22-29	Ali ve diğerleri, 2018 ^a
17	İyonik Sıvı	GO	10-50 nm	Ağırlıkça %0,2	-	%20	Kinoshita ve diğerleri, 2015
18	PAO10-TMP	GNP	-	Ağırlıkça %0,05	%5	%15	Azman ve diğerleri, 2016
19	SN500	-	-	Ağırlıkça %0,05	-	-	Cheng ve diğerleri, 2017

1.1 Çalışmanın Amacı

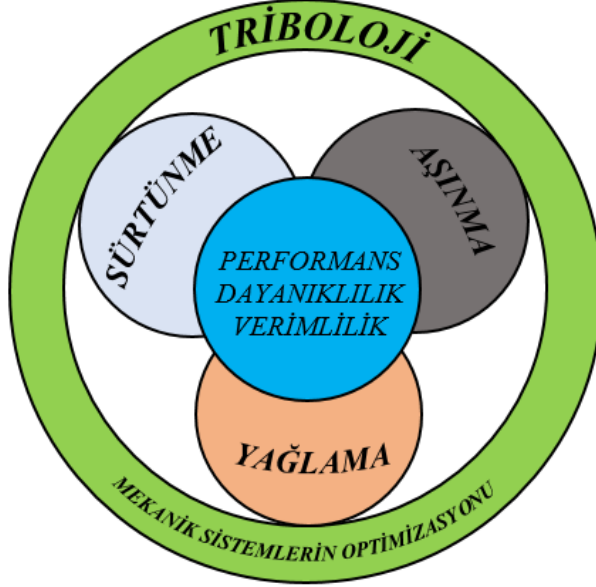
Bu tezin amacı oleik asitle modifiye edilmiş farklı konsantrasyonlardaki GO nano partikülünün 10W-40 tam sentetik baz motor yağına katkı maddesi olarak eklenmesiyle ortaya çıkan tribolojik etkilerin değerlendirilerek, en yüksek performansı gösteren GO konsantrasyonunun belirlenmesi ve bu katkı oranı ile hazırlanmış olan GO katkılı yağın motor performansını nasıl etkilediğini motor deneyleriyle tespit etmektir.

Bu kapsamda, tribolojik olarak yüksek performansa sahip olduğu bilinen GO katkısının, motor yağı içerisine farklı konsantrasyonlarda (0,5-1,0-1,5-2,0 mg/mL) eklendikten sonra sürtünme ve aşınma özellikleri bir disk üstü bilye (Ball on disk) ile incelenmiştir. Katkılı motor yağları ve baz motor yağının sürtünme sonuçları yağlayıcıların performanslarının belirlenmesinde kullanılan Stribeck eğrileri üzerinde değerlendirilmiştir. Bir yağlayıcının temel özelliklerini oluşturan viskozite, viskozite indeksi, yoğunluk ve ısı iletkenlik gibi karakteristikler de bu kapsamda ölçülmüştür. Ayrıca disk üstü bilye yöntemiyle sürtünmeye tabi tutulan bilyelerin üzerindeki aşınma çapları optik mikroskopla belirlenerek, yağlayıcı içerisindeki GO nanopartikülünün çalışma mekanizması taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektrometreleri (EDS) kullanılarak tespit edilmiştir.

Deneyler ve araştırmalar sonucu baz yağ için optimum GO konsantrasyonu belirlenmiş ve bu GO konsantrasyonuna sahip katkılı motor yağı ve baz motor yağı içten yanmalı tek silindirli bir deney motorunda; tam yükte, farklı motor devirlerinde (1700-1900-2200-2500-2800 d/dk) ve farklı motor yağı sıcaklıklarında (40-50-60-70-80-90-100 °C) deneyler yapılmıştır. Ardından aynı test koşullarında motorda güç kaybına neden olan sürtünme kayıplarını bulabilmek için yanmasız motor dinamometre tarafından tahrik edilerek doğrudan motor parçaları üzerindeki sürtünme gücü ölçülmüştür. Elde edilen bulgular baz motor yağı ve GO katkılı motor yağı arasında karşılaştırılarak nano GO katkı maddesinin motor performansına ve verimliliğine etkileri tartışılmıştır.

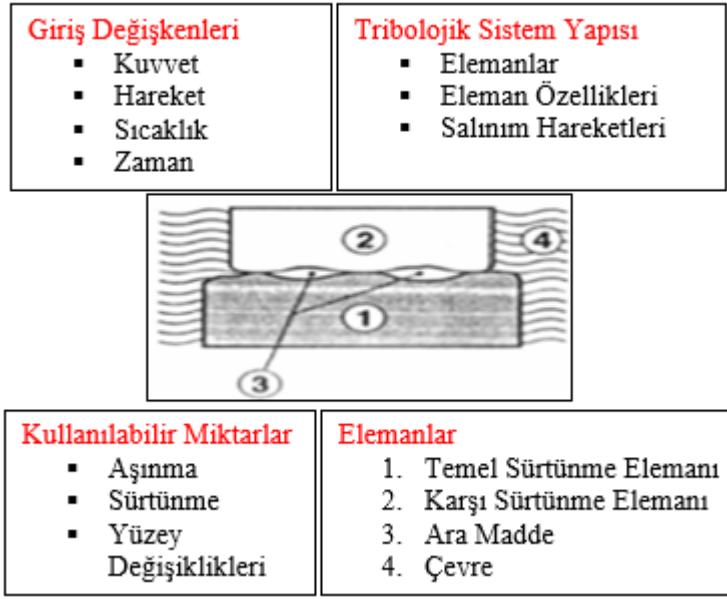
2. TRİBOLOJİ

Triboloji, birbirine göre bağıl hareket eden ve yapılan işten dolayı temas halindeki yüzeylerde meydana gelen sürtünme, aşınma ve yağlama konularını Şekil 2.1’de gösterildiği gibi beraber ele alarak inceleyen bilim dalıdır. Tribolojide hedef, birbiri ile temas halinde çalışan parçaların yüzeylerinde meydana gelebilecek sürtünmeyi ve bundan kaynaklı oluşan aşınmayı en aza indirmek veya mümkünse çalışmaya uygun bir şekilde yok etmektir. Böylece hareket halinde çalışan mekanizmalarda meydana gelecek kayıpları azaltarak maksimum performans sağlanacak ve malzeme kayıplarını azaltılarak makine ömrü uzatılacaktır (Aydın 2015).



Şekil 2.1: Tribolojik Sistem (Aydın 2015)

Triboloji temel olarak sürtünme, aşınma ve yağlama konularını içerirken birçok alt sistemle de ya doğrudan ya da dolaylı olarak ilgilenir. Tribolojik bir sistemden bahsedebilmek için sistemde olması gereken bazı özellikler mevcuttur. Sürtünme ve aşınmanın kontrol edilebileceği bir temel sürtünme elemanı, temas halinde olabilecek karşı sürtünme elemanı, bu iki yapının arasında yer alan bir ara madde ve bunun dışında hareket, yük, çevre gibi birçok yapı Şekil 2.2’de gösterildiği gibi tribolojik bir sistemin temel yapı taşlarıdır (Aydın 2015).



Şekil 2.2: Tribolojik Sistemin Temel Yapı Taşları (Aydın 2015)

Birbiriyle temas halinde ve bağıl hareket eden iki temas yüzeyi arasında yüzey düzensizliklerinden ve basınç kuvvetlerinden dolayı sürtünme meydana gelmektedir. Sürtünmenin ortaya çıkması ile birlikte sistemde sıcaklık artışı, aşınma ve harekete karşı direnç kuvvetlerinden kaynaklı enerji kaybı oluşmaktadır. İki temas yüzeyi arasında meydana gelen bu olayların etkisin en aza indirmek için gerekli tedbirlerin başında yağlama gelmektedir. Yapılan araştırmalara göre dünya üzerindeki temas halinde çalışan mekanizmaların %70'inin bozulmasının temel nedeni aşınmadır (Karabacak 2013). Aşınma, sürtünmenin doğal bir sonucu olarak meydana gelmektedir. Sürtünme, aşınma ve enerji kayıplarının etkisiyle maddi olarak kayıplar artmaktadır. Bundan dolayı sürtünme, aşınma ve yağlama sistemleri bir bütün olarak ele alınıp incelenmekte, bu konudaki çalışmaların makine elemanları için büyük öneme sahip olduğu bilinmektedir.

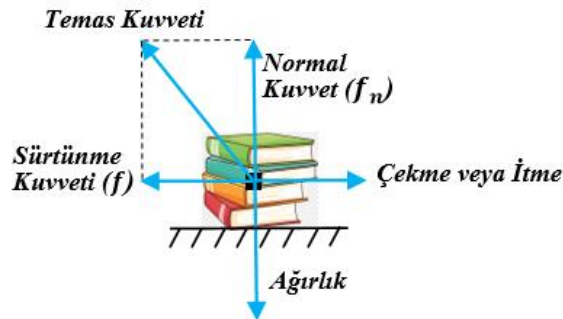
2.1 Sürtünme

Sürtünme harekete karşı bir direnç kuvveti olarak tanımlanır (Timur 2017). Sürtünme anlaşılması kolay olmayan karmaşık bir olgudur. Hareketi engellemesinin yanı sıra sürtünme hareket oluşumunu mümkün kılmaktadır. Sürtünmesiz sağlam bir tutunma ve tutunmadan uzak bir hareket oluşumu da söz konusu değildir (Basshuysen ve Schäfer, 2004).

Temas eden cisimler arasında meydana gelen sürtünme, hareketi başlatmak veya sürdürmek için aşılması gereken kuvvet ve göreceli hareket sırasında harcanan enerji olarak kendini gösterir. Sürtünme terimi, göreceli hareket halindeki malzemeler veya gövdeler için kademeli kinetik enerji kaybını tarif etmektedir. Mühendislik açısından sürtünme, ısı olarak yayılan enerji atığının önemli bir nedeni olup, bileşen ve ekipman arızasının önemli bir etkenidir (Bermúdez ve Jimies, 2011).

DIN 50281'e göre, birbiri üzerinde kayarak hareket eden, yuvarlanan veya kaymalı yuvarlanan elemanların izafi hareketlerini durmaya zorlayan ya da engelleyen dirence sürtünme denmektedir. Sürtünme çoğunlukla olumsuz bir etki gibi görünse de bazı durumlarda olması istenen bir olaydır. İçten yanmalı motorlarda motordan elde edilen gücün kavrama tertibatı ile diğer mekanizmalara aktarılması ve fren esnasında aracın durdurulabilmesi için sürtünme olması istenilen bir durumdur (Aydın 2015). Sürtünme triboloji biliminin temel bileşeni olup enerji kaybının ve makine elemanlarının hareketli temas yüzeylerinde aşınmanın temel kaynağıdır (Rebai 2014).

Sürtünme genelde sayısal olarak küçük değerlerle karşımıza çıksa da pratik olarak devamlı var olan bir durumdur. Sürtünme direncini oluşturan değişkenler oldukça fazla olmakla birlikte, değişkenlerin oluşturduğu etkiler bu direnç üzerinde çok fazla farklılık göstermektedir. Sürtünme durumunda olan maddelerin arasındaki hareketin türü, fiziksel ve kimyasal durumlar, maddeler arasında bir ara malzemenin olup olmaması, ortam şartları ve çalışma koşulları gibi değişkenler zaten kendi içerisinde karmaşık olan bu sistemi daha da karmaşık hale getirmektedir (Young ve diğ, 2013).



Şekil 2.3: İtme Veya Çekme Kuvveti Etkisi Altındaki Cisimde Sürtünme Kuvvetinin Şematik Gösterimi (Aydın 2015)

Sürtünme bir yanıttır ve her zaman hareket yönüne karşıdır, bu nedenle bir cismin göreceli hareketini korumak için gereken kuvvet kinetik sürtünme kuvveti ve hareketi başlatmak için gerekli olan kuvvet ise statik sürtünme kuvvetidir (Rebai 2014). İki yüzey temas halindeyken mutlaka fiziksel ya da kimyasal olarak bir etkileşime sahiptir. Bu etkileşimler sürtünmenin ana nedenini oluştururlar. Sürtünme temel olarak statik ve kinetik (dinamik) olarak iki sınıfa ayrılabilir. Burada statik sürtünme temas eden yüzey hareket etmiyor iken yani sürtünmenin olmadığı durumdur. Kinetik sürtünme ise temas eden yüzeyin hareket etmesiyle oluşan sürtünmeyi ifade etmektedir (Timur 2017).

İki cismin arasındaki bağıl hareketin sonucunda kinetik terimi ortaya çıkar. Kinetik sürtünme kuvvetinin büyüklüğü cisme etki eden normal kuvvetin artmasıyla büyüyecektir. Örneğin Şekil 2.3’de olduğu gibi kitap dolu bir kutu yerde sürüklenir ise, kutuda ne kadar çok kitap taşınırsa kutuyu sürüklemek o derece zorlaşacaktır. Burada kitap sayısı çoğaltılarak kutu ağırlığının artması yani normal kuvvetin artması sağlanmıştır. Normal kuvvetin artmasıyla da sürtünme kuvvetinin de artacağı ifade edilmiştir. Dolayısı ile sürtünme kuvveti ve normal kuvvet arasında aşağıdaki gibi bir ilişki ortaya çıkmaktadır (Aydın 2015; Young ve diğ. 2013).

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

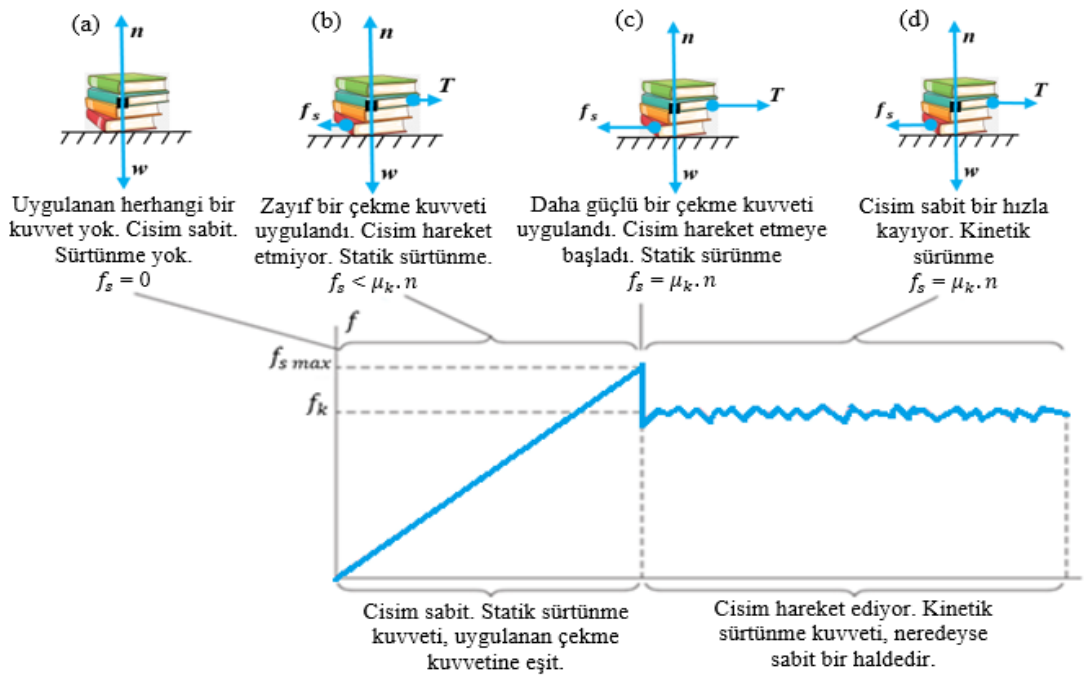
Burada f_k kinetik sürtünme kuvvetini, μ_k kinetik sürtünme katsayısını ve f_n ise normal sürtünme kuvveti olarak adlandırılır. μ_k sürtünme kuvvetinin kinetik sürtünme katsayısına oranı olduğundan birimsizdir.

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

Yüzey kayganlaştıkça μ_k sayısı küçülmektedir. İki katı cisim birbirini üzerinde kayma hareketi meydana getirirken bu iki temas yüzeyi arasında sürekli olarak bağlar oluşmakta ve kopmaktadır. Yüzeyler arasında oluşan bu bağların sayısı daima değişken olduğu için bu bölgede meydana gelen kinetik sürtünme kuvveti ve kinetik sürtünme katsayısı da daima değişken olacaktır (Young ve diğ. 2013). Sürtünme kuvveti, iki cisim arasında bağıl hareket olmasa bile oluşabilmektedir. Herhangi bir cisim temas yüzeyi üzerinde hareket ettirmeye çalıştığımızda hareket etmeyebilir. Bunun nedeni hareket etmeye çalışan cisim ile yüzey arasında cisme tatbik edilen

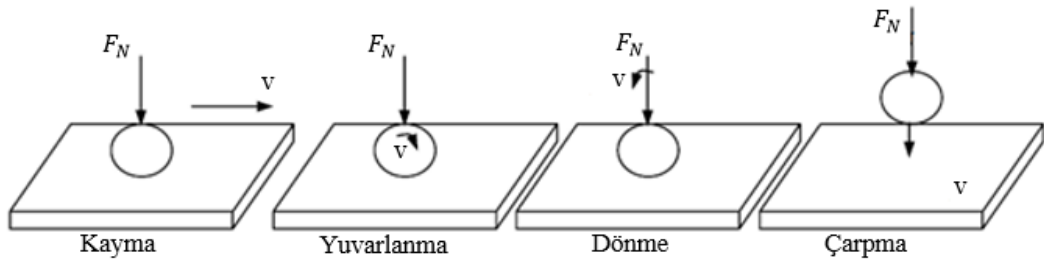
kuvvet ile eşit veya daha büyük ve hareket ettirilmek istenen yöne zıt yönlü bir sürtünme kuvvetinin var olmasıdır. Bu şekilde meydana gelen sürtünme kuvvetine statik sürtünme kuvveti denir ve f_s ile gösterilir.

Şekil 2.4’de gösterilen statik ve kinetik sürtünme şemasında c noktasında cismi harekete devam ettirmek için gerekli olan kuvvetin, cismi hareketsiz konumdan harekete geçirmek için gerekli olan kuvvetten daha az olduğu görülür. Böylece statik sürtünme katsayısının kinetik sürtünme katsayısından büyük olduğu yani $f_s > f_k$ sonucuna varılır (Young ve diğ., 2013).



Şekil 2.4: Statik ve Kinetik Sürtünmenin Şematik Gösterimi (Aydın 2015)

İki cisim arasında bağlı hareket genel olarak kayma, yuvarlanma, dönme ve çarpma şeklinde olmaktadır.



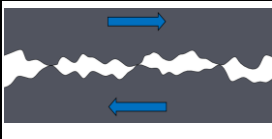
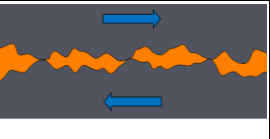
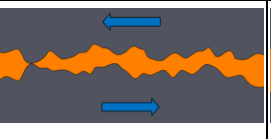
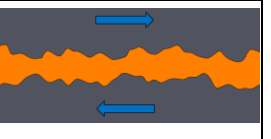
Şekil 2.5: Kayma, Yuvarlanma, Dönme ve Çarpma Hareketlerinin Şematik Gösterimi (Cesur 2008)

Sürtünmeyi oluşturan fiziksel olaylar incelendiğinde, kayma ve yuvarlanma arasında makroskobik açıdan bir görünüm farkı olduğu, mikroskobik olarak ise her iki sürtünmenin de benzer olduğu belirlenmiştir. Teorik olarak yüzeyi pürüzsüz ve tam sabit olan bir karşı yüzey üstünde cismin yuvarlanması sırasında sürtünme direncinin meydana gelmemesi gerekir. Fakat pratikte kayma sürtünmesi ile karşılaştırıldığında oldukça küçük bir sürtünme direnci meydana gelmektedir. Kayma hareketinden ortaya çıkan sürtünme katsayısı 0,5 yuvarlanma da ise sürtünme katsayısı yaklaşık 0,005’dir. Temas eden cisimlerin tam rijit olmamasından kaynaklı elastik ve plastik deformasyonların oluşması, böylece hareket yönünde dalga şeklinde birikintilerin meydana gelmesi, temas şeklinin noktasal ve çizgiselden yüzeysel forma dönüşmesi cismin hareketine karşılık bir karşı direnç meydana getirmektedir (Cesur 2008).

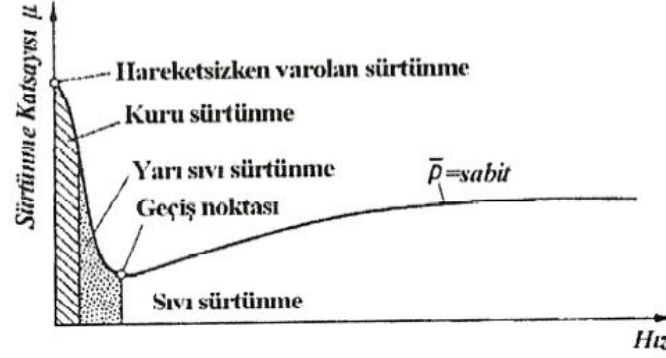
2.1.1 Sürtünme Çeşitleri

Sürtünen cisimlerin arasında yağlayıcı madde olup olmasına, sürtünen cisme, hareketin durumuna ve karakteristiğine göre yapılan sınıflandırmaya göre sürtünme; akışkan sürtünmesi, molekül sürtünmesi ve katı cisimler arasındaki sürtünmeler olarak üç grupta incelenmektedir. Akışkan sürtünmesi; bir cismin gaz veya sıvı içerisinde yapmış olduğu kayma ve yuvarlanma hareketi sonucunda meydana gelen bir sürtünmeyken, molekül sürtünmesi; cisimlerin tüm plastik şekil değiştirmeleri sırasında moleküller arasında meydana gelen sürtünmedir. Katı cisimler arasındaki sürtünme ise sürtünme oluşumu için temas eden maddeler arasında sıvı yağlama maddesi konulur ise sıvı sürtünme (viskoz sürtünme), yağlama maddesi konulmaz ise kuru sürtünme ayrıca bu iki sürtünme arasında kalan yarı sıvı (karma) ve sınır sürtünme olmak üzere dört durumda meydana gelebilen sürtünmedir (Serin 2015; Timur 2017). Tablo 2.1’de katı cisimleri arasında meydana gelen sürtünmelerin mekanizmaları gösterilmiştir.

Tablo 2.1: Katı Cisimler Arasında Meydana Gelen Sürtünme Mekanizmaları

Kuru Sürtünme	Sınır Sürtünme	Karma Sürtünme	Sıvı Sürtünme
			

İki katı cisim arasında meydana gelen bağıl hareketle oluşan sürtünme durumları arasındaki geçişi ve sürtünme katsayısının değişimini ele alan Stribeck Eğrisi Şekil 2.6’da görüldüğü gibidir.



Şekil 2.6: Stribeck Eğrisi ve Sürtünme Çeşitleri (Ünlüoğlu 2012)

2.2 Yağlama

Yağlama, birbiriyle temas halinde olan ve birbirine göre bağıl hareket eden yüzeyler arasına düşük kayma mukavemetine sahip bir yağlama maddesinin (yağ, gres vb.) uygulanmasıdır (Genesan 2012). Temas eden iki yüzey arasına uygulanan bu yağlayıcı malzemeye, bu iki temas yüzeyi birbirinden uzaklaşmak zorunda kalacak ve böylece yüzeylerin etkileşime girmesini engellenecektir (Ayrancı 2016; Polat 2008). Birbiri üzerinde bağıl hareket eden yüzeyler arasındaki etkileşimi, yüzeylere zarar vermeden yüzeyden kolay bir şekilde kopan yağlama filmi ile ayırmak mümkündür.

Birbiri üzerinde bağıl hareket eden ve temas halinde olan yüzeyler arasında sürtünmeden kaynaklı aşınma, aşırı sıcaklık artışı ve bunlardan kaynaklı büyük enerji kayıpları oluşabilmektedir. Burada meydana gelen etkileşimi ve oluşan enerji kayıplarını en aza indirmek için yapılması gerekenlerin başında yağlama gelmektedir (Cesur 2008; Bermúdez ve Jimies 2011). Sürtünmeyi azaltarak, aşınmayı en aza indirmek ve böylece aşınmadan kaynaklı oluşan sıcaklığın istenilen seviyelerde tutulmasını sağlamak gibi amaçlardan dolayı birbiri ile temas halinde çalışan her türlü makine elemanı arasında yağlama maddeleri kullanılır (Serin 2015). Yağlama ve yağlamanın oluşumu en karmaşık mühendislik yönlerinden biridir. Bundan dolayı yağlayıcı maddeler kullanılan yere ve nihai kullanım amacına en iyi uyacak şekilde

seçilmelidir. Triboloji ve yağlama alanındaki araştırmalar ve incelemeler bunun için belirli bir sektöre veya belirli bir çalışma alanına göre özelleştirilerek çok sayıda yağlama alternatifi sağlamıştır. Çalışma koşullarına göre alternatif yağlayıcı olarak gaz, buhar, sıvı veya gres gibi yarı katı yağlayıcılar kullanılmaktadır (Bermúdez ve Jimies 2011; Basshuysen ve Schäfer 2004). Yağlama sistemleri sadece karmaşık değil içerisindeki birçok katkı maddesi (deterjanlar, viskozite indeksi arttırıcılar vb.) türüyle de kendi başına bir alandır (Eklund 2013).

Yağlama yağı temas yüzeyleri arasındaki sürtünmeyi en aza indirmek için kayma yönünde sürtünme işi yapmakta ve bu kinetik enerji ısıya dönüşmektedir. Makine parçaları arasında meydana gelen sıvı sürtünmesinin olumsuz etkileri de mevcuttur. Sürtünme işi yaparak mekanik enerji kaybına ve zamanla yağlayıcının ısınmasına neden olur. Bu durumda yağlayıcı filmin yük taşıma mukavemeti azalır. Bu sürtünme durumunda oluşan ısı dağıtılmalı ve çalışma koşullarına dayanıklı olmalıdır (Basshuysen ve Schäfer 2004). Bu da günümüzde motor yağının her türlü çalışma koşulunda görevini yerine getirmesi için motor yağı içerisine katılan ve motor yağını geliştiren katkı maddeleri ile sağlanır. Günümüz sistemlerinde kullanılan tüm yağlayıcılar çalışma koşullarına uygun olacak şekilde katkı maddeleri içermektedir (Ismail 2017).

İçten yanmalı motorlar birbiri üzerinde hareketli birçok parçaya sahiptir. Bu hareketli parçalar arasında yeterli yağlama yağı tabakası olmadan, parçaların temas yüzeyleri arasında meydana gelen sürtünme kuvvetinin üstesinden gelmek zorlaşacaktır. Ayrıca sürtünme yüzeyleri arasında yeterli kalınlıkta yağlama yağı olmaz ise yüksek aşındırma kuvvetleri oluşacak ve temas halinde çalışan parçaların aşınması çok daha kolay olacaktır. İçten yanmalı motorların çalışması sırasında meydana gelen yanma ile çevrim sırasında yüksek sıcaklıklar oluşacaktır. Bu sıcaklıklara temas halinde çalışan parçaların sıcaklıkları da eklendiğinde parçalar yüksek ısılara ulaşabilecektir. Parçalar üzerindeki ısının aşırı artması, dalgalı yatak yükleri vb. problemler yağlamayı daha zor hale getirebilir ve böylece motorda yanlış ve yetersiz yağlama, çentikli silindirler, sıkışmış piston segmanları, hasarlı rulmanlar, kirli bujiler gibi ciddi motor sorunlarına neden olabilir (Gupta 2006). Bu olumsuz sonuçları ortadan kaldırmak ve istenilen uygun koşullarda hareketli parçaların çalışmasını sağlamak için yağlama yağı kullanılır.

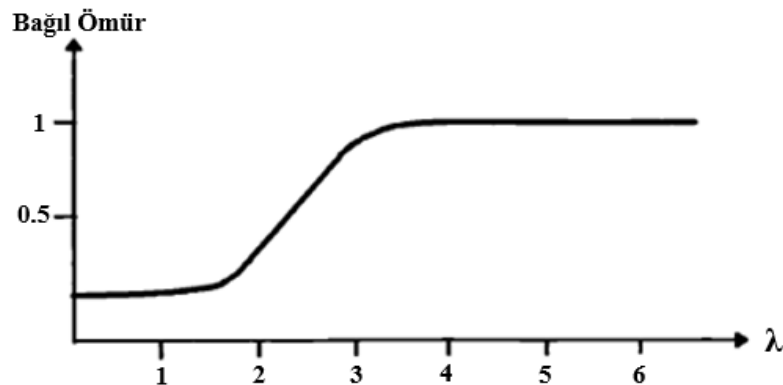
Temas halinde çalışan iki kaygan yüzey arasına, yüzeylerin kendisinden daha düşük kayma mukavemetine sahip malzeme uygulanarak sürtünmeyi en aza indirmek için yağlayıcı film tabakaları kullanılır. İki hareketli yüzey arasında yağlama sağlayan bu katmanın kalınlığı hareketli sistem açısından önemlidir. Yağ filmi yeterli kalınlığa ulaştığında, bağıl hareket halindeki sürtünme yüzeyleri arasında uygun mesafe oluşur ve sürtünme önemli ölçüde azaltılır veya tamamen ortadan kaldırılabilir (Eklund 2013).

Sıvı film yağlamasında, yağ filminin göreceli yüksekliğine genellikle spesifik film kalınlığı ya da lamda oranı (λ) denir. Ayrıca minimum yağ filmi kalınlığı h_0 ve ortalama yüzey pürüzlülüğü ise R_{qc} ile ifade edilmektedir.

$$\lambda = \frac{h_0}{R_{qc}} \quad (2.3)$$

$$R_{qc} = \sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2} \quad (2.4)$$

Burada R_{qc} değeri sadece iki sürtünme yüzeyinin ortalama pürüzlülüğünü değil aynı zamanda birbiri üzerinde çalışan yüzeylerin toplam yüzey pürüzlülük değerlerini de içermektedir. Lamda değerinin şekil 2.7'deki grafikte gösterildiği gibi aşınma, sürtünme ve malzeme ömrüyle ilişkili olduğu bulunmuştur. 1 veya daha az oranları için, karşıt yüzeylerin önemli ölçüde katı-katı temas olması muhtemeldir. Bu durum sürtünme yüzeylerinde hasara ve sürtünmeye maruz kalan parçanın ömrünün kısılmasına neden olmaktadır (Anghel 1998; Blau 2009).



Şekil 2.7: Bağıl Ömür ve Lamda Oranı (Anghel 1998)

Temas halinde olan iki cisimden birini hareket ettirmek için sabit ve hareket yönünde ‘teğetsel kuvvet’ denilen bir kuvvet uygulanmalıdır. Sürtünmekte olan cismin ağırlığından dolayı sürtünme anında yüzeye etki eden kuvvete de ‘normal kuvvet’ denilmektedir. Buradaki teğetsel kuvvetin normal kuvvete oranı ise ‘sürtünme katsayısı’ olarak bilinir ve ‘ f ’ ile gösterilir.

$$f = \frac{\text{Teğetsel kuvvet}}{\text{Normal kuvvet}} \quad (2.5)$$

2.2.1 Yağlama Rejimleri

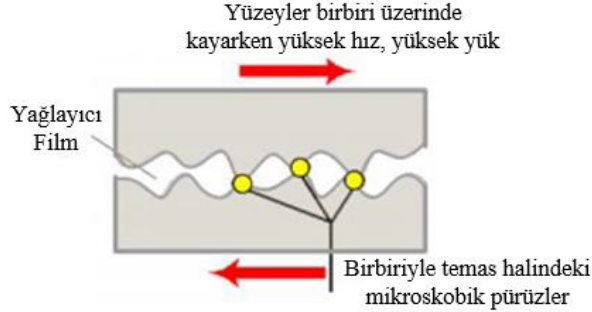
Günümüzde kullanılan içten yanmalı motorların daha az hacim kaplaması ve daha yüksek güç üretebilmesi motor tasarımcıları için ilave iş yükü meydana getirmektedir. İçten yanmalı motorlardaki birbiri üzerinde etkileşim halinde çalışan parçaların daha iyi ve daha kompakt bir hale getirilmesi için, o parçanın fiziksel ve kimyasal olarak çalışma kabiliyetinin ve hasar mekanizmalarının bilinmesi gerekir. Bundan dolayı çalışmalar parçalar üzerinde olduğu kadar parçaların çalışma ortamını oluşturan yağlama rejimleri üzerinde olmakta ve motor çalışmasıyla yağlama ilişkilendirip bu şekilde tasarımlar yapılmaktadır (Serin 2015).

İki yağlama yüzeyi arasındaki yağlama mekanizması, yağın viskozitesi, birbiriyle etkileşim içerisinde olan parçaların hızları ve en önemlisi de temas yüküne bağlı olarak değişmektedir (Anghel 1998; Ayrancı 2016). Bu değişim de yağlayıcı maddedeki farklı rejimler altında incelenmektedir.

2.2.1.1 Sınır Yağlama

Şekil 2.8’de gösterildiği gibi yüzeyler arasında yükün veya hızın fazla olması halinde sınır yağlama rejimi gerçekleşir. Bu durumda iken yağlama maddesi, sürtünme yüzeylerindeki düzensizliklerin doğrudan temas etmesini önleyecek kadar yeterli bir yağlama filmi oluşturamaz. Sınır sürtünme, yeterli olamayan yağlama veya aşırı yükleme koşulları ile alakalıdır. Sınır yağlama bölgesinde sürtünme katsayısı hızdan bağımsızdır. Bu tip tribolojik bir sistemin sonucu olarak aşırı sürtünme nedeniyle parçalarda yüksek aşınma, yüksek ısı oluşumu ve yüksek enerji kaybı meydana

gelmektedir. Sınır yağlama, piston ve piston segmanları, strok başlangıcında ve sonunda, piston pimi ile burcu arasında, vites dişleri arasında ve diğer birçok konumda meydana gelebilir (Caines ve Haycock 1996; Gupta 2006; Polat 2008).



Şekil 2.8: Sınır Yağlama Mekanizması (Ayrancı 2016)

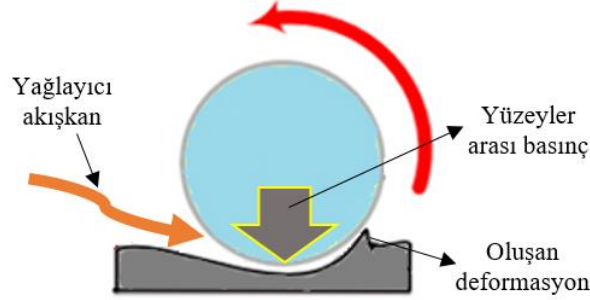
2.2.1.2 Karma (Karışık Yağlama)

Sınır yağlamaya göre azalan yük veya artan hız ile sistem karma yağlama rejimine geçiş yapar. Karma yağlama, sınır ve tam film yağlama rejimlerinin arasında bir geçiş rejimidir. Bu rejimde etkileşim halinde olan iki yüzey arası kısmen yağ ile doludur. Karma yağlamada sürtünme yüzeylerindeki çıkıntılar birbiriyle kısmen temas halindeyken, yüzeydeki girintiler yağ ile doludur. Hareket halindeki parçaların oluşturduğu yükü bir bölümünün yağlama maddesi tarafından, belli bir bölümünün ise temas halinde olan sürtünme yüzeyi tarafından karşılandığı yağlama rejimi bölgesidir. Film kalınlığı yaklaşık 70 nm ila 1 μm arasındadır (Arnell 2010; Eklund 2013).

2.2.1.3 Elasto-Hidrodinamik Yağlama (EHD)

Genelde uygun olmayan temas yüzeylerinde ve daha fazla yük şartlarında meydana gelen bu yağlama şeklinde teorik olarak sürtünme yüzeyleri birbirinden ayrıdır, fakat temas daha fazla yoğunlaşmıştır. Yağ filminin kalınlığı hidrodinamik yağlamaya göre daha incedir. Şekil 2.9'da gösterilen bu yağlama mekanizması dişli tahriklerde, dişliler arası temasta ve supaplara hareket aktarma sırasında uygun olmayan temas durumları için geçerlidir. Yağ filminin kalınlığı bu yağlamada, temas yüzeylerinin pürüzlülüğüyle aynı yüksekliktedir ve yaklaşık 10 ila 70 nm arasındadır. Sürtünme yüzeyleri birbirinden tamamen ayrıldığı için kayıplar hidrodinamik yağlama

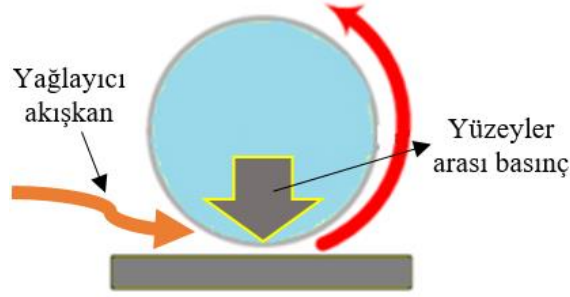
ile aynıdır. EHD yağlamanın iki çeşidi vardır; Sert EHD ve Yumuşak EHD. Sert EHD’de sürtünmeye maruz kalan malzeme yüksek elastiklik modülüne sahipken, yumuşak EHD’de düşük elastiklik modülüne sahiptir (Eklund 2013; Polat 2008; Serin 2015)



Şekil 2.9: Elasto-hidrodinamik Yağlama Mekanizması (Ayrancı 2016)

2.2.1.4 Hidrodinamik Yağlama

Hidrodinamik yağlama, düzgün bir yüzey etkileşimi gösteren sürtünme yüzeyleri için geçerlidir. Metal-metal temasın olmadığı ve yüzeylerdeki aşınmanın minimum olduğu bu aşınmaya tam film yağlama da denilmektedir. Şekil 2.10’da gösterilen hidrodinamik yağlama mekanizmasında görüldüğü gibi temas yüzeyleri, birbirini ayıran kalın bir yağ filminin ve yalnızca hidrodinamik viskoz sürtünme kuvvetlerinin etkisi altında çalışırlar. Bağlı hareket hızının aşırı seviyelere ulaşmasıyla viskoz kuvvetler etkin hale gelir ve giderek artan hidrodinamik sürtünme kuvvetlerine yol açar. Bu tür yağlayıcıların, yüksek hızda ve yuvarlanma şartlarında çalışabilecek viskozite kabiliyetinde olmalıdırlar. Yağlayıcı viskozitesi, yağlayıcıya etki eden basınç, hareket halindeki cismin dönme hızı ve yükü hidrodinamik yağlama rejimini etkiler. Hız ve viskozite artışının yağ filmi kalınlığını arttırdığı hidrodinamik yağlamada yükün artması yağ filminin kalınlığının azalmasına neden olmaktadır. Sürtünme katsayısı bu rejimde en düşüktür ($f = 0,001$ ila $0,005$) (Bermüdez ve Jimies 2011; Polat 2008; Timur 2017).



Şekil 2.10: Hidrodinamik Yağlama Mekanizması (Ayrancı 2016)

2.2.2 Yağlama Rejimleri ve Stribeck Eğrisi

Alman bilim adamı Richard Stribeck (1861-1950), kaymalı yataklar üzerinde birçok deney yapmıştır. Yapmış olduğu deneylerde sürtünme katsayısının temas basınçlarında hızın bir fonksiyonu olduğunu gösteren, yağlama rejimleri ve yağ filmi kalınlığı arasındaki ilişkiyi inceleyen Stribeck, yağlama rejimlerini göstermek için bir yöntem geliştirmiş ve formül ortaya çıkarmıştır.

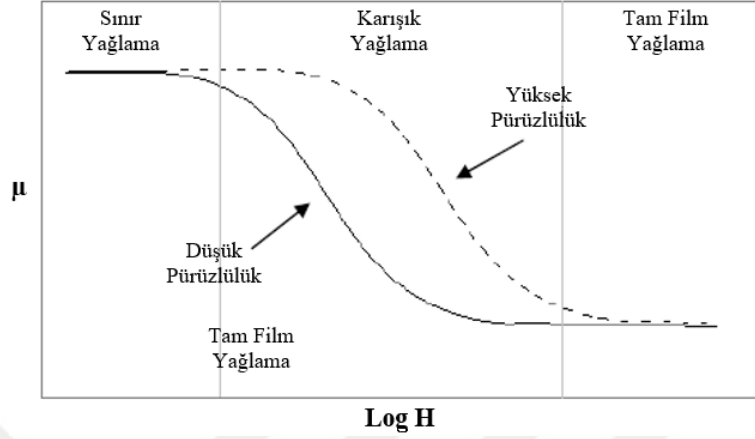
$$\frac{\eta \times w}{p} \quad (2.6)$$

Bu formülde yağlayıcının viskozitesi (η), dönme hızı (w), temas basıncı (p) ile sürtünme katsayısının ilişkili olduğunu ifade etmiştir (Blau 2009). Bu konuda yayınlanan ilk yayın olmasa da Stribeck eğrisi olarak bilinen hız, temas basıncı ve viskozitenin bir fonksiyonu olarak sürtünme katsayısı arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılmaktadır (Eklund 2013).

Stribeck eğrisi bazen Hersey numarası ($H = \eta \cdot v / p$) adı verilen ve sürtünme katsayısı ile hız ve yük arasındaki ilişkiyi gösterdiği gibi Shipper numarası ($Z = \eta \cdot v / p \cdot Ra$) adı verilen ve sürtünme katsayısı ile hız, yük ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişkiyi gösterebilir. Yazılan formüllerde hız (v), viskozite (η), temas basıncı (p) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) arasındaki ilişki incelenmiştir (Eklund 2013).

Hersey numarasına göre sınır yağlama rejiminde film kalınlığı düşüktür. Eğrinin sağ tarafında yağlayıcı film tabakasının temas yüzeyindeki yükü taşıması nedeniyle sürtünme katsayısı düşüktür. Sınır ve tam film yağlama rejimleri arasında, yükün hem yüzey pürüzlülüğü hem de yağlayıcı tarafından taşındığı bir karışık

yağlama rejimi vardır (Eklund 2013). Şekil 2.11’de gösterilen grafikte yüzey pürüzlülüğünün farklı yağlama rejimlerinde Stribeck eğrisi üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



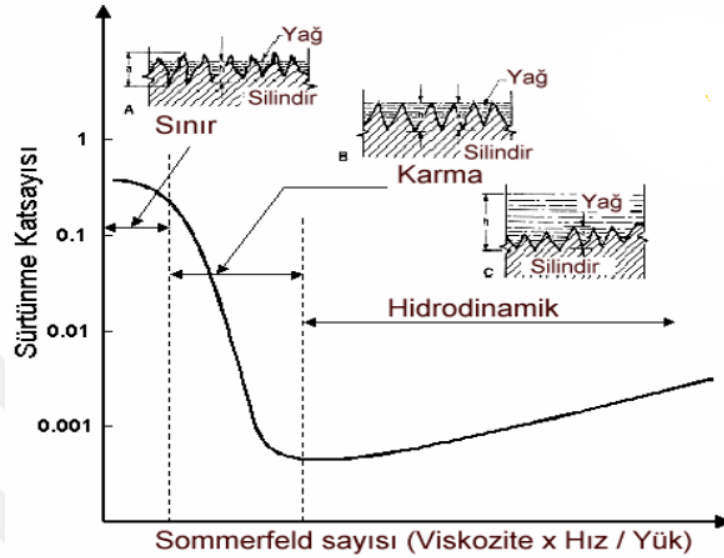
Şekil 2.11: Yüzey Pürüzlülüğünün Stribeck Eğrisi Üzerindeki Etkisi (Eklund 2013)

Stribeck eğrisi genel gösterimi, yağlama alanındaki birçok çalışmayı açıklamak için kullanılmıştır. Yüksek basınçlarda veya yağlayıcı viskozitesinin ve hızının çok yüksek olduğu durumlarda sürtünme yüzeyleri birbirine temas edebilir ve bu da sürtünmenin artmasına, sürtünme katsayısının 0,5 ila 2,0 aralığında yüksek değerlere ulaşmasına neden olur. Eğrinin solundaki kısım sürtünmenin yağlanmamış kayma temasından daha düşük olduğu yani sürtünme katsayısının 0,05 ila 0,15 arasında olduğu sınır yağlama rejimini ifade eder. Yağ filimin temas yüzeyleri arasına girmesiyle birlikte sürtünme katsayısı düşüşe geçer ve karışık yağlama rejimini meydana getirir. Karışık yağlama rejimi, hidrodinamik veya elasto-hidrodinamik yağlama ile sınır yağlama kombinasyonunu ifade eder. Eğride minimum ötesinde hidrodinamik ve elasto-hidrodinamik yağlama rejimlerinin oluştuğu gösterilir. Bu koşullar altında çeşitli makaralı rulman tiplerinde de görülen 0,0010 ila 0,0018 aralığında çok düşük sürtünme katsayılarına ulaşılır (Blau 2009).

Hidrodinamik rejimde, L uzunluğunda, D çapında ve radyal boşluğu C olan bir muyluda sürtünme olup olmadığını Sommerfeld Sayısı olarak bilinen boyutsuz bir parametre kullanarak Denklem 2.7’deki formül kullanılarak bulunabilir.

$$S = \frac{\eta \cdot N \cdot L \cdot D}{p} \left(\frac{R}{C} \right)^2 \quad (2.7)$$

Denklemdaki P yatak üzerinde dönme ekseninde yatağa gelen dikey yük, η yağlayıcının dinamik vizkozitesi, N dönme hızı ve R deliğin yarıçapıdır. Rulman mil ile ne kadar eş merkezli çalışır ise S değeri o kadar artacaktır. S değeri sıfıra yaklaştığında yüksek sürtünme meydana gelir ve yağlama etkisini kaybeder.



Şekil 2.12: Sürtünme Katsayısı ve Sommerfeld Sayısı (Cesur 2008)

Bazen Stribeck eğrilerinin x eksenini Hersey numaraları yerine Şekil 2.12’de olduğu gibi Sommerfeld sayıları kullanarak da çizilebilir. Mckee küçük muylu yatakları kullanarak muylu çapı D , çap boşluğu C ’ye göre uzunluk/ çap (L/D) oranına ve deneysel bir değişken k değerine göre sürtünme katsayısı (μ) için Denklem 2.8’deki ifadeyi geliştirmiştir (Blau 2009).

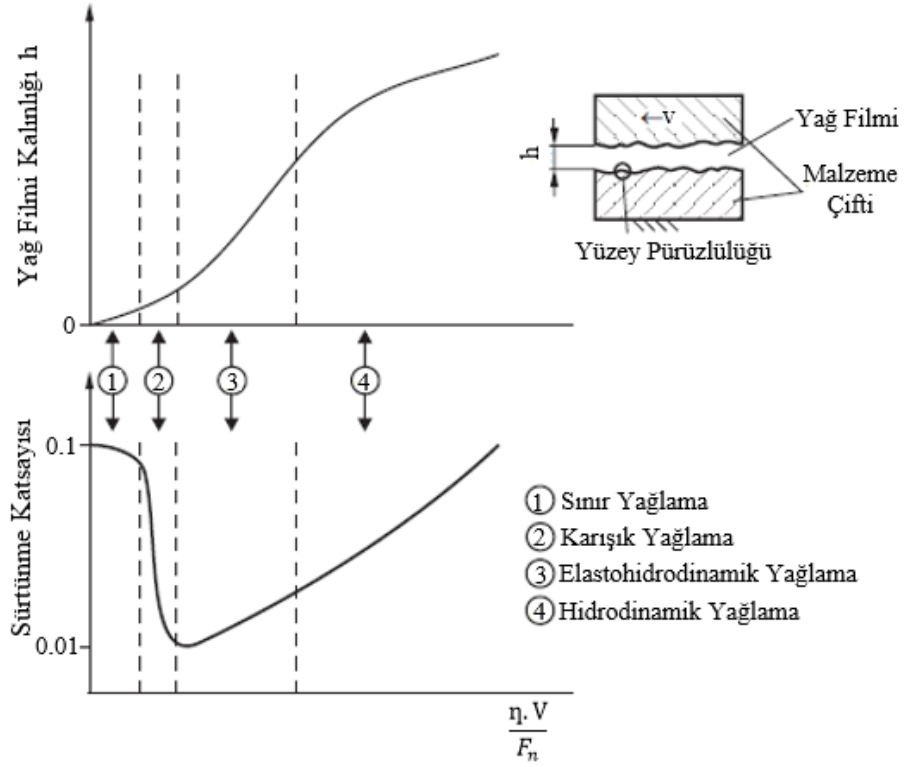
$$\mu = (4.73 \times 10^{-8}) \left(\frac{ZxN}{p} \right) \left(\frac{D}{C} \right) + k \quad (2.8)$$

Burada k değeri $L/D = 0,2$ ’de yaklaşık 0.015’tir, $L/D = 1,0$ ’da hızlı bir şekilde minimum 0,0013’e düşer ve $L/D = 3,0$ değerinde bu değer neredeyse doğrusal olarak 0,0035’e yükselir. Hutchings tarafından yapılan Denklem 2.9 eksantrik olmayan rulmanlar için kullanılmaktadır.

$$\mu = \frac{2\pi h}{S R} \quad (2.9)$$

Burada S Sommerfeld sayısının, h ortalama film kalınlığını ve R yatak yarıçapını ifade etmektedir. Hidrodinamik yağlama iyi olması veya yatak tasarımının iyi olması

sürtünme katsayısını 0.001'e kadar düşürebilir. Uygulamalarda yağ filmi kalınlığı (Denklem 2.3); sınır yağlama rejimi için $\lambda \ll 1$, karışık yağlama rejimi için $1 < \lambda < 3$, hidrodinamik yağlama rejimi için $\lambda \gg 6$ ve elastohidrodinamik yağlama rejimi için $3 < \lambda < 10$ aralığındadır (Blau 2009). Şekil 2.13'te farklı yağlama rejimleri için Stribeck diyagramı ve farklı yağlama rejimleri ile yağ filmi kalınlığındaki değişim gösterilmiştir.

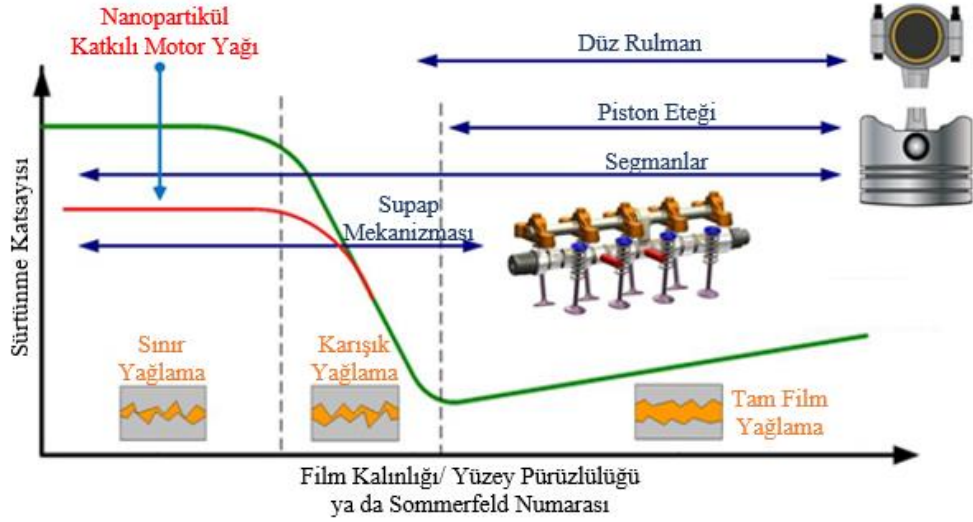


Şekil 2.13: Yağlama Rejimleri, Yağ Filmi Kalınlığı ve Stribeck Eğrisi (Mang ve Braun 2001)

Stribeck eğrileri için genel olarak viskozite (η), temas yüzeyleri arasındaki bağıl hız (V) ve temas yüzeyine gelen yük (F) ile oluşturulan formül Denklem 2.10'da gösterildiği gibidir.

$$\frac{\eta \cdot V}{F_n} \quad (2.10)$$

Her bir motor parçasının genel olarak çalıştığı yağlama rejimi bulunmaktadır. Bu parçaların çalışmış oldukları yağlama rejim bölgeleri ve motor parçaları Şekil 2.14'deki Stribeck eğrisi üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 2.14: Stribeck Eğrisi ve İçten Yanmalı Motor Bileşenleri (Ali ve diğ. 2017)

2.3 Aşınma

Aşınma; DIN 20320'ye göre mekanik hareketler ile temas eden katı, sıvı ve gazın temas ettiği bir cismin yüzeyinde meydana getirmiş olduğu aşamalı malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır (Kato ve diğ. 2015; Mang ve Braun 2001). Aşınma gerçek bir malzemenin sahip olduğu özellik olmayıp bir mühendislik sisteminin yani çalışma mekanizmasının sahip olduğu özelliktir.

Aşınma, birbiri ile etkileşim halinde çalışan parçaların oluşturduğu çalışma sisteminin verimliliğini düşürür, güç kayıplarına, fazla yağ tüketimine, makine parçalarının değiştirilme sıklıklarının artmasına neden olur. Çeşitli çalışma koşulları aşınmaya ve bunun sonucu oluşan hasara neden olmaktadır. Yük, hız veya çalışma ortamında meydana gelen herhangi bir değişiklik, etkileşim halinde çalışan yüzeyin ya da yüzeylerin aşınma oranlarında önemli bir değişimi meydana getirebilmektedir. Bundan dolayı çalışma koşullarını veya çalışan malzemenin değiştirilmesi aşınmayı azaltmak için önemli etkenlerdir. Meydana gelen sorunun çözülebilmesi için sorunun doğasının kesinlikle iyi bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Bazen malzeme sertliğinin artması aşınmayı azaltırken bazen zıt etki oluşturabilmektedir. Bazı durumlarda da aşınmayı azaltmak için çalışma koşullarını değiştirilmesi, çalışan malzemenin değiştirilmesinden daha olumlu etki yapmasına neden olabilmektedir. Malzeme çeşitlerinin ve çalışma koşullarının çok olması veya karmaşık olması

mühendislerin aşınmayı en aza indirebilmek için uygun bir kombinasyonu seçmesini zorlaştırmaktadır (Eyre 1978).

Aşınma etkileşim halinde çalışan parçalarda meydana gelen sürtünmenin bir sonucudur. Aşınma ' ω ' ifadesi ile gösterilir ve çalışma sırasında birim kayma mesafesi başına aşınan yüzeyden koparılan malzeme hacmi ile tanımlanır (Jackson 2006). Aşınmaya katkı sağlayacak birçok farklı fiziksel mekanizma bulunmaktadır ve bunlar için sade, basit ve evrensel bir matematiksel model yetersiz kalmaktadır. Kir, nem, yüzeylerin korozyonu, sıcaklık, çalışma şartları vb. etkenler aşınmaya katkıda bulunmaktadır. Archard aşınma matematiksel denklemi, aşınma temasının yük ' W ' ile doğru ama aşınan malzemenin yüzey sertliği ' H ' ile ters orantılı olduğunu ifade etmektedir.

$$\omega = K \times (W/H) \quad (2.11)$$

Denklemde K sabit sayısı aşınma katsayısı olarak tarif edilir ve boyutsuzdur. Bu matematiksel denklemde, birbiri üzerinde kayan veya dönen temas yüzeyleri için göz önüne alındığında kesinlikle yüzey sertliğinin önemli bir faktör olduğu görülür. Aşınma sabitinin değerinin bilinmesi temas yüzeylerinde meydana gelecek aşınmayı öngörmek için oldukça büyük öneme sahiptir (Jackson, 2006).

Aşınmanın gözlemlere dayanan basit iki sınıflandırılması vardır; bunlar yumuşak ve şiddetli aşınmalardır. Bu aşınmalar matematiksel modellere değil, sadece gözleme dayalı faktördür. Bu sınıflandırma Tablo 2.2'de gösterildiği gibidir.

Tablo 2.2: Temas Yüzeyleri İçin Yumuşak ve Şiddetli Aşınma

Yumuşak Aşınma	Şiddetli Aşınma
Asıl sürtünme yüzeyinden daha pürüzsüz yüzeylerin oluşmasına neden olur.	Asıl sürtünme yüzeylerinden daha pürüzlü ve derin aşınmış yüzeylere neden olur.
Aşınan parçaların boyutları çok küçüktür. Yaklaşık 100 nm'dir.	Aşınan parçaların boyutları büyüktür. Yaklaşık 0,01 mm'dir.
Yüksek elektriksel temas direnci ve düşük metalik temas meydana gelir.	Düşük temas direnci ve gerçek metalik bağlantılar meydana gelir.

2.3.1 Aşınma Mekanizmaları

Endüstriyel çalışmalarda karşılaşılan aşınmalar geniş ölçüde sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma grupları ve endüstriyel olarak meydana gelen aşınma miktarları Tablo 2.3'te gösterilmiştir. Ayrıca aşınma nadiren tek bir etken sonucu meydana gelmektedir. Bir aşınma türünün diğerine dönüştüğü veya iki ve daha fazla aşınma mekanizmasının beraber çalıştığı durumlar mevcuttur (Eyre 1978).

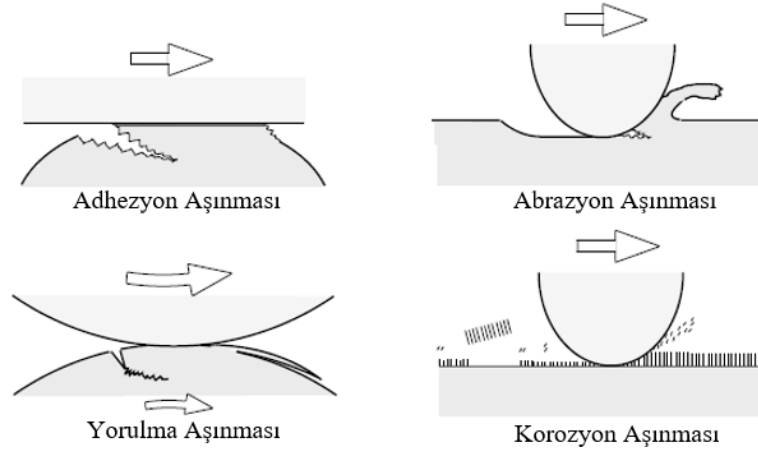
Tablo 2.3: Endüstriyel Makinalarda Meydana Gelen Aşınma Türleri ve Yoğunlukları (Eyre 1978)

Aşınma Türü	Aşınma Miktarı
Abrazyon aşınma	%50
Adhezyon aşınma	%15
Erozyon aşınması	%8
Titreşim (Fretting) aşınması	%8
Kimyasal aşınma	%5

Literatürde adhezyon, abrazyon, erozyon, kırılma, yorulma, darbe, plastik deformasyon, kavitasyon ve oksidasyon olmak üzere daha birçok aşınma çeşidinden bahsedilmektedir. İçten yanmalı motor parçaları arasında meydana gelen ve motor parçalarının yüzeylerinde hasara yol açan aşınma türleri Tablo 2.4'te sıralanmıştır (Cesur 2008). Ayrıca bu aşınma türlerinin çalışma mekanizmaları Şekil 2.15'te gösterilmiştir.

Tablo 2.4: İçten Yanmalı Motorlarda Meydana Gelen Aşınma Türleri (Cesur 2008)

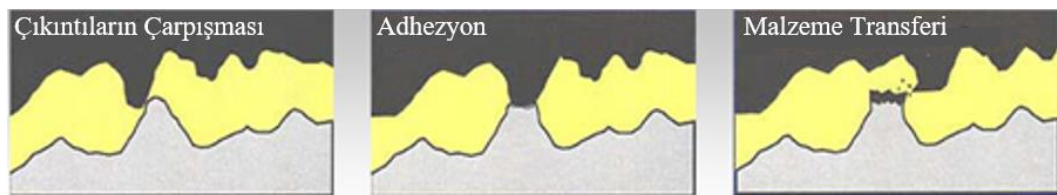
1	Adhezyon aşınması
2	Abrazyon aşınması
3	Yorulma aşınması
4	Korozyon aşınması



Şekil 2.15: Aşınma Türlerinin Çalışma Mekanizması (Kato ve diğ. 2015)

2.3.1.1 Adhezyon (Yapışma) Aşınması

Adhezyon aşınması, birbiri ile temas halinde olan sürtünme yüzeylerinin, sahip olduğu karışık pürüzler arasında meydana gelen kaynak nedeniyle oluşan mikro bağlantıların bir sonucudur. Sürtünme esnasında temas eden noktalara uygulanan yük o kadar yüksektir ki bu sürtünme noktaları deforme olurlar ve birbirleri ile mikro bağlantılar oluşturarak birbirlerine yapışırlar. Sürtünme esnasında karşılıklı temas halindeki gövdelerin hareketi mikro bağlantılar kopmasına neden olur. Böylece sürtünme yüzeyindeki malzemenin belli bir kısmı karşı gövdeye aktarılır (Jackson 2006). Adhezyon aşınmasının çalışma mekanizması Şekil 2.16’da gösterilmiştir.



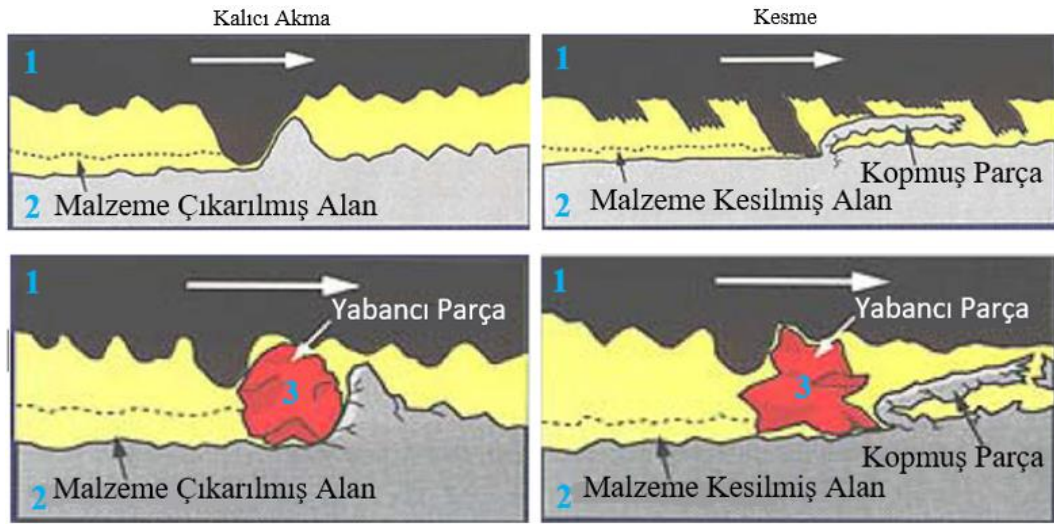
Şekil 2.16: Adhezyon Aşınması Çalışma Mekanizması (Olomolehin 2009)

Bu tür aşınmalar yüksek sıcaklık ve yüksek basınç koşullarında meydana gelirler. Yıpranma şekli, iki düz gövdenin üst üste kayması veya bir yüzeyin diğerine yapışmasıyla oluşur. Burada molekül düzeyinde yakın etkileşimden kaynaklı güçlü yapışma kuvveti yani adhezyon kuvveti meydana gelir. Bu çalışma şartlarında, aşınma ile kopan parçacıklar yumuşak yüzeyden adhezyon kuvvetinin etkisiyle çekilir ve daha sert olan yüzeye kaynar (Lakshminarayanan ve Nayak 2011; Takadoun 2008).

2.3.1.2 Abrazyon Aşınma

Abrazyon aşınması birbiri ile bağıl hareket eden daha sert bir yapıdaki malzemenin daha yumuşak bir yapıdaki malzeme ile arasında oluşan etkileşimdir. Etkileşim halinde çalışan sert malzemenin yüzeyindeki pürüzlülük veya düzensizlikler, yumuşak malzemenin yüzeyinde çizik, yiv ve malzeme koparılması gibi olayları meydana getirir (Takadoun 2008; Timur 2017). Tornalama ve kesme gibi endüstriyel anlamdaki mekanik şekillendirme işlemleri plastik deformasyon biçiminde meydana gelen aşınmalar, abrazyon aşınmasına örnektir.

Bağıl hareket eden yüzeylerin sayısına göre abrazyon aşınması Şekil 2.17’de gösterildiği gibi iki ya da üç farklı yüzey etkileşimine göre sınıflandırılabilir. İki gövdeli aşınma ve üç gövdeli aşınma olarak iki tür abrazyon aşınması mevcuttur. İki gövdeli aşındırma da sürtünme yüzeylerinden biri diğerine göre daha sert veya yumuşak olduğu aşındırma. Bu sürtünme de sertlik değeri yüksek olan yüzey diğer yumuşak yüzeyde girintiler oluşturur. Üç gövdeli aşındırma ise sürtünme yüzeyleri arasında sert parçacıklar mevcuttur. Bu sert parçacıklar, temas halinde çalışan hareketli yüzeylerin birinden veya ikisinden malzeme kazıyabilmektedir (Olomolehin 2009).



Şekil 2.17: İki ve Üç Parçalı Abrazyon Aşınması (Olomolehin 2009)

Mikro düzeydeki abrazyon aşınması kesme (Cutting), çatlama (Cracking) ve kazıma (Plough) olaylarından herhangi biri ile sonuçlanır.

2.3.1.3 Korozyon (Tribokimyasal) Aşınması

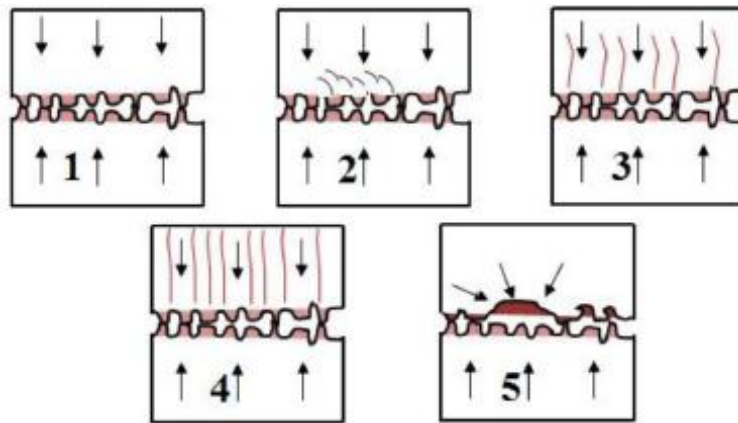
Korozyon aşınması, etkileşim halinde çalışan yüzeylerden tribokimyasal reaksiyonlar ile devamlı olarak bir katmanın çıkarılmasıyla meydana gelen aşınmadır (Ussa 2016). Korozyon aşınması, belirli bir reaksiyon için çalışma koşullarına bağlı olarak ıslak korozyon ya da kuru korozyon olabilir. Islak korozyon genellikle su benzeri sıvı haldeki çözelti içerisindeki bazı çözülmüş maddeler ile oluşur. Bu da çalışma koşulları olarak asidik bir ortam meydana getirir ve yüzey üzerinde aşınma reaksiyonları oluşturur. Kuru korozyon veya oksidasyonda ise, havadaki oksijen ya da azot gibi kuru gazların metal ile reaksiyona girmesiyle meydana gelir. Tipik olarak kuru korozyon ıslak korozyon kadar zarar verici değildir ancak kuru korozyon sıcaklığa çok duyarlıdır. Alev içerisine bir parça temiz demirin bir süre tutulması ile yüzeyinde bir oksit tabakasının oluşması kuru korozyona güzel bir örnektir. Çalışma ortamı ve koşulları korozyon aşınmasında oldukça önemli olduğu için hareketli mekanizma tasarımlarında bileşen tasarlamadan önce malzeme seçimine dikkat edilmesi gerekmektedir. Korozyon aşınmasında, korozyon ve aşınma iki ayrı mekanizmadır ve bu iki ayrı durum aynı anda meydana gelirse durum her iki aşınmanın birleşik etkisinden daha kritik olabilir (Upadhyay ve Kumaraswamidhas 2018).

Metalik malzemeler yapısında bulunan alaşım elementlerinin miktarına göre yüzey tabakasında yaklaşık 0,1 mikron kalınlıkta doğal bir oksit tabakası bulundurulur. Yüzeyinde bulunan bu tabaka ile metalik malzemeler koroziye çalışma koşullarına karşı direnç gösterirler. Temas yüzeylerindeki etkileşimler sonucunda sürtünme yüzeylerinde malzeme kaybına ve bunun sonucunda da yüzeydeki oksit tabakasının kalkmasına neden olur. Devam eden sürtünme kuvvetlerinin etkisiyle oksit tabakaları kendini onaramaz ve oluşan durum ile malzemede meydana gelen hasar sonucu korozyon aşınması meydana gelir (Cesur 2008). Korozyon aşınması boyunca malzeme tabakalarının çıkarılması ya da aşınma oranı, kimyasal reaksiyon hızı ile doğru orantılı olarak meydana gelir (Olomolehin 2009). En yaygın korozyon aşınma şekli oksidasyondur. Korozyon aşınmasında çoğu metal hava ya da sudaki oksijenle reaksiyon meydana getirerek oksit oluşturur (Lakshminarayanan ve Nayak 2011).

2.3.1.4 Yorulma (Pitting) Aşınması

Yorulma aşınması, tekrarlanan veya döngüsel yükleme altında birbirine temas eden malzeme yüzeylerinde meydana gelen gerilmelerden kaynaklanmaktadır (Ussa 2016). Etkileşim halinde çalışan yüzeylerin, yüzey alanlarında bu gerilmeler çatlak oluşumu ve o alandan malzemenin kopması yani o bölgenin çukurlaşmasıyla sonuçlanır. Yorulma aşınması malzeme yüzeyinde meydana gelen yorgunluk stresinden dolayı oluşmaktadır. Yüzey yorgunluğu, etkileşim halinde çalışan yüzeyler arasında devamlı olarak tekrarlanan yuvarlanma, kayma gibi yüklerin sonucunda ortaya çıkar. Bu yüklerin devamlı olarak yüzeye uygulanması yüzeye yakın bölgelerde gerilmelere ve çatlakların başlamasına neden olur. Zamanla bu çatlaklar yüzeyden bir miktar malzeme ayırır ve aşınmaya katkıda bulunabilecek yeni parçaların oluşmasına ve yüzeyde malzeme dökülmesinden kaynaklı aşınmanın da artmasıyla, yüzeyin hızlı bir şekilde bozulmasına neden olur (Tung ve diğ. 2006).

Yorulma aşınmasında malzemenin başarısızlığını tanımlamak için Şekil 2.18’de gösterildiği gibi beş aşama vardır. İlk olarak parçalar birbirine yaklaşır ve yüzey pürüzlerinden birbiriyle temasa geçer. İkinci aşamada tekrarlanan yükler altındaki temas noktalarının yakınlarında çatlaklar oluşmaya başlar. Üçüncü olarak bu çatlaklar yüksek gerilmelerden kaynaklı yayılarak etki alanını genişletir. Dördüncü aşamada ilerleyen bu çatlaklar malzemenin sınır bölgesine dayanır ve malzeme daha fazla yük taşıyamaz hale gelir. Beşinci ve son aşamada yorulma aşınması denilen olay meydana gelir ve bu kısım ana parçadan ayrılır (Upadhyay ve Kumaraswamidhas 2018).

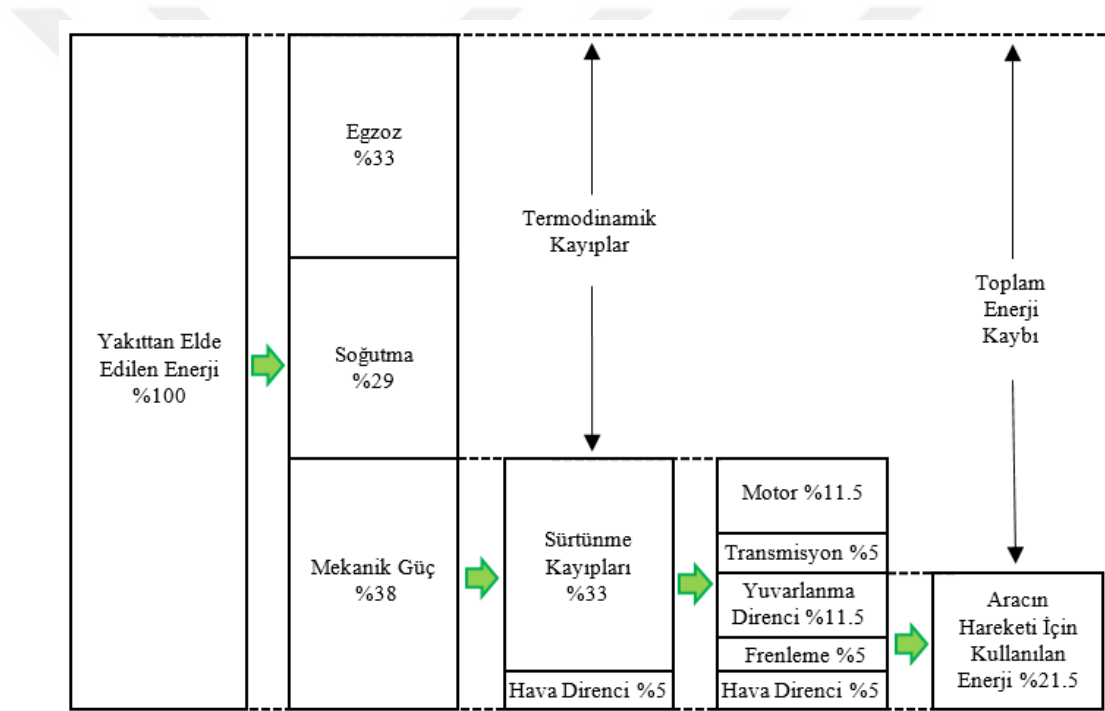


Şekil 2.18: Yorulma aşınmasının oluşma mekanizması (Upadhyay ve Kumaraswamidhas, 2018)

2.4 İçten Yanmalı Motorlar ve Triboloji

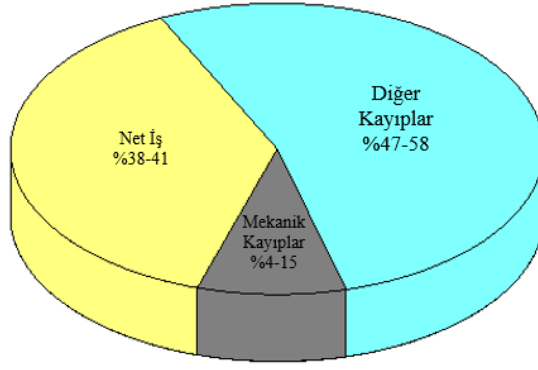
2.4.1 İçten Yanmalı Motorlarda Sürtünme

İçten yanmalı motorun çıkışında elde edilen güç, piston üzerinde elde edilen güçten daha düşüktür. Bu fark Şekil 2.19'da gösterildiği gibi termodinamik ve sürtünme kayıplarından dolayı ortaya çıkmaktadır. Bu sürtünme kaybı bir bileşenden kaynaklı olmayıp, motorda bulunan piston grubu, krank grubu veya kam grubu vb. birçok farklı sistemden oluşan toplu bir çalışma sonucunda meydana gelen kayıptır (Singh 2013).



Şekil 2.19: Yakıt Enerjisinin Kaybolduğu Alanlar (Holmberg ve diğ. 2012)

İçten yanmalı motorlarda yanma sonucunda yakıttan elde edilen kimyasal enerji; piston üzerinden biyele ve biyelden de krank miline aktarılarak taşıtın hareketi için diğer hareket sistemlerine verilir. Pistonla silindir gömleği, biyelle krank mili yatakları arasında bağıl hareketten dolayı oluşan mekanik sürtünme, yakıt ile oluşturulan ve pistona etki ettirilen indike gücün bir kısmının kaybedilmesine neden olmaktadır (Kılıç 2007). Şekil 2.20'de motorda yakıttan elde edilen enerjinin dağılımı gösterilmiştir.

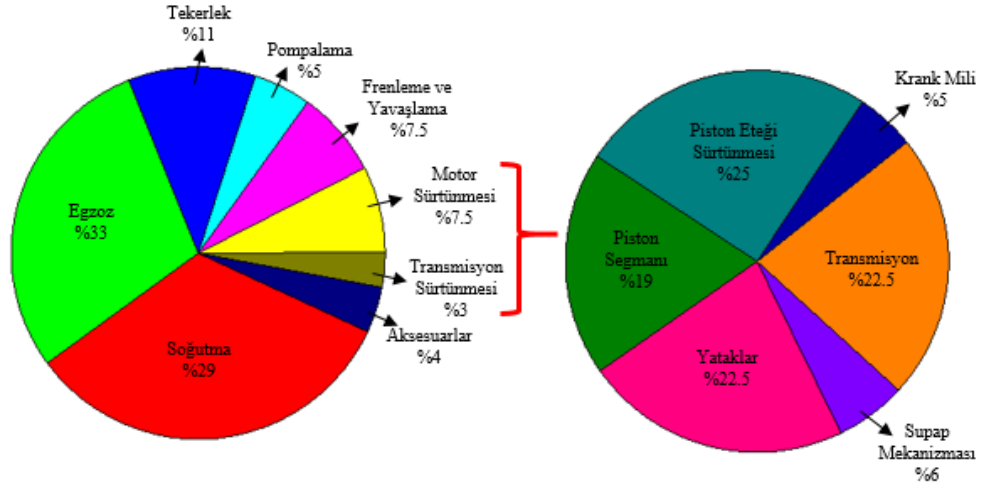


Şekil 2.20: Motorda Yakıttan Elde Edilen Enerjinin Dağılımı (Aydın 2015)

İçten yanmalı motorlarda sürtünmeler parçaların birbirine temasından ve yağ filmindeki hidrodinamik gerilmelerden dolayı meydana gelmektedir. Sürtünme kayıplarının içten yanmalı motorlardaki enerji kaybının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. İçten yanmalı motorlarda sürtünme kayıpları mekanik, pompalama ve aksesuar kayıpları olarak üçe ayrılmaktadır. Krank ve kam mili, piston, segmanlar, supap mekanizmaları gibi parçalardan kaynaklı kayıplara mekanik kayıplar, emme manifoldundan hava alınması ve yanma neticesinde egzoz gazlarının dışarı atılması sırasında oluşan kayıplara pompalama kayıpları, yağ ve su pompası, fan vb. diğer harici donanımlarda oluşan kayıplara da aksesuar kayıpları denilmektedir (Aydın 2015).

2.4.2 İçten Yanmalı Motorlarda Aşınma

İçten yanmalı motor yağları, hareket eden parçalar arasında yağ filmi oluşturarak piston-gömlek, segman-gömlek ve yatak yüzeyleri arasındaki teması önler. Sürtünme ve aşınma en aza indirildiğinde motorlarda enerji kaybının ve malzeme zararlarının önüne geçilir. Ancak sürtünme ve aşınma asla tam olarak yok edilemez (Aydın 2015). Aşınmanın azaltılması için aşınan bölgelerin tespit edilmesi gerekmektedir. İçten yanmalı motorlarda çoğunlukla adhezyon ve abrazyon aşınmaları olmak üzere korozyon ve yorulma aşınmaları da görülmektedir. Motorlarda oluşan aşınmanın temel kaynağının segman-gömlek, yataklar ve supap mekanizmaları gibi karşılıklı sürtünen parçalar oluşturmaktadır. Şekil 2.21’de görüldüğü gibi bir içten yanmalı motorda yakıtın yanması ile meydana gelen enerjinin yaklaşık %10’luk kısmı mekanik kayıplara harcanmaktadır. Bu mekanik kayıpların %77’lik kısmı motorun sürtünme kayıplarında kaynaklı meydana gelmekte ve bunun %44’lük kısmı ise piston grubundan kaynaklı oluşmaktadır (Ari ve Parlar 2013).

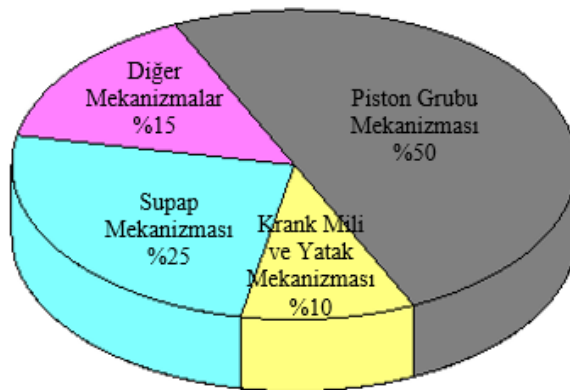


Şekil 2.21: Bir Motorda Meydana Gelen Sürtünme Kayıpları (Ari ve Parlar 2013)

2.4.3 Motor Parçaları Arasında Meydana Gelen Etkileşimler

Toplam motor sürtünme kayıpları motorun tüm alt montajlarından ve aksesuarlarından kaynaklanmaktadır. İçten yanmalı motorlarda mekanik sürtünmenin ve aşınmanın oluşmasına neden olan başlıca mekanizmalar;

1. Piston grubu mekanizması
2. Supap mekanizması
3. Krank mili ve yatak mekanizmaları
4. Diğer mekanizmalar (yağ pompası, su pompası vb. aksesuarlar)



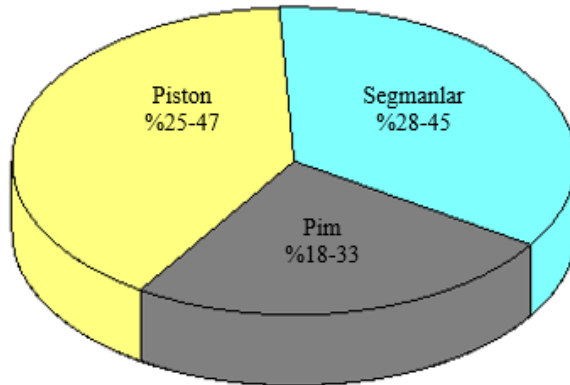
Şekil 2. 22: Motorda Mekanik Sürtünme Kayıplarının Dağılımı(Singh 2013)

Motordaki toplam enerji kaybının büyük bir bölümünü sürtünme kayıplarını ve bu sürtünme kayıplarının da önemli bir bölümünü yaklaşık %50 ile piston grubu mekanizmaları oluşturmaktadır (Kılıç 2007).

2.4.3.1 Piston ve Silindir Bloğu Arasındaki Etkileşim

Piston ile silindir bloğu arasında meydana gelen sürtünme toplam motor sürtünmesinin temel etkenlerinden biridir. Montaj zorluğu, titreşim ve gürültüyü en aza indirmek gibi nedenlerden dolayı piston ve silindir bloğu arasındaki küçük boşluklar bırakılmaktadır. Günümüzdeki çoğu piston alüminyum malzemeden üretilmekte ve böylece dökme demire göre daha hafif ve titreşimi daha az bir tasarıma imkan sunmaktadır. Ayrıca alüminyumun ısı iletkenliğini yüksek olması piston başının aşırı ısınmasını engellemektedir. Fakat alüminyumun genleşme katsayısının gri dökme demire göre yüksek olması tasarımda zorluk meydana getirir. Bundan dolayı piston soğukken silindir bloğu ile arasında fazla miktarda boşluk oluşabilmekte bu da pistonun daha gürültülü çalışmasına ve kompresyon kaçaklarına neden olabilmektedir (Tung ve diğ. 2006). Piston üzerindeki yapıların sürtünmeye etkileri Şekil 2.23'te gösterilmiştir. Piston – silindir gömleği arasındaki sürtünmeyi etkileyen faktörler aşağıdaki gibidir.

- Piston ve silindir gömleği arasındaki boşluk
- Piston kütlesi, ağırlık merkezi ve piston dönel ataleti
- Piston ve silindir gömleği yüzey işlemleri
- Piston ve silindir gömleği yüzey sıcaklıkları
- Piston ve silindir gömleği malzemesi
- Elastik ve termal deformasyonlar
- Yağın cinsi ve viskozitesi
- Yağlama rejimi (Kılıç 2007).

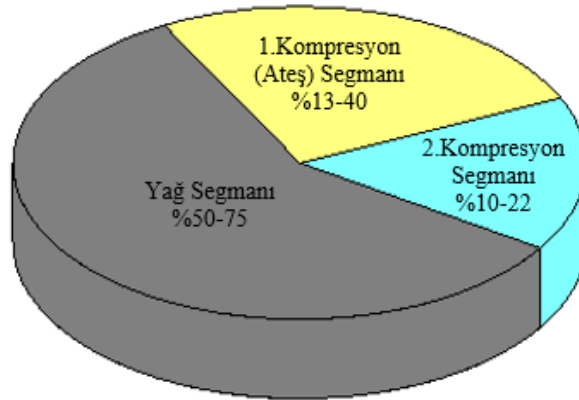


Şekil 2.23: Piston-Segman-Pim Arasındaki Sürtünmenin Dağılımı (Richardson 1999)

2.4.3.2 Segmanlar ve Silindir Bloğu Arasındaki Etkileşimler

Piston segmanları, yanma odasında yanma sonucu oluşan yanma gazlarının kartere geçmesini engelleyen bir hareketli conta gibidir. Yaygın olarak piston başına üç adet segman takılmaktadır. Bunlar pistonun tepe kısmına yakınlıkları sırasıyla ateş, kompresyon ve yağ segmanları olarak adlandırılırlar. Motor sistemindeki toplam sürtünme kaybının yaklaşık %28 ila %45'ini segmanlar ile silindir gömleği arasında oluşmaktadır. Segmanlarda meydana gelen sürtünme kaybının da %50 ila %75'lik kısmını da yağ segmanları oluşturmaktadır. Yüksek dayanıklılığa sahip olması gereken segmanlar genellikle nitrürlenmiş paslanmaz çelikten ya da molibden kaplı çelikten imal edilir (Tung ve diğ. 2006). Segmanlar ve silindir gömleği arasındaki sürtünmeyi etkileyen faktörler aşağıdaki gibidir;

- Segman geometrisi, kütlesi, malzemesi
- Segman yuvası tasarımı
- Segman dinamiği
- Segman ve silindir gömleği yüzey işlemleri
- Segman ve silindir gömleği rijitliği
- Elastik ve termal deformasyonlar
- Yağın cinsi ve viskozitesi



Şekil 2.24: Segman Sürtünme Dağılımı (Richardson 1999)

2.4.3.3 Piston Pimi ve Piston Arasındaki Etkileşimler

Piston pimi pistonla biyel kolu arasındaki kuvvet aktarım işlemini yapan parçadır. Pimin yapmış olduğu görev muyluyla oldukça benzerdir fakat buradaki hareket tam bir dönüş hareketi değildir. Pim ve piston- biyel bağlantısı üç farklı şekilde olmaktadır. Biyelde sabit olan pim tasarımında pim biyeldeki yuvasına sıkı geçmiştir. Pistonda sabit olan pim tasarımında pim pistonla sıkı geçme ile oturtulmuştur. Serbest pim tasarımında ise pimin iki ucunda segmanlar bulunmakta, piston ve biyel hareketine bağlı olmadan pim serbest muylu hareketi yapabilmektedir. Serbest pimin, piston pimi göbeğinin çalışma sıcaklığını düşürdüğü tespit edilmiş, bu nedenle de tercih edilmesi gereken pim bağlantı şekli olduğu belirtilmiştir. Tüm bağlantı durumlarında pimin hareketinin tam bir muylu hareketi olmayışından pimin hızı yüzeyler arasında tam bir yağlayıcı film tabakası oluşturmak için yeterli değildir. Bundan dolayı sınır yağlama durumu ortaya çıkmaktadır (Tung ve diğ. 2006).

Pim, tribolojik özellikleri yönünden çalışan parçalarla uyum yönünden kontrol edilir. Otomotiv pistonları genellikle alüminyum- silikon alaşımlarından yapılırken piston pimleri genellikle içi boş ve sonradan karbürize edilmiş düşük ve orta karbonlu çelikten yapılır. Karbürizasyon işlemi, pim yüzeyinin yüksek sertliklere çıkmasını sağlamakta ve böylece pim ile piston arasındaki yapışma en aza indirilmektedir. Ayrıca bu sayede pim piston sürtünme yüzeyine yağ takviyesi yapılmakta hem sürtünme azalmakta hem de ısı o bölgeden uzaklaştırılmaktadır.

2.4.3.4 Krank Mili ve Krank Mili Yatakları Arasındaki Etkileşimler

Krank milinin dönme hareketiyle krank mili ile motor bloğu arasında ve krank mili ile biyel kolu arasında kayma meydana gelmektedir. Krank mili üzerine gelen yük hidrodinamik yağlama koşulları altında çalışacak şekilde tasarlanmış muylu yatakları vasıtasıyla motor bloğuna aktarılır. Muylu ile yatak arasındaki boşluk motor performansı açısından önemli olduğundan deformasyonu en az indirmek için muylu ve yatak elamanları dayanıklı ve daha sert malzemeden yapılır. Ayrıca motor uzun süre çalışmadan durduğundan muylu yatak elamanına temas edecek ve oluşan boşluklara yağ içerisindeki katı partiküller girecektir. Buradaki parçacıkların muyluya ve yatak yüzeyine zarar verme ihtimali olduğundan bunu engellemek için krank milleri

dökme demir veya çelik gibi sert malzemelerden yapılırlarken yatak elemanlarını iç yüzeyi de daha yumuşak bir alaşımla kaplanır. Eskiden kurşun kullanılan bu kaplamalarda günümüzde daha güçlü olan alüminyum-kalay alaşımları kullanılır (Tung ve diğ. 2006).

2.4.3.5 Kam Mili, Kam ve Supaplar Arasındaki Etkileşimler

Kam milinin dönme hareketiyle düz veya makaralı yüzeye baskı uygulayıp supapların açılıp kapanması sağlanır. Kam millerinin supaplara basmış oldukları bu yüzeylerle arasına devamlı olarak yağ gönderilecek şekilde yağlama sistemi tasarlanırsa da zaman zaman bu kısımdaki yağlamalar yetersiz olabilmektedir. Bu mekanizmada yalnızca birkaç malzeme kombinasyonu etkin bir şekilde kullanılabilmekte ve hatta günümüzdeki sistemlerde supap iticilerinin hidrolik olarak ayarlanabilmesi sayesinde motor ömrü boyunca aşınan iticiler bile kullanılabilir. Buradaki aşınma, yağlama sisteminin daha etkin kullanılıp sürtünmenin azaltılması ile en az seviyeye indirilir (Tung ve diğ. 2006).

3. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA KULLANILAN YAĞLAYICI MADDELER VE ÖZELLİKLERİ

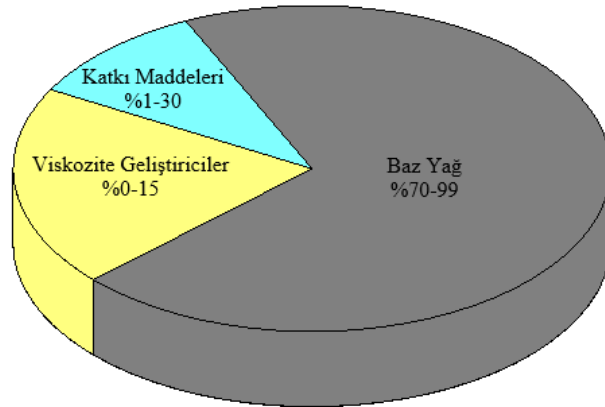
3.1 Motor Yağları

Bir motor yağının temel görevi diğer yağlayıcı maddelerde olduğu gibi sürtünmeyi en aza indirerek aşınmayı azaltmak ve bağlı hareket eden iki temas yüzeyi arasında devamlı olarak bir yağ filmi oluşturmaktır. Bunun yanında çalışan parçaların soğumasına yardımcı olmak, piston segmanı ile silindir gömleği arasında yağ filmi oluşturarak bir sıvı conta gibi görev üstlenip kompresyon kaçaklarını önlemek, yağlama sistemindeki toz, kurum, metal parçalar gibi kirleticileri filtre yardımıyla temizlemek, motor parçaları arasına dolarak ses ve titreşimi azaltmak, sürtünme yüzeylerinde meydana gelebilecek korozyonu önlemek, oluşan kirleticilerin bir araya gelip tortu oluşturmalarını engellemek ve yağ basıncıyla çalışan sistem elemanlarına hareket aktarımı sağlamak gibi farklı görevleri de bulunmaktadır (Challen ve Baranescu 1987).

İlk yağlayıcı maddeler, o günün koşullarında modern motorların ve makine mekanizmalarının yağlama gereksinimlerini tam olarak karşılayamayan bitkisel ve hayvansal kökenli yağlardı. Bitkisel yağlar olarak kolza yağı, kanola yağı, ayçiçek yağı gibi yağlar kullanılmıştır. Bu yağlar, biyolojik olarak yüksek viskozite indeksine, yüksek parçalanma kabiliyetine ve yüksek parlama noktası gibi bir yağlayıcıda olması gereken bazı özelliklere sahipti. Fakat çalışma koşulları zorlaştıkça, motor çalışma yükleri ve çalışma hızları arttıkça kullanılan bu yağlar motorlar için iyice kullanılmaz hale geldi. Bununla birlikte, bu yağların yüksek sıcaklıklar altında kolayca oksitlenmesi, yağın viskozitesinin kötüleşmesine, yağ içerisindeki tortuların artmasına neden olurken yağın tüm yağlama rejimlerinde etkili performans gösterememesi yeni yağlayıcı madde ihtiyacını ortaya çıkardı. Petrolün keşfedilişi ile birlikte fiziksel ve kimyasal olarak yağlayıcı maddelerin gereksinimlerini karşılamasıyla hayvansal ve bitkisel yağlara alternatif olarak mineral yağlar ortaya çıktı (Challen ve Baranescu 1987; Berglund 2008)).

Mineral yağların baz yağ olarak kullanılması ile birlikte bu yağın iç özelliklerinin iyileştirilmesi ve sahip olmadığı diğer özelliklerinde yağa kazandırılması için yağın içerisine katkı maddeleri ilave edilir. Bu katkılar her türlü çalışma koşulunda motor yağının görevini en iyi şekilde yerine getirmesi için kullanılan maddelerdir. Katkı maddelerinin miktarı ve kimyasal yapıları doğrudan yağın çalışma koşulları tarafından belirlenir (Ussa 2016). Her bir yağlayıcı madde genellikle çalışma koşuluna özel olarak hazırlanmış, farklı özellikteki bileşiklerden meydana gelmektedir. Sistemler üzerindeki sürtünmeyi azaltmak ve yok etmek için yağın yapısını oluşturan bu bileşenlerin anlaşılması gerekmektedir (Berglund 2008).

Baz yağlar, yağlayıcı maddelerin en önemli bileşenleridir. Normal bir yağlayıcı maddenin yaklaşık olarak %95 oranında (bu oran %99'a da ulaşmakta) baz yağlayıcı içermektedir. Geri kalan kısmı ise motor yağının kullanım koşullarına göre performansını geliştiren yağ katkıları oluşturmaktadır (Alyakut 2007). Bir motor yağını oluşturan maddelerin konsantrasyonu Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Motor Yağı İçeriği (Ussa 2016)

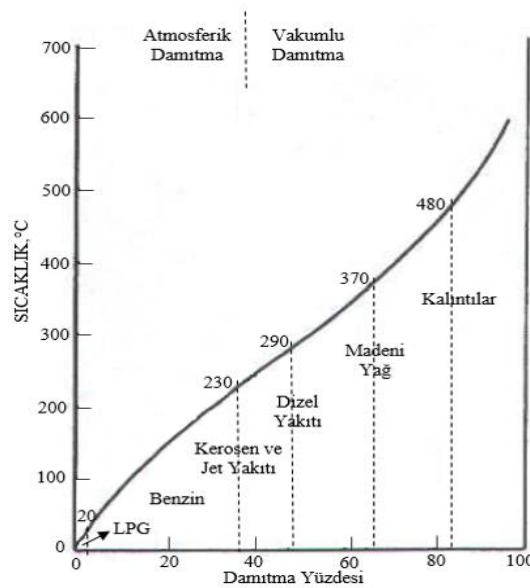
Bir yağlayıcı madde temel olarak baz yağ ve katkı maddesi olarak adlandırılan iki kısımdan oluşmaktadır. Baz yağ olarak kullanılan yağlayıcı maddeler fiziksel özellikleri göre katı, sıvı, yarı katı ve gaz yağlayıcılar olmak üzere dört gruba ayrılırlar. İçten yanmalı motor parçaları arasında ise motor yağı olarak sıvı özellikteki yağlayıcılar kullanılmaktadır.

3.1.1 Sıvı Yağlayıcılar

Sıvı yağlar birçok makine mekanizmalarında kullanılan ve birbirine göre bağlı hareket eden iki metal sürtünme yüzeyini birbirinden uzaklaştırmak, sürtünme kaybını azaltmak ve aşınmayı en aza indirerek hareketi kolaylaştırmak için kullanılan sıvı haldeki maddelerdir. Bunun yanında sıvı yağlayıcılar ısıyı motor parçasından uzaklaştırmak, güç kaybını azaltmak, metal yüzeyleri korozyondan korumak ve parçaların temizlenmesini sağlamak gibi işlevlere de sahiptir. Fakat bu işlevleri iyi bir şekilde sağlayabilmek yalnızca baz yağ ile mümkün olmayıp, katkı maddelerini gerektirmektedir. Sıvı baz yağlar elde edilmiş şekillerine göre bitkisel, mineral, tam sentetik ve yarı sentetik motor yağları olmak üzere başlıca dört grup altında incelenmektedir (Karabacak 2013; Müjdecı 2009).

3.1.1.1 Mineral Yağlar

Mineral baz yağlar, Şekil 3.2’de gösterildiği gibi ham petrolün damıtılması ile elde edilen yağlardır. Mineral yağlar endüstride en çok kullanılan baz yağları oluşturmaktadır. Mineral yağların özellikleri hem yapısında bulunan bileşenlere hem de üretim esnasında kullanılan maddelere bağlıdır. Yapılarında temel olarak hidrokarbon gruplarını bulunduran mineral yağlar, ayrıca az miktarda sülfür, azot, vanadyum, nikel ve demir gibi maddeler içermektedir (Challen ve Baranescu 1999).



Şekil 3.2: Ham Petrol Damıtma Eğrisi (Alyakut 2007)

Mineral baz yağın elde edilmesi için yüksek kaliteli ham petrol kullanılır. Ana bileşimi oluşturan hidrokarbon gruplarına göre parafinik ve naftanik yağlar olarak ikiye ayrılırlar. Genellikle mineral baz yağ olarak parafinik baz yağlar kullanılır. Parafinik yağların naftanik yağlar ile kıyaslanması sonucunda parafinik yağların oksidasyon direncinin daha yüksek olması, akma noktasının daha yüksek olması, daha düşük uçuculuk, daha düşük özgül ağırlık ve en önemlisi daha yüksek viskozite indeksi gibi farklılıklarının olduğu görülmektedir. Naftanik yağlar ise daha düşük akma noktası ve çalışma şartlarında daha düşük sıcaklık aralığının gerektiği durumlarda kullanılmaktadır (Berglund 2008; Ussa 2016).

3.1.1.2 Tam Sentetik Yağlar

Teknolojini gelişmesiyle birlikte makine parçalarının hassas olarak üretilmesi yağlayıcı maddelerinde daha hassas olmasını gerektirmiştir. Ancak bitkisel ve basit mineral yağların özellikleri sadece yapılarını oluşturan bitki veya ham petrolün özellikleri ile sınırlı kalmaktadır ve istenen diğer özellikleri sağlayamamaktadır. Bu yağlayıcı maddelerin yapısından kaynaklı olumsuzlukları gidermek, yüksek performanslı ve her türlü çalışma şartında daha etkili yağlar elde etmek için kimyasal olarak değiştirilmiş sentetik yağlar ihtiyaç haline gelmiştir (Alyakut 2007).

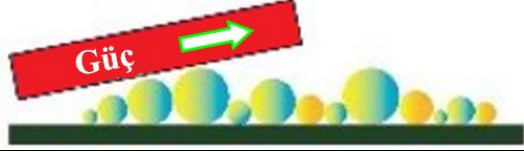
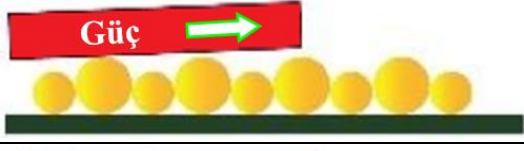
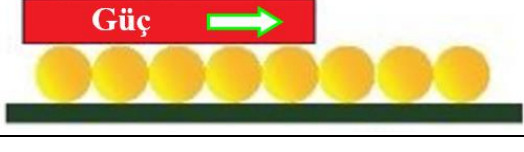
Sentetik yağlar, petrol kaynaklı ve bitki kaynaklı yağlardan kimyasal sentezle üretilen yapay yağlardır. Bundan dolayı bitkisel ve mineral yağlardan daha iyi özelliklere sahiptir. Ancak bitkisel ve mineral yağlardan daha pahalıdır. Bunun nedeni de üretilmesinin daha karmaşık ve zor olmasıdır (Ussa 2016). Sentetik yağların termal ve oksidatif açıdan mineral yağlara göre daha dayanıklıdır (Shenker 2014). Sentetik yağlar mineral yağlardan daha yüksek viskozite indeksine, daha güçlü oksitlenme kararlılığına ve daha düşük akma noktasına sahip olup aynı zamanda Tablo 3.1’de gösterildiği gibi tam sentetik motor yağları, yarı sentetik ve mineral motor yağlarına göre moleküler olarak daha düzgün bir yağ filmi oluştururlar. Ayrıca bu özellikler mineral yağlarda ham petrolün özelliklerine bağlı olarak yağdan yağa değişiklik gösterirken sentetik yağların tümü aynı özellikleri gösterebilmektedir (Berglund 2008). Otomotiv sanayinde en yaygın kullanılan sentetik baz yağlar, karbon ve hidrojen bileşiklerinden oluşan polialfaolefinler (PAO) ve oksijen, karbon, hidrojen

bileşiminden oluşan esterlerdir. Bunun yanında polizobütilenler, polialkilen glikoller, fosfat esterler ve silikonlar da sentetik yağ olarak kullanılmaktadır (Berglund 2008; Ussa 2016).

3.1.1.3 Yarı Sentetik Yağlar

Yarı sentetik motor yağları, yapı olarak mineral ve sentetik yağların birleşmesiyle oluşturulan geliştirilmiş formülasyonlardır (Shenker 2014). Genellikle mineral baz yağların içerisine sentetik yağların eklenmesiyle elde edilirler. Hem yağlama performansları yönünden sundukları avantajlar ile hem de fiyat yönünden sundukları avantajlar ile mineral yağlar ile sentetik yağlar arasında olan yağlardır. Yaygın olarak %70-80 oranında mineral yağa %20-30 oranında sentetik yağ karıştırılarak elde edilir (Müjdeci 2009; Serin 2015).

Tablo 3.1: Yağların Moleküler Yapısı

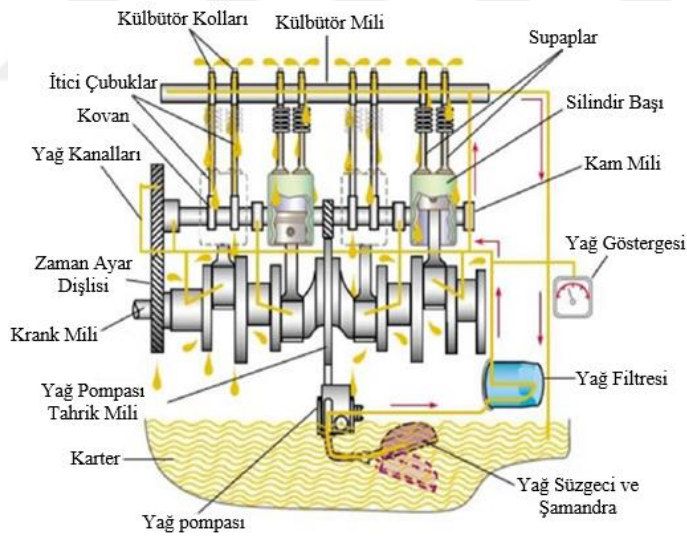
Yağlayıcıların Moleküler Yapıları	
Mineral Yağlar	
Yarı Sentetik Yağlar	
Tam Sentetik Yağlar	

3.2 Yağlama Sistemleri

Yağlama, içten yanmalı motorlarda sürtünmeyi ve bundan kaynaklı oluşan aşınma ve enerji kaybını etkilediği için oldukça önemlidir. Yağlama ile temas halinde çalışan parçalar arasındaki sürtünme kuvvetleri en aza indirilmek amaçlanmaktadır. Yağlama sistemleri ise motorlarda yağlama yağının gerekli yerlere gitmesini sağlayan, motor performansı ve ömrü için oldukça büyük öneme sahip olan bir sistemdir.

3.2.1 Yağlama Sistemi Çeşitleri

Motorlar ilk kullanılmaya başladığı zamanlardan beri sürtünme ve aşınma büyük bir sorun oluşturmuş, parçaların hızlı bir şekilde arızalanmasına neden olmuştur. Bu sorunların üstesinden gelebilmek için teknolojiyle birlikte gelişen çeşitli yağlama sistemleri kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla elle, damlama ile, fitilli, yağ bonyolu, çarpmalı, pompalı çarpmalı, basınçlı çarpmalı, basınçlı ve tam basınçlı yağlama sistemleridir. Bu sıralama incelendiğinde ilk yağlama sistemlerinde daha çok hali hazırda kullanılan parçalarla yağlama yapılır iken günümüzde yağlamanın önemi anlaşılmış ve yağlama için motora harici sistemler eklenmiştir. Günümüzde yaygın olarak yağlanması gereken tüm parçalara basınçlı yağ gönderen tam basınçlı yağlama sistemi kullanılmaktadır. Bu sistem bir yağ süzgeci, yağ pompası, yağ filtresi ve yağlama kanallarından oluşmaktadır. Sistem karterde depolanan yağın, yağ pompası tarafından çekilip basınçlı olarak yağ kanallarına gönderilmesini sağlar. Yağ kanallarına bağlı olan krank mili yatakları, kam mili yatakları, külbütör mili yatakları gibi tüm hareketli mekanizmaların böylece yağlanması sağlanır (Kaleli 2004).



Şekil 3.3: Motordaki Tam Basınçlı Yağlama Sistemi (Karabacak 2013)

3.3 Motor Yağı Katkı Maddeleri ve Görevleri

Geleneksel yöntemlerle elde edilen motor yağlarının, yağlayıcı olarak her türlü çalışma koşulunda görev yapması mümkün değildir. Bu nedenle motor yağları yüksek oranda rafine edilir ve belirli kimyasallar katılarak yağın özellikleri geliştirilir.

Böylece motor parçalarının yüzeylerinin korunması, motor yağının performansının artırılması ve motor yağının her türlü çalışma koşulunda özelliğini koruması sağlanır. Yaygın olarak kullanılan katkı maddeleri ve özellikleri Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3. 2: Motor Yağı Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması ve Özellikleri

Katkı Maddesi Çeşidi	İşlevi	Yapısındaki Maddeler	Katkı Maddesi Kullanılma Nedeni
Yüzey Koruyucu Katkı Maddeleri	Aşınma Önleyiciler	Polar organik bileşikler, yağ aminleri, yağ esterleri, klor, kurşun, fosfor, azot vb. içeren organik yapıdaki bileşikler	Metal parçaların temas yüzeylerinde meydana gelen yırtılma ve aşınmayı engellemek için koruyucu bir yağ filmi tabakası oluşturup, metal-metal temasını engellemesi
	Aşırı Basınç Düzenleyiciler	Fosfor, sülfür, klor, molibden disülfür vb.	Aşırı basınç önleyici katkı maddeleri metal yüzeylerde birleşerek baz metalden daha düşük kayma mukavemetine sahip inorganik bir yağlama filmi oluşturarak sürtünmeyi azaltması
	Korozyon Önleyiciler	Amin süksinatlar ve alkalın toprak sülfonatlar gibi yüksek oranda alkalın içeren malzemeler	Metal yüzeyler üzerinde yüksek polar bir grup aracılığıyla koruyucu bir yağ filmi tabakası oluşturup yüzeyde meydana gelebilecek herhangi bir kimyasal reaksiyonu engellemesi
	Pas Önleyiciler	Kuvvetli bazlar, organik asitler, esterler, aminler, organik asitler ve sülfonatlar	Metal yüzey üzerinde oluşabilecek pası, koruyucu yüzey filmi veya asitlerler ile nötrleştirerek önlemesi
	Deterjanlar ve Dağıtıcılar	Kalsiyum, magnezyum sülfonatlar ve kalsiyum fenatlar gibi tuzları ve suksinamitler	Motor parçalarının yüzeylerinde biriken, motorun verimli çalışmasını zorlaştıran, hatta motorda ciddi hasarlara neden olabilen tortu oluşumunu kontrol altında tutması
	Sürtünme Önleyiciler	Organomolybdenum, molibden ditiyokarbamat (MoDTC), yağ asitleri, esterler, amidler ve alkol	Birbiri ile temas halinde çalışan motor parçaları arasındaki sürtünmeyi en aza indirmek

Performans Arttırıcı Katkı Maddeleri	Akma Noktası Düşürücüler	Alkile naftalenler, oligomize alkilfenoller, mertakrilatlar ve etilen-vinil asetat kopolimerler, yüksek molekül ağırlığına sahip organik polimerler	Düşük sıcaklıklarda mum kristallerinin etrafını kaplayarak büyümelerini engellenmesi ve yağın akışkanlığının korunması
	Viskozite İndeksi Geliştiriciler	Bütlen polimerleri, polimerize olefinler, izo olefinler ve metakrilat polimerleri	Düşük sıcaklıklarda aşırı kalın ve yüksek sıcaklıklarda aşırı ince olmasının engellenmesi ve yağa spesifik performans özelliklerin kazandırılması
Yağ Koruyucu Katkı Maddeleri	Oksidasyon Önleyiciler	Kükürt, fosfor ve aromatik aminler vb.	Oksidasyon sonucu meydana gelen asitleri nötralize etmek için koruyucu bir yağ filmi oluşturarak metali koruması
	Köpük Önleyiciler	Silikon polimer	Yüzey gerilimini en az seviyeye indirerek motor yağında köpük oluşumunu engellemesi

3.4 İçten Yanmalı Motor Yağlarında Olması Gereken Genel Özellikler

İçten yanmalı motor yağlarının çalışma koşullarında bazı temel ihtiyaçları karşılamak için bazı özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu özellikler aşağıdaki gibidir:

Viskozite: Viskozite akışkan maddenin yüzey üzerinde akmaya karşı göstermiş olduğu direnci ifade etmektedir. Viskozite yağlayıcı maddenin en önemli özelliklerinden biridir ve yağlayıcı maddelerin sınıflandırılmasında kullanılan bir yağlayıcı özelliğidir. Motor yağlarının değişken çalışma koşulları altında, değişken viskozite ihtiyaçlarını karşılaması gerekir (Genesan 2012; Gupta 2006).

Viskozite İndeksi (VI): Viskozite indeksi, yağlayıcı maddede sıcaklık değişiminin viskozite üzerine etkisini ifade eden ampirik bir sayıdır. Optimum

motor çalışma koşullarında yağın viskozitesinde daha az değişiklik olması için yüksek bir viskozite indeksi tercih edilir (Genesan 2012; Gupta 2006). Yağlayıcı maddenin viskozite indeksi ne kadar yüksek olursa yağlayıcı madde sıcaklıktan o derece az etkilenir (Akyazı 2015). Viskozite indeks değerlerine göre yağlar aşağıdaki şekilde sınıflandırılır.

- Düşük viskozite indeksine sahip yağlayıcı maddeler ($VI < 40$)
- Orta viskozite indeksine sahip yağlayıcı maddeler ($40 < VI < 80$)
- Yüksek viskozite indeksine sahip yağlayıcı maddeler ($80 < VI < 100$)
- Aşırı viskozite indeksine sahip yağlayıcı maddeler ($VI > 100$)

Akma Noktası: Akma noktası yağın akışkanlık özelliğini kaybettiği ve bir yağlama sisteminde dolaşamayacağı sıcaklığı ifade etmektedir (Gupta 2006). Başka bir deyişle yağlama maddesinin akma noktası, yağın akacağı en düşük çalışma sıcaklığıdır. Akma noktası özellikle soğuk iklimde çalışan sistemler için önemli bir parametredir. Bundan dolayı yağlayıcı maddenin, oluşan sürtünme ve motor parçalarının ısıyla yavaş yavaş ısınıp, kolay bir şekilde hareketli parçalar arasında akabilmesi için düşük akma noktasına sahip olması istenir (Mann 2013).

Parlama ve Yanma Noktası: Parlama noktası, yağ kümesinin üzerinde yanma eğilimi olan yağ buharı ve yeterli hava yağ karışımı oluşturmak için bir yağın yeterince buharlaşabileceği en düşük yağ sıcaklığı olarak ifade edilir. Yanma noktası ise motor yağının yüzeyinde tutuşabilir buharların oluşmaya devam ettiği ve yağın yüzeyinden alev geçirildiğinde motor yağının tutuşup devamlı yanabileceği minimum yağ sıcaklığıdır. Yanma noktası yağın parlama noktasına ulaştıktan bir süre sonra yağın daha fazla ısıtılmasıyla meydana gelen olaydır. Parlama ve yanma noktaları ulaşılmadan önce motor yağının yüksek bir sıcaklığa ulaşması gerektiğinden bu özellik motor yağının güvenlik seviyesinin bir ölçüsüdür. Bundan dolayı bu iki sıcaklık değeri de yağlama yağında çalışma koşullarına uygun, yüksek değerler olmalıdır (Genesan 2012; Gupta 2006).

Kararlılık: Bir yağlayıcı maddenin asit, tortu ve oksidasyon oluşumuna direnç gösterme kabiliyetine kararlılık denir. Normal motor çalışma sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda bazı yağlar kimyasal olarak parçalanma ve tortu oluşturma eğilimindedir. Yağın kararlılığının devam etmesi için motorun düşük sıcaklıklarda

100 °C'nin altında çalıştırılması ve yağa temas eden yüksek sıcaklıktaki bölgelerin yağdan uzaklaştırılması gerekmektedir (Genesan 2012; Gupta 2006).

Yağlayıcı Film Mukavemeti: Yağlayıcı maddeler, sürtünme yüzeyleri arasında aşırı basınç ve yük altında bile koruyucu bir film tabakası meydana getirmektedir. Film mukavemeti yağlayıcı maddenin sürtünmeye karşı göstermiş olduğu direnç yeteneğinin bir ölçüsüdür. Film mukavemetinin yüksek olması normal yağ akışı oluşturulmadan önceki sürtünme bölgelerinde, yani motorun harekete başladığı zaman yüzeyde meydana gelebilecek sürtünmelerden yüzeylerin korunmasına yardımcı olacaktır (Genesan 2012; Gupta 2006).

Deterjan: Yanmadan kaynaklı olarak zamanla piston segmanları, supap gibi motor parçaları üzerinde karbon birikintileri ve tortular meydana gelir. Bu tortular motorun performansını düşürüp, motor parçalarının hızlı bir şekilde aşınmasına neden olurlar. Bundan dolayı tortu oluşumunu azaltmak veya yavaşlatmak için motor yağları deterjan özelliğine de sahip olmalıdır. Ayrıca bu özelliği ile oluşan tortuları dağıtarak yığın oluşturmalarının önlerler (Genesan 2012; Gupta 2006).

Toplam Baz Numarası (TBN): Toplam baz numarası (TBN) bir miligram yağdaki bazik elementleri nötralize eden eşdeğer perklorik asit ile potasyum hidroksit (KOH) seviyesinin bir ölçüsüdür. TBN yağlayıcı maddenin servis ömrünü gösteren önemli bir parametredir. Ayrıca TBN yağ içerisindeki alkali yapıdaki katkı maddelerinin miktarındaki azalmayı da ifade etmektedir (Polat 2008).

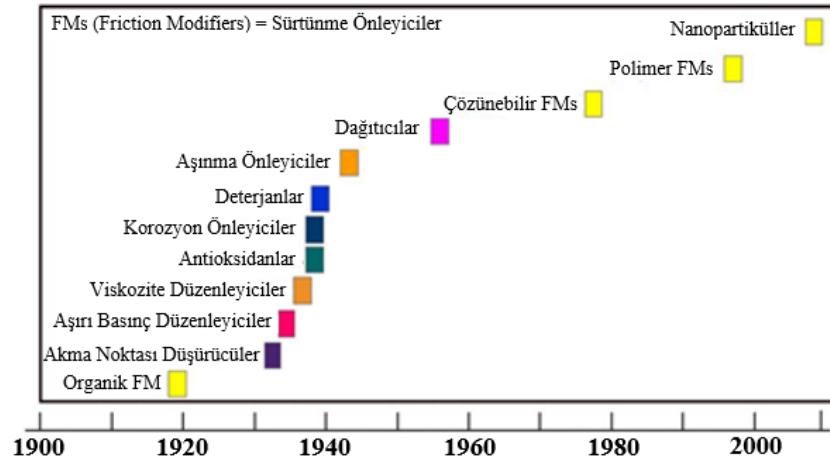
Toplam Asit Numarası (TAN): Toplam asit sayısı (TAN) bir miligram yağdaki asidik elementleri nötralize edebilen potasyum hidroksitin miligram cinsinden ölçüsüdür. Yanma işlemi sırasında meydana gelen fazla miktarda kükürt motor yağına karışır ve yağ içerisindeki sülfürik asit (H_2SO_4) oluşumu ile yağın asitlik seviyesini arttırır bunun sonucunda da TBN seviyesini azaltır (Polat 2008).

4. İÇTEN YANMALI MOTOR YAĞLARI İÇİN NANOPARTİKÜL KATKILARI

Nanopartiküllerin ortaya çıkarılması ile bu yapıların farklı uygulama alanlarında kullanılabilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmış ve bunun sonucunda da birçok farklı nanopartikül yapıları oluşturulmuştur. Bu nanopartiküllerin yaygın olarak kullanıldığı ve araştırıldığı alanlardan biriside triboloji alanıdır. Sürtünme ve aşınmayı azaltmak ve yağlamayı en iyi şekilde sağlayabilmek için çeşitli şekillerde elde edilmiş farklı nanopartiküller yağlayıcı maddelere performans artırıcı katkı maddeleri olarak katılmıştır. Günümüz teknolojik sistemleri ile daha küçük yapıların incelenip kontrol edilebilmesi nano yapılar üzerindeki çalışmalara olanak sunmuştur. Çalışmalardan olumlu sonuçların alınması, bu alanda araştırmaların hızlı bir şekilde artmasını ve farklı katkı maddelerinin üretilmesini sağlamıştır (Mang ve Braun 2001; Ussa 2016).

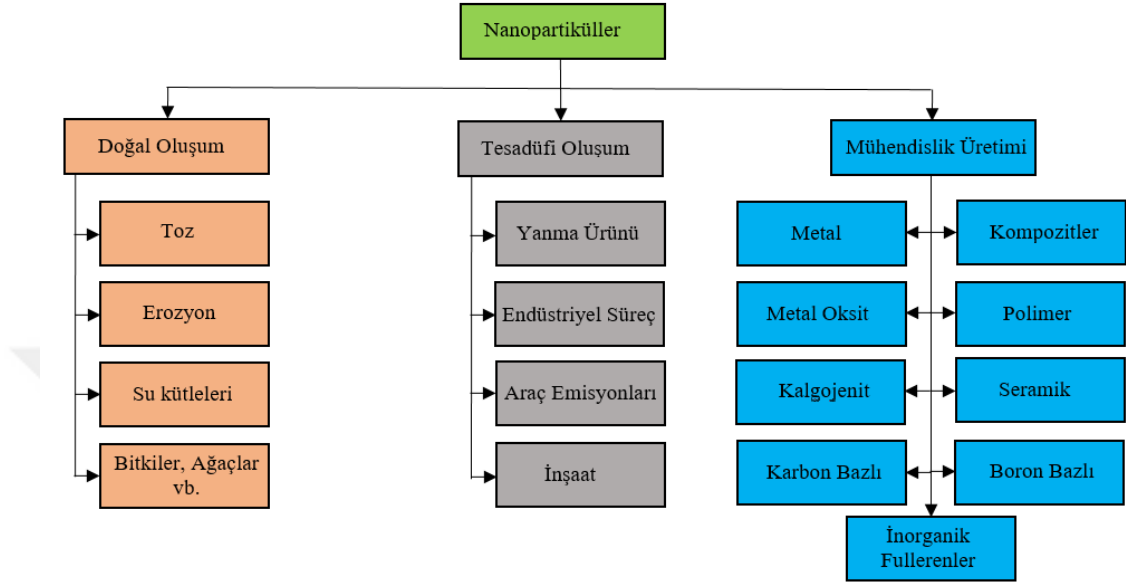
4.1 Nanopartiküllerin Sınıflandırılması

Yaygın olarak kullanılmaya başlandığı zamandan itibaren motor yağının; yüzey koruma özelliğinin artırılması, performansının artırılması ve bozulmadan uzun süre görevini yapması üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bunu sağlamak da yalnızca motor yağı içerisine katılan katkılarla sağlanmıştır. Yağlayıcı katkı maddelerinin zamansal gelişimi Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Şekildeki yağ katkı maddelerinin gelişiminin son adımında günümüzde de yaygın olarak araştırılan nanopartiküller görülmektedir.



Şekil 4.1: Yağlayıcı Katkı Maddelerinin Zamansal Gelişimi (Gulzar ve diğ. 2016)

Nanopartiküller tribolojik uygulamalar için doğal oluşum nanopartiküller, tesadüfî oluşum nanopartiküller ve mühendisler tarafından üretilen nanopartiküller olmak üzere üç ana başlık altında Şekil 4.2’deki gibi sınıflandırılmıştır (Gulzar ve diğ. 2016).



Şekil 4.2: Tribolojik Çalışmalar İçin Nanopartiküllerin Sınıflandırılması (Gulzar ve diğ. 2016)

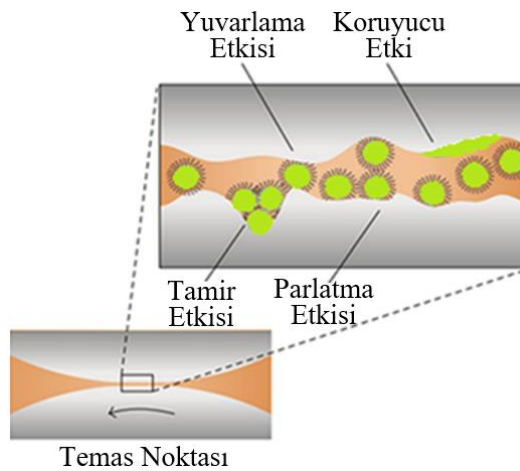
4.2 Yağ Katkısı Olarak Nanopartiküller

Kimyasal yapılarına bakılarak mühendislik nanopartikülleri metal, metal oksit, sülfür, nitrür, karbon bazlı ve diğer kompozit nanopartiküller olarak sınıflandırılmaktadır. Altın, gümüş, bakır, nikel, demir ve çinko gibi malzemeler metal nanopartikül katkı maddelerini oluşturur. Bu nanopartiküller baz yağlara katkı maddesi olarak katılır ve sürtünme yüzeyleri arasında yağ filmi oluşturarak sürtünme ve aşınmayı azaltmaya yardımcı olurlar. Metal oksit nanopartiküller yağlama özellikleri bakımında metallerle benzerdirler. MoS_2 , WS_2 , ve CuS gibi yaygın olarak kullanılan sülfidler de bir başka nanopartikül sınıfını oluşturmaktadır. Elmas parçacıkları, karbon nanotüpler ve grafen gibi malzemeler de karbon bazlı nanopartikülleri oluştururlar. Karbon bazlı nanopartiküller üzerine günümüzde yağ katkısı olarak oldukça yoğun çalışılmaktadır. Bunların dışında Cu/SiO_2 , $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, Cu/GO , $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ gibi iki farklı nanopartikülden oluşan hibrit ve kompozit yağ katkıları da mevcuttur. Bu çok fazlı nanopartiküller farklı yapılara ait özellikleri de içerdiğinden mükemmel sonuçlar gösterebilmektedirler (Srivyas ve Charoo 2018).

Günümüzde yaygın olarak metal, metal oksit ve karbon bazlı nanopartiküller kullanılarak motor yağlarının üstün performans sağlaması için çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle karbon bazlı nanopartiküllerin hem doğada biyolojik olarak çözülebilmesi hem de motor yağının tribolojik özelliklerini geliştirmesi bu katkı maddelerinin doğa dostu nano katkılar olarak isimlendirilmesini sağlamıştır. Otomotiv yağlayıcısı olarak kullanılan nanopartiküller sürtünme önleyici, aşınma önleyici, aşırı basınç önleyici, emisyon azaltıcı ve iyi yakıt tasarrufu gibi birçok ilave özelliklerinden dolayı son zamanlarda araştırmacıların fazlasıyla ilgisini çekmektedir. Nanopartiküller baz yağa eklenerek baz yağın sahip olduğu sürtünme, aşınma ve yağlama özelliklerinin iyileştirilmesi istenmektedir.

4.3 Nanopartiküllerin Yağlama Mekanizmaları

Yağlayıcı maddelerin tribolojik performansını arttırmak için eklenen katkılardan biriside nanopartiküllerdir. Nanopartiküllerin sürtünme yüzeyindeki tribolojik etkisinin anlaşılabilmesi için çeşitli yağlama mekanizmaları ortaya çıkmıştır ve nano katkının performansının değerlendirilebilmesi için bu yağlama mekanizmalarının bilinmesi gerekmektedir. Şekil 4.3'te gösterilen bu yağlama mekanizmalarından birincisi doğrudan yağlama mekanizması olarak adlandırılan, bilyeli rulman ve koruyucu film mekanizmaları, ikinci yağlama mekanizması ise dolaylı yağlama mekanizması olarak adlandırılan, tamir ve parlatma mekanizmalarıdır (Srivyas ve Charoo 2018).



Şekil 4.3: Nanopartiküllerin Yağlama Mekanizmaları (Gulzar ve diğ. 2016)

4.3.1 Yuvarlanma / Rulman Mekanizması

Nanopartiküller bu mekanizmada sürtünme yüzeyleri arasına girerek burada bilyeli yataklar gibi davranırlar. Bu mekanizmada nanopartiküller küresel yapıya sahiptir, bulundukları alanlarda kayma, kayma sürtünmesi ve yuvarlanma sürtünmesi hareketlerinin karışımı bir hareket yaparlar. Buradaki nanopartiküllerin şekillerinin ve sert yapılarının bozulmadan kalabilmesi için sürtünme yüzeyleri arasındaki yük koşullarının düşük olduğu tribolojik uygulamalar gereklidir (Gulzar ve diğ. 2016).

4.3.2 Koruyucu Film Oluşturma Mekanizması

Bu yağlama mekanizmasında parçaların sürtünme yüzeyinde nanopartiküller tarafından bir tribo-film yani yağlayıcı film tabakası oluşturulur. Bu film tabakası sürtünme yüzeyini tamamen kapatır ve yüzeylerin birbirine gerçek temas alanını azaltır. Yüzeydeki bu filmin oluşumu nanopartiküller tarafından desteklenir ve devamlılığı sağlanır. Böylece oluşabilecek sürtünme en aza indirilerek sürtünme katsayısının azalması ve aşınma direncinin artması sağlanır (Srivyas ve Charoo 2018).

4.3.3 Parlatma (Pürüzsüzleştirme) Etkisi Mekanizması

Bu mekanizmada nanopartiküller sürtünme yüzeyindeki düzensizliklerin içerisine girerek hem yüzeyin pürüzsüz hale gelmesini sağlar hem de sürtünme ve aşınma gibi tribolojik olumsuzlukları en aza indirirler. Sürtünme yüzeylerindeki tüm düzensizlikler nanopartiküller tarafından bir toplanma alanı olarak işlev görür. Bu mekanizmada sürtünme yüzeyi nanopartikül maddeler ile yumuşatılmakta ve böylece malzemenin tribolojik performansı artırılabilir (Gulzar ve diğ. 2016).

4.3.4 Tamir (Kendi Kendini Onaran) Etki Mekanizması

Bu mekanizmada sürtünme ve aşınma ile birlikte sürtünme yüzeylerinden birinde oluşabilecek parça kopması veya çatlama gibi durumlarda hasarın meydana geldiği bölgede nanopartiküller birikerek bu kısımların doldurulmasını sağlar. Bu şekilde hasara uğramış yüzeylerin tamiri yapılır ya da hasarın ileri boyutlara ulaşması engellenir (Srivyas ve Charoo 2018).

4.4 Nanopartiküllerin Performans Parametreleri

4.4.1 Nanopartiküllerin Boyutu

Yağlayıcı madde içerisindeki nanopartiküllerin boyutu yağlayıcı maddenin tribolojik performansını doğrudan etkileyen bir parametredir. Küçük boyutlardaki nanopartiküllerin sürtünme yüzeylerine nüfuz etmesi kolay olduğundan sürtünme ve aşınmayı azaltmaya yardımcı olurlar. Nanopartiküllerin boyutları ile sertlikleri bağlantılıdır. 100 nm ve daha büyük nanopartiküllerin sertlikleri boyutun azalmasıyla artar. Katkı maddesi olarak kullanılan nanopartikülün sertliği sürtünmeye maruz bırakılan malzemelerin sertliğinden yüksekse nanopartiküller bu yüzeylerde aşınmaya neden olarak çizikler oluşturur. Bu nedenle nanopartiküllerin boyutu ile sertliği arasındaki ilişki dikkate alınmalıdır. Nanopartikülün büyüklüğü sürtünme yüzeyindeki girintilerden büyük ise nanopartiküller temas bölgesinde birikir ve yağlamayı olumsuz etkiler. Ayrıca nanopartikül boyutu küçültülerek yağlayıcı içerisinde daha homojen bir şekilde dağılabilmesi sağlanır (Gulzar ve diğ. 2016; Srivyas ve Charoo 2018).

4.4.2 Nanopartiküllerin Dağılımı

Nanopartiküller yüksek yüzey enerjisine sahiptir ve bundan dolayı dağılmış oldukları baz sıvı içerisinde birbirine yaklaşmaya hatta yer çekimi etkisiyle çökelti oluşturmaya çalışabilir. Nanopartiküllerin çökmesi (sedimentasyon) yağlayıcı maddenin tribolojik olarak performansını azaltır. Bundan dolayı yağlayıcının performansını iyileştirmek, sürtünme ve aşınmayı en aza indirmek için nanopartikülün baz yağlayıcı içerisinde homojen bir şekilde dağılabilmesine (dispersiyon) dikkat edilir. Nanopartikülün yağlayıcı içerisinde homojen olarak dağılamaması durumunda çökme ve tıkanmalar meydana gelebilir. Kararlı süspansiyon ise nanopartikülün baz yağ içerisinde önemli miktarda birikmediği anlamına gelir. Etkili bir yağlayıcı madde katkısı için kararlı bir süspansiyon ön şarttır. Kararlı bir süspansiyon ile nanopartiküllerin birbirine yaklaşmasını ve çökelti oluşturmalarını engellemek için katkılı yağlar belirli sürelerde ultrasonik veya manyetik karıştırıcılarla karıştırılır. Burada en önemli faktör süredir ve bazen katkılı yağları uzun süre karıştırmak

gerekebilir. Ayrıca aynı karıştırma süresi, aynı sıcaklık, aynı hacim ve diğer koşulların da aynı olabilmesi testin güvenilirliğini etkiler (Srivivas ve Charoo 2018).

Nanopartiküllerin baz yağlayıcı içerisinde dağılımını kolaylaştırmak için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlar nanopartiküller yüzey modifikasyonu uygulanması ya da yüzey aktif madde kullanılmasıdır. Bunları sağlamak için en yaygın kullanılan madde ise oleik asittir. Oleik asit nanopartiküllerin etrafına emilerek nanopartikülün yüzey enerjisini azaltır, topaklaşmayı ve çökmeyi engeller. Bunun dışında kolay ve ekonomik olmasında dolayı Sürfaktan, Sodyum Dodesil Sülfat (SDS), Benzalkonyum Klorür gibi dispersanlar da kullanılarak nanopartiküllerin yağlayıcı içersine homojen bir şekilde dağıtılması sağlanır (Srivivas ve Charoo 2018).

4.4.3 Nanopartikülün Şekli ve Yapısı

Nanopartiküllerin şekli ve yapısı tribolojik uygulamalarda büyük öneme sahiptir. Nanopartiküller küresel, katman, çok yüzlü, lamel gibi farklı şekillerde olabilirler. Nanopartiküllerin yüzey enerjilerinin yüksek olması ve bu yüzey enerjisini her yönde homojen olarak dağıtabilmek için genellikle küresel şekil tercih edilir. Küresel şekiller sürtünme yüzeyler arasında bir bilye işlemi görerek yuvarlanma sağlar ve yüzeylerin birbirine doğrudan temas etmesini engeller. Aynı zamanda küresel nanopartiküler aşırı basınç özellikleri gösterir ve yük taşıma kapasiteleri oldukça yüksektir. Küresel yapıdan kaynaklı olarak sürtünme yüzeylerinde noktasal temaslar meydana getirir. Nano yağlayıcı yapıların çoğunda küresel yapıli nanopartiküller tercih edilmektedir. Grafen, MoS₂ gibi yapılarda ise nanopartiküller katman şeklindedir. Bu katmanlı yapı da sürtünme yüzeyleri arasında yağlama filmleri oluşmasına ve yüksek yük koşullarında üstün tribolojik özelliklerin oluşmasına olanak sağlar (Gulzar ve diğ. 2016).

4.4.4 Nanopartiküllerin Konsantrasyonu

Nanopartiküllerin performans parametrelerinden bir diğeri de konsantrasyon miktarlarıdır. Nanopartikül madde konsantrasyonunun çok fazla olması veya çok az olması temas yüzeyleri arasındaki sürtünme ve aşınmayı arttırarak beklenilenin tersine

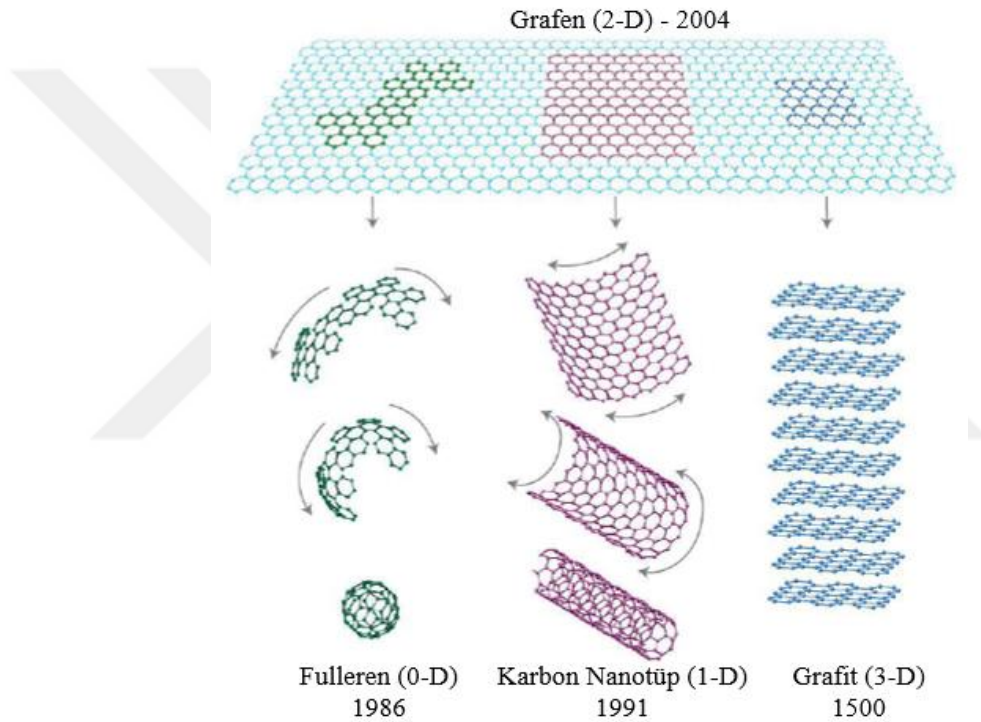
etki yapar. Bir yağlayıcı için uygun nanopartikül konsantrasyonunu belirlemek için dispersiyon zamanı ve yöntemi, nanoparçacığın özellikleri ve tribolojik test koşullarının bilinmesi gereklidir. Tribolojik testlerin yani sürtünme aşınma testlerinin disk üstü pim, disk üstü bilye, plaka üstü sistemler, halka üstü sistemler ya da dört toplu bir tribometre cihazlarından hangisiyle yapıldığı önemlidir. Yapılan araştırmaların ideal nanopartikül konsantrasyonunun çalışma sistemine ve mekanizmasına bağlı olduğunu, farklı sistemler için ideal nanopartikül konsantrasyonunun değişeceğini göstermektedir (Gulzar ve diğ. 2016). Bundan dolayı gerçek çalışma ortamını en iyi şekilde yansıtacak tribometreler seçilip, testler uygun koşullar altında yapılmalıdır.

4.5 Grafen, Grafenin Özellikleri ve Grafen Oksit

Nanoteknolojinin en önemli malzemelerinden olan karbon yapısı, nanomakinalar, nano yapılar gibi birçok nano boyutta sistemin temelini oluşturur. Grafen nanopartikülü ise karbon atomlarından meydana gelen bal peteği yapısında son yıllarda bilimsel olarak oldukça ön planda olan iki boyutlu, düzlemsel bir malzemedir. Grafen, grafit ve farklı boyuttaki tüm türevlerinin temel yapı taşıdır. Grafen 2004 yılında Andre Geim ve Konstantin Novoselov isimli Rus bilim adamları tarafından keşfedilmiş ve o zamandan günümüze kadar birçok çalışmanın temel noktası olmuştur. Bilim adamları bu çalışmaları sonucu 2010'da Nobel Ödülü'nü almışlardır. İki boyutlu bir malzeme olan grafen, geleneksel malzemelerin sahip olmadığı benzersiz sürtünme ve aşınma özelliklerine sahiptir. İyi bilinen termal, elektrik, optik ve mekanik özellikleriyle birlikte grafen, katı veya kolloidal sıvı yağlayıcı olarak da kullanılabilir. Yoğun şekilde paketlenmiş ve atomik olarak pürüzsüz yüzeyi üzerindeki kimyasal inertliği, aşırı dayanıklılığı ve etkileyici tribolojik davranışları grafenin başlıca olumlu özellikleridir. Bununla birlikte grafenin yüksek derecedeki aşınma gücü malzeme aşınmasını önler (Geim ve Novoselov 2007; Dörtoğul 2018; Ismail 2017).

Grafen içerisinde karbon bağları arası mesafe $0,142\text{ nm}$ 'dir. Grafen karbon allotroplarından biridir ve atomik olarak pürüzsüz bir yüzey oluşturan karbon atomu tabakası olarak bilinir. Ayrıca grafen sıvı ve gaz yapılara karşı geçirimsiz olup bulunduğu yüzeyde oksidasyon reaksiyonlarını ve korozyon oluşumunu yavaşlatır.

Grafen yüksek yük taşıma, yüksek kimyasal kararlılık ve moleküller arası güçlü bağ kabiliyetinden dolayı araştırmacılar için eşsiz bir yapı olarak görülmüştür. Grafenin termal iletkenliği $5000 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ 'dir ve bu özelliği ile altın ve bakır gibi günümüzde termal iletkenliği iyi olarak bilinen malzemelerden daha iyi termal özelliklere sahiptir. Grafen yüksek oranda şeffaflığa sahip bir malzemedir ve çok yüksek sertlikte bir malzeme olup, yüksek young modülüne ($E = 1,0 \text{ TPa}$) sahiptir. Grafen yarı iletken bir malzeme olup, çok geniş bir yüzey alanına ($2675 \text{ m}^2/\text{g}$) sahiptir (Dörtoğul 2018). Şekil 4.4'te grafen yapısı temelinde oluşan fulleren, karbon nanotüp ve grafit yapıları gösterilmektedir.



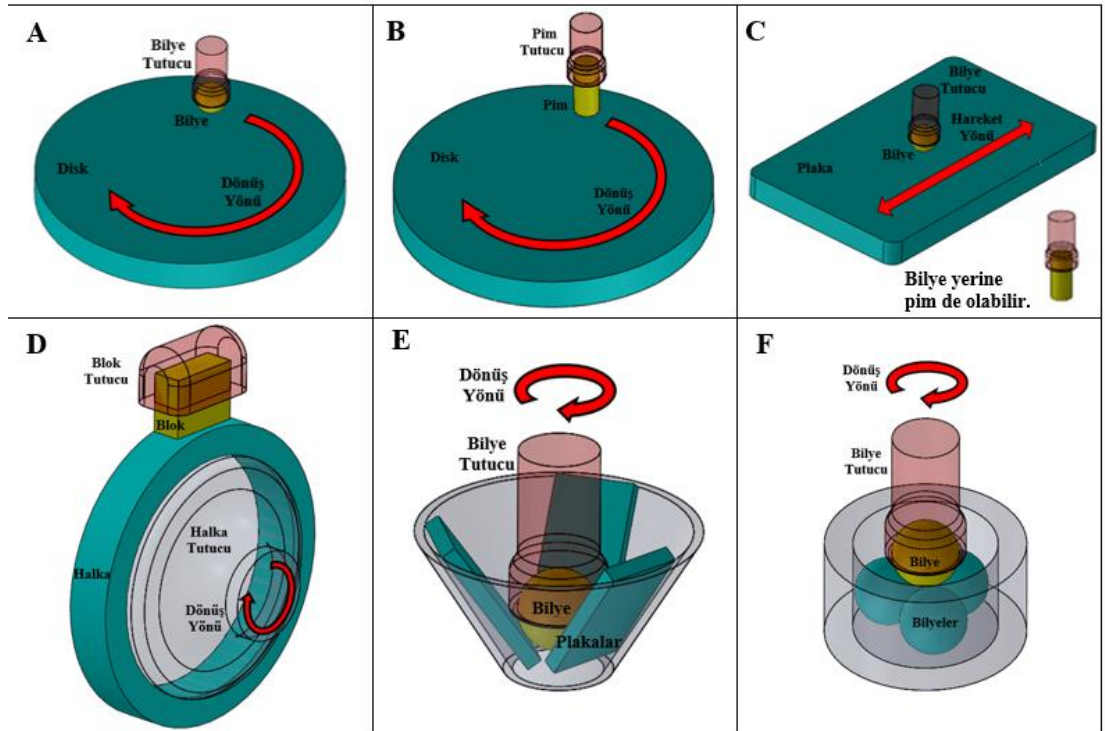
Şekil 4.4: Grafitin Diğer Formları (Ismail 2017)

Grafen oksit (GO) ise asit ve antioksidanlar ile grafit yapısının kullanılarak kimyasal metotlarla elde edilen malzemedir. Grafen oksitin üretilme nedeni grafen bazlı malzemelerden daha fazla üretebilmek ve grafenin maliyetini düşürmektir. Grafen oksit yapısı grafen yapısına göre hidrofilik özelliği sayesinde çözeltiler içerisinde kolay bir şekilde dağılıp homojen karışım oluşturabilmektedir. Bunun yanında şeffaf olması, elektriği iletmemesi ve yine mekanik özelliklerinin iyi olması grafen oksitin uygulamada kendine geniş bir kullanım alanı bulmasını sağlamıştır (Zhu ve diğ. 2010).

5. TEST YÖNTEMLERİ

5.1 Sürtünme Ölçüm Yöntemleri

Motor ve birlikte çalışan makine parçalarının daha uzun ömürlü olabilmesi ve daha verimli bir şekilde çalışabilmesi için bu makine elemanlarının tribolojik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Makine elemanlarında bu özellikleri belirleyebilmek için farklı konfigürasyonlara sahip çeşitli tribometreler kullanılmaktadır. Tribometreler genellikle tribolojik araştırmalar için standart malzemeler olarak kullanılır ve bu donanımların bir kısmı Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) tarafından belirtilir. Tribometre testlerinde uygulanan yük, hız, nem ve sıcaklık kontrol edilerek, makine elemanının gerçek çalışma koşullarındaki kabiliyetleri için yararlı ve gerçekçi sonuçlara ulaşılır. Farklı test koşulları içinde ayrıntılı bir fikir oluşturacak bu ölçüm yönteminde yaygın olarak Şekil 5.1’de gösterilen tribometreler kullanılmaktadır (Paul ve diğ. 2019).



Şekil 5.1: Farklı Konfigürasyonlara Sahip Tribometrelerin Şematik Gösterimi
A) Disk Üstü Bilye B) Disk Üstü Pim, C) Plaka Üstü Bilye ya da Pim, D) Halka Üstü Blok, E) Üç Plaka Üstü Bilye, F) Dört Bilyeli Tribometre (Paul ve diğ. 2019)

Herhangi bir sürtünme ve aşınma test sonucu yük, makine karakteristikleri, kayma hızı, kayma mesafesi, çevre ve malzeme özellikleri gibi sistem parametrelerine bağlı olarak değişecektir. Bu parametreler aşağıda olduğu gibi ifade edilmiştir.

- Yük = Parçaların temas noktasında etki eden kuvvet değeridir (N).
- Hız = Temas yüzeyleri arasındaki kayma hızıdır (m/s).
- Mesafe = Metre cinsinden toplam temas mesafesidir (m).
- Sıcaklık = Temas alanında numunenin bulunduğu alandaki sıcaklıktır ($^{\circ}C$).
- Atmosfer = Test ortamını çevreleyen nem, hava, argon, yağlayıcı vb.

Yapılan testlerde yük hücreleri (Load cell) tarafından belirlenen sürtünme kuvvetinin, tutucu üzerine konan ve temas noktasına etkiyen yüke bölünmesi ile aşağıdaki formülde olduğu gibi sürtünme katsayısı elde edilir (ASTM 2011).

$$\mu_k = \frac{\text{Sürtünme Kuvveti}}{\text{Uygulanan (Normal) Kuvvet}} = \frac{f_k}{f_n} \quad (5.1)$$

5.1.1 Disk Üstü Bilye (Ball On Disc) Test Yöntemi

Disk üstü bilye tribometresinde bilye ile disk arasında bir noktasal temas kurulmaktadır. Testler genellikle ASTM 99 standardına uygun olarak yapılır. Tribometrenin çalışması dönen bir dairesel disk yüzeyinde sabit haldeki küresel bir bilyenin sürtünmesiyle olur. Disk üzerinde oluşan kayma izi dairesel bir yoldur. Bilye, üzerine yükün uygulanabildiği bir tutucuya sabitlenmiştir. Dönen disk ve sabit bilye, yük hücreleri yardımıyla sürtünme kuvvetini oluşturur. Şekil 5.1 A’da disk üstü bilye test cihazına ait çalışma mekanizması şematik olarak gösterilmiştir (Polat 2008).

5.2 Aşınma Ölçüm Yöntemleri

Triboloji sürtünme ve bundan kaynaklı oluşan aşınmayı bir arada ele alan bir bilim dalıdır. Aşınma birbiriyle etkileşim halinde olan yüzeylerin birinden göreceli hareketin sonucunda malzemenin çıkarılması işlemidir. Aşınma; beraber çalışan parçalardan oluşan sistemin verimliliğini düşürür, güç kayıplarını artırır ve parçaların çalışma ömrünü kısaltır. Bu gibi olumsuzlukları en aza indirmek ve çözüm bulabilmek

için aşınmanın miktarının belirlenmesi gerekir. Aşınma miktarının lmesi için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden mühendislik sistemlerinde daha çok kullanılanlarından bazıları aşağıdaki gibidir.

5.2.1 Ağırlık Kaybı Yöntemi

Basit olması, ekonomik olması ve kullanılan ölçüm aletine göre oldukça hassas sonuçlar elde edilmesinden dolayı ağırlık kaybı yöntemi malzeme aşınma miktarının belirlenmesinde en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Ağırlık kaybının ölçülmesi için aşınan malzeme miktarına göre hassas teraziler kullanılır. Ağırlık kayıpları kayma mesafesine göre birim kayma yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı g/km veya mg/m cinsinden ağırlık kaybı birim alan için hesaplanacaksa gr/cm^2 , ağırlık kaybı hacimsel olarak hesaplanacaksa malzemenin yoğunluğunu da hesaba katılarak birim hacimdeki aşınma miktarı cm^3/m ya da cm^3/cm şeklinde ifade edilir (Cesur 2008).

5.2.2 Kalınlık Farkı Yöntemi

Kalınlık farkı ile ölçüm yöntemi başlangıçta ölçüsü bilinen bir malzemenin, aşınma testine tabi tutulup ölçüm öncesi ve ölçüm sonu değerlerinin karşılaştırılması suretiyle yapılır. Kalınlık farkının tespit edilip malzemenin yoğunluğunun da bilinmesi ile hacimsel kayıp veya ağırlık kaybı olarak da hesaplama yapılabilmektedir. Kalınlık farkı hassas ölçüme aletleri ile mikron hassasiyetinde yapılabilir (Cesur 2008).

5.2.3 İz Değişim Yöntemi

İz değişimi yöntemi sürtünme sonucunda temas yüzeyindeki kalıcı deformasyonların llmesine dayanmaktadır. Testlerde zellikleri bilinen bir malzemenin üzerindeki izin boyutunun değişimi ölçülür. Bilye gibi küresel parçaların sürtünme testi sonucunda yüzeyinde oluşan izlerin mikroskop altında ölçülüp aşınma miktarının belirlenmesi bu aşınma ölçüm yöntemine güzel bir örnektir. Bilye zerindeki aşınma çapının belirlenip bu aşınma çapından ağırlık kaybı ya da hacimsel aşınma kaybının hesaplanması için bu yöntem kullanılır (Karabaşoğlu 2008).

6. METERYAL VE METOD

6.1 Grafen

Grafen oksit (GO) yapısının elde edilebilmesi için gereken grafit yapısı Nanografi firmasından temin edilmiştir. Temin edilen grafitin analiz sonuçları ve bazı özellikleri Tablo 6.1 ve 6.2’de gösterildiği gibidir.

Tablo 6.1: Grafit Elemental Analiz Sonuçları (Aytaş 2016)

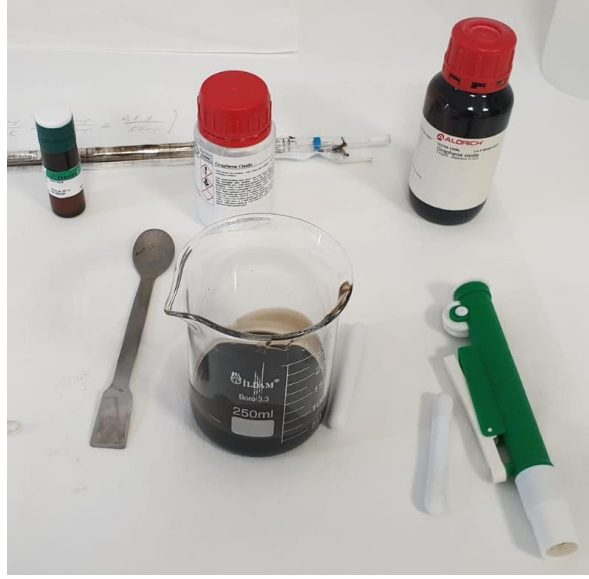
Elementler	Ortalama (% Ağırlık)
Karbon (C)	77,25
Oksijen (O)	15,63
Diğer Elementler (H, N, S)	7,12
C/O	4,94

Tablo 6.2: Grafenin Nanopartikülünün Bazı Özellikleri

Grafen Özellikleri	
Young modülü	1100 GPa
Çekme mukavemeti	130 GPa
İletkenlik	15.000 cm ² /V.s
Yüzey alanı	2675 m ² /g

6.2 Grafen Oksit Sentezi

Grafit nanopartikülünden Grafen Oksit (GO) elde etmek için kimyasal yöntemlerden Modifiye Hummers Metodu kullanılmıştır (Yazıcı ve diğ. 2016). İlk olarak buz banyosu içerisinde 10 g toz grafit, 5 g sodyum nitrat (NaNO₃), 250 mL %96,4’lük sülfürik asit (H₂SO₄) ilave edilmiş ve 1 saat karıştırılmıştır. Bu karışıma 15 g potasyum permanganat (KMnO₄) yavaşça eklenmiştir. Bu aşamada buz banyosundaki sıcaklığın 5 °C’nin altında olmasına dikkat edilmiştir. Sonrasında, çözelti buz banyosundan çıkartılıp 2 saat karıştırılmıştır. Bu işlemler esnasında karışım sıcaklığının 35-40 °C aralığında olması sağlanmıştır. Bir sonraki aşamada çözeltiye yavaşça 1 L deiyonize su eklenerek 1 saat karıştırılmaya devam edilmiştir. Ortam sıcaklığı 40 °C altında tutularak çözeltiye 16,8 mL hidrojen peroksit (%35,7) eklenerek 2 saat karıştırılmıştır. Böylece Şekil 6.1’de gösterilen karışım elde edilmiştir.



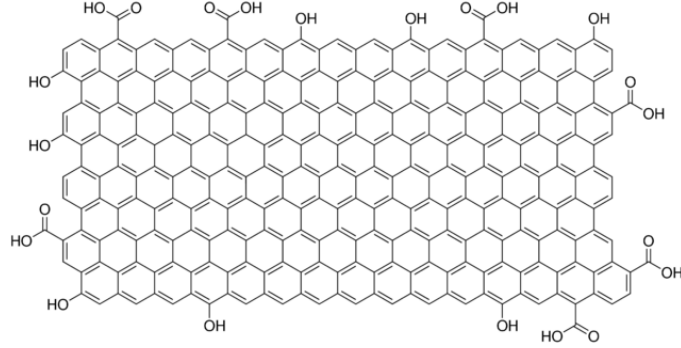
Şekil 6.1: Grafen Oksit Yapısının Hazırlanması

Sonraki aşamada çözelti deiyonize su ile pH nötral oluncaya kadar yıkanmış ve filtre edilmiştir. Filtrasyon işleminden sonra GO yapılarının çözelti içerisinde birikmesini engellemek ve homojenize karışımlar elde etmek için bileşiğe oleik asit ilave edilmiştir. Nihai elde edilen malzeme Şekil 6.2’de gösterilen 50 °C’de etüvde 24 saat kurutulmuş ve kullanıma hazır hale getirilmiştir.



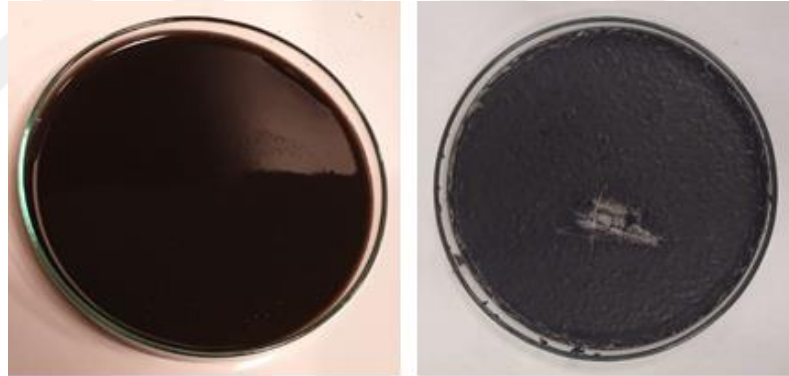
Şekil 6.2: Grafen Oksitin Fırında Kurutulması

Bütün aşamalar sonucunda başlangıçta sıvı halde olan GO karışımı kurutularak toz haline getirilmiş ve motor yağı katkı maddesi olarak nano boyutlu GO elde edilmiştir. Elde edilen GO levhasının kimyasal yapısı Şekil 6.3'te görüldüğü gibidir.



Şekil 6.3: Grafen Oksit Levhası (Aytaş 2016)

Şekil 6.4'te Modifiye Hummers Metodu ile elde edilen GO yapısının kurutma fırınına koymadan önceki ve kurutma fırınından çıkartıldıktan sonraki durumları gösterilmektedir.



Şekil 6.4: Grafen Oksitin Kurutulmadan Önceki ve Sonraki Durumları

Üretim işlemlerinin ardından temel yapı grafen ve elde edilen yeni yapı grafen oksite ait bazı özellikler Tablo 6.3'te karşılaştırılmıştır.

Tablo 6.3: Grafen ve Grafen Oksit (GO) Özelliklerinin Karşılaştırılması

Test	Grafen özellikleri	Grafen Oksit (GO)
Dış Görünüş (Renk)	Siyah	Siyah
Dış Görünüş (Form)	Toz Halde	Toz Halde
Kızılötesi görünüm	Yapı İle Uyumlu	Uyumlu
X ışını kırılması	Yapı İle Uyumlu	Uyumlu
Karbon İçeriği	≥ %75	%81
Nitrojen içeriği	≤ %5	%3

6.3 Motor Yağı

Çalışmalarda kullanılan motor yağı Petrol Ofisi Maximus LA 10W-40 tam sentetik motor yağıdır. Motor yağının tipik özellikleri Tablo 6.4'te gösterildiği gibidir.

Tablo 6.4: Maximus LA 10W-40 Tam Sentetik Motor Yağı Tipik Özellikleri

MAXİMUS LA 10W-40 Tam Sentetik Motor Yağı Tipik Özellikleri		
Görünüm	Sıvı	
Renk	Sarı	
SAE Viskozite Sınıfı	10W-40	
Yoğunluk, @ 15 ° C , kg / m^3	ASTM D-4052	860
Parlama Noktası, OC (Open cup.), ° C	ASTM D-92	237
Viskozite, 40 ° C , mm^2 / s	ASTM D-445	95,0
Viskozite, 100 ° C , mm^2 / s		14,4
Viskozite İndeksi	ASTM D-2270	166
Akma Noktası, ° C	ASTM D- 97	-36

6.4 Grafen Oksit Katkılı Motor Yağının Hazırlanması

Petrol Ofisi Maximus LA 10W-40 tam sentetik motor yağı baz yağ olarak kullanılmış ve baz yağa ilaveten 4 farklı orandaki GO nanopartikülü ile karışım hazırlanmıştır. Baz motor yağı içerisine 0,5-1,0-1,5 ve 2,0 mg/mL oranlarında GO nanopartikülleri eklenerek farklı konsantrasyonlarda GO katkısı içeren motor yağları oluşturulmuştur. Bu katkı oranlarındaki GO nanopartiküllerini uygun miktarda motor yağı içerisine karıştırmak için Şekil 6.5'te gösterilen ve 0,0001 g hassasiyetle ölçüm yapabilen Shimadzu ATX 224 marka hassas terazi kullanılmıştır.



Şekil 6.5: 1×10^{-4} g Hassasiyette Ölçüm Terazisi

Belirlenmiş konsantrasyonlarda baz yağ içerisine ilave edilen GO nanopartikülün homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak ve sonrasında çökelme meydana gelip, tortu oluşmasını engellemek için Hielscher UP400S marka ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Ultrasonik karıştırıcı cihaz Şekil 6.6’da gösterilmiştir.



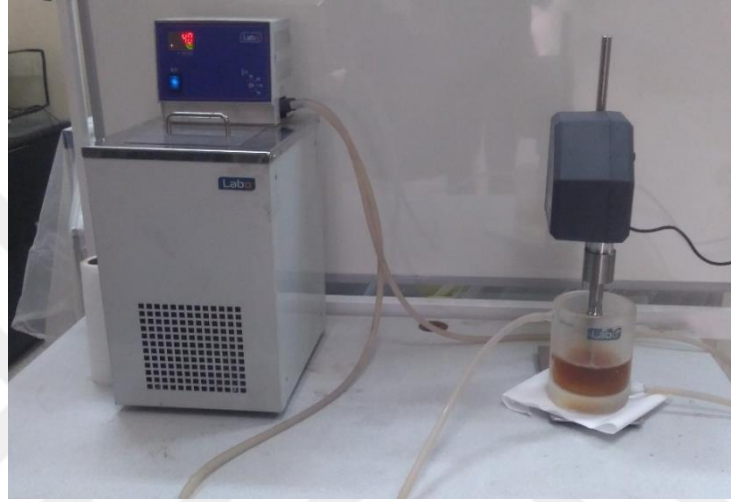
Şekil 6.6: UP400S Ultrasonik Karıştırıcı ve Soğutmalı Karıştırma Kabı

Karıştırma esnasında tüm karışımların homojenize olması ve aynı nitelikte karışması için ultrasonik karıştırıcı cihazın, çevrim (Cycle) değeri 1 ve salınım genliği (Amplitude) %75 olarak kullanılmıştır. Ultrasonik karıştırma işlemi her farklı konsantrasyon için 60 dakika olarak belirlenmiştir. Şekil 6.7’de GO katkılı yağların karışımdan önceki sonraki görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 6.7: Ultrasonik Karıştırmadan Önce ve Sonra Grafen Oksit Katkılı Motor Yağının Görüntüleri

Ultrasonik karıştırma işlemi sırasında hem karıştırıcı cihazın sıcaklığının yüksek seviyelere ulaşip zarar görmemesi hem de motor yağının yüksek sıcaklıklara çıkıp yapısının bozulmaması için sistem bir soğutucu ünite ile desteklenmiştir. Karıştırma işlemi için kullanılan karıştırma kabının iç yüzeyinden devamlı olarak devirdaim olan 4 °C'deki antifiriz katkılı özel soğutucu akışkan motor yağının ısınmasını ve ultrasonik karıştırıcının yüksek sıcaklıklara çıkmasını engellemektedir. Soğutucu akışkan devirdaim sistemi ve ultrasonik karıştırıcı sistemi Şekil 6.8'de gösterilmektedir.



Şekil 6.8: Soğutucu Devirdaim Ünitesi ve Ultrasonik Karıştırma Cihazı

Ayrıca sistemin sıcaklığını manuel kontrol edip, sıcaklığın yüksek değerlere çıkıp hem motor yağının özelliklerine hem de ultrasonik karıştırma cihazına zarar vermesini engellemek için Şekil 6.9'da gösterilen Infrared Sıcaklık Ölçer AR5200 cihazı kullanılmıştır. Bunun dışında farklı konsantrasyonlar arasında geçiş yapılırken ultrasonik karıştırıcı probunun sıcaklığı infrared ısı ölçer ile kontrol edilmektedir. Bu sıcaklığın istenilen değerden yüksek çıkması durumunda ultrasonik karıştırıcının belli sürelerde dinlenmesi sağlamıştır.



Şekil 6.9: Infrared Sıcaklık Ölçer AR5200

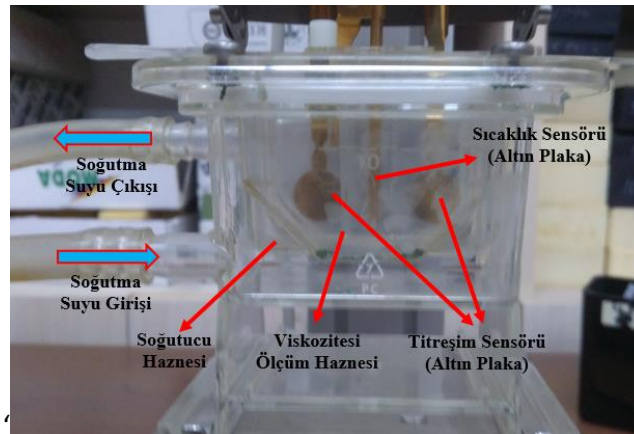
6.5 Viskozite Ölçümü

GO katkılı motor yağlarının ve baz yağ olarak kullanılan 10W-40 tam sentetik motor yağının viskozitelerini belirlemek için üniversitemizin Makine Mühendisliği Uygulama Laboratuvar'ında yer alan AND SV-10 marka titreşimli viskozimetre kullanılmıştır. 10W-40 motor yağının özelliklerinin biliniyor olmasına rağmen tekrar viskozitesinin ölçülmesinin nedeni tüm yağlayıcıların aynı koşullarda değerlendirilebilmelerinin amaçlanmış olmasıdır.



Şekil 6.10: Viskozite Ölçüm Cihazı

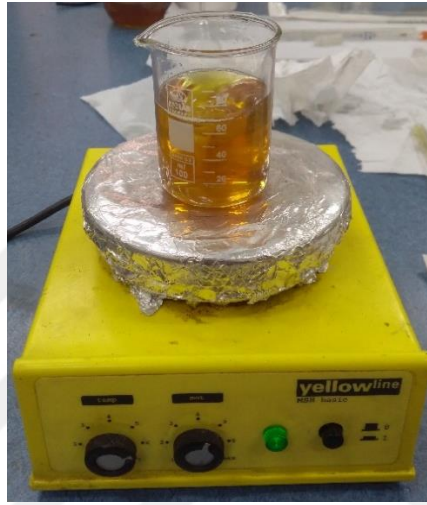
Viskozite ölçüm cihazı, ölçüm birimi ve ölçüm haznesinden meydana gelmektedir. Ölçüm birimi aşınmaya dayanıklı altın malzemeden yapılmış titreşim sensörü ve sıcaklık sensörlerinden oluşmaktadır. Viskozite ölçüm cihazının kısımları Şekil 6.11'de gösterilmektedir.



Şekil 6.11: Viskozite Ölçüm Cihazı Ölçüm Birimi ve Ölçüm Haznesi

Motor yağının çalışma sıcaklıkları göz önüne alınarak GO katkılı motor yağlarının viskozite ölçümleri 0 °C ile 100 °C aralığında yapılmıştır. Yağ sıcaklığının kontrol edebilmek için harici soğutma sistemi ve manyetik karıştırıcı kullanılmıştır.

GO katkılı motor yağlarının yüksek sıcaklık değerlerinde viskozitelerini ölçebilmek için Şekil 6.12’de gösterilen ısıtıcı manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Manyetik karıştırıcı ile yağ sıcaklıkları 100 °C civarına çıkarılıp viskozite test cihazının ölçüm haznesine bu şekilde konulmuş ve ölçüme başlanmıştır.



Şekil 6.12: Isıtıcı Manyetik Karıştırıcı

Daha sonra yağ sıcaklığı Şekil 6.13’te gösterilen soğutucu haznelerden -17 °C sıcaklıkta soğutucu akışkan devir daim edilerek 0 °C civarına düşürülmüştür.



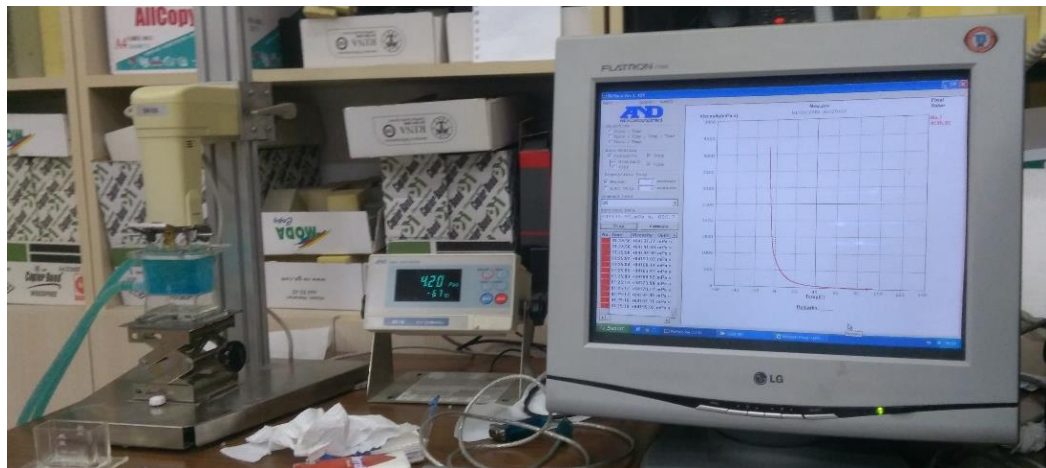
Şekil 6.13: Soğutucu Akışkanın -17 °C Olduğu Durum

Viskozite ölçüm verileri anlık olarak sıcaklık ve viskozite değerleriyle birlikte Şekil 6.14'teki gösterge ünitesinde görülebilmektedir.



Şekil 6.14: Viskozite Ölçüm Cihazı ve Gösterge Ünitesi

Viskozite ölçümünden elde edilen sıcaklık ve viskozite verileri RsVisco programı kullanılarak anlık olarak değişimlerin görülebildiği viskozite-sıcaklık grafiği oluşturulmuştur. Bu grafik baz yağ ve farklı GO konsantrasyonu için ayrı ayrı çizilmiştir. Şekil 6.15'te viskozite ölçüm cihazı, gösterge ünitesi ve RsVisco programında oluşturulan viskozite-sıcaklık grafiği gösterilmektedir.



Şekil 6.15: Viskozite ölçümü ve Viskozite-Sıcaklık grafiği

6.6 Viskozite İndeksi Hesaplamaları

Viskozite indeksi (VI), yağlayıcıları ve diğer petrol ürünlerinin 40 °C ve 100 °C arasındaki değişimlerinden dolayı kinematik viskozitelerindeki değişim kabul edilen ve yaygın olarak kullanılan bir ölçüsüdür. Viskozite indeksi, yağlayıcı maddede sıcaklık değişiminin viskozite üzerine etkisini ifade eden ampirik bir sayıdır. Yüksek viskozite indeksi yağlama maddesinin yükselen sıcaklığı ile kinematik viskozitede daha az bir düşüş olduğunu gösterir (ASTM 2007). Hesaplamalar için akışkanın 40°C ve 100°C’lerdeki dinamik viskozitesi hesaplanır ve ardından kinematik viskozitesi bulunur. Bulunan bu değerler ASTM D2270 standardında yer alan prosedüre göre akışkanların 100 °C’deki kinematik viskozitesi 2 mm²/s ile 70 mm²/s arasında olan yağlayıcılar için prosedür A ve kinematik viskoziteleri 70 mm²/s’den daha büyük akışkanlar için prosedür B uygulanır.

Bu çalışmada viskoziteleri belirlenen yağlayıcıların 100 °C’deki kinematik viskoziteleri 2 mm²/s ile 70 mm²/s aralığında olduğundan standarda uygun olarak A prosedürüne göre hesaplamalar yapılmıştır. A prosedüründe 100 °C’deki yağların kinematik viskozitesi 70 mm²/s’ye (cSt) eşit veya daha düşükse, Tablo 1’den *L* ve *H* için karşılık gelen değerleri hesaplanır (ASTM International 2007). Tablo 1 aralığından farklı değerler doğrusal enterpolasyon ile hesaplanabilir. 100 °C’de 2,0 mm²/s daha düşük kinematik viskoziteye sahip yağlar için bu prosedürde viskozite indeksi tanımlanmamıştır.

$$VI = \left[\frac{L-U}{L-H} \right] \times 100 \quad (6.1)$$

L = 100 °C’de viskozite indeksi hesaplanacak yağla aynı kinematik viskoziteye sahip 0 viskozite indeksine sahip bir yağın 40 °C’de kinematik viskozitesi, mm²/s

H = Viskozite indeksi mm²/s olarak hesaplanacak olan yağ ile 100°C’de aynı kinematik viskozitede 100 viskozite indeksine sahip bir yağın 40°C’de kinematik viskozitesi, mm²/s

U = Viskozitesi belirlenmiş olan yağın 40 °C’deki kinematik viskozitesi indeks mm²/s olarak hesaplanacaktır.

Her bir yağlayıcının daha önceden deneylerle belirlenen 40 °C ve 100 °C’deki viskoziteleri ve hesaplanan kinematik viskozite değerleri ile Denklem 6.1 kullanılarak tüm yağlayıcılar için viskozite indeksleri hesaplanmıştır.

6.7 Yoğunluk Ölçümü

10W-40 tam sentetik motor yağının ve nano GO katkılı motor yağının yoğunluk ölçümleri DDM 2911 marka cihaz ile yapılmıştır. Cihazın bazı teknik özellikleri Tablo 6.5’te gösterilmiştir. Yoğunluk ölçümlerinde kullanılan cihazın görünümü Şekil 6.16’da verilmiştir.

Tablo 6.5: Yoğunluk Ölçüm Cihazı Teknik Özellikleri

Teknik Özellikler	
Test Metodu	ISO 20884 ve ASTM D7039
Boyutlar	33 cm (G) x 30 cm (D) x 23 cm (Y)
Doğruluk	0,00005 g/cm ³ , Sıcaklık:0,02 °C
Çözünürlük	0,00001 g/cm ³ , Sıcaklık:0,01 °C
Yoğunluk Aralığı	0-3 g/cm ³
Sıcaklık Aralığı	0-100 °C
Basınç Aralığı	0-10 Bar
Minimum Numune Hacmi	1 mL
Ölçüm Tekniği	Mekanik Salımlı U-Tüp Yöntemi
Ölçüm Modları	Sürekli, Tek, Çoklu
Ölçüm Zamanı	30-40 saniye



Şekil 6.16: Yoğunluk Ölçüm Cihazı

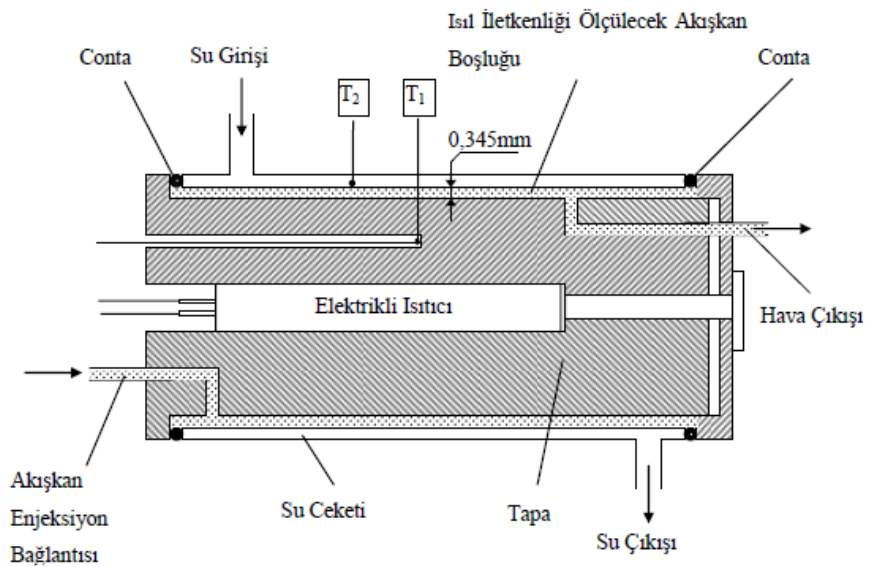
6.8 Isıl İletkenlik Katsayısının Belirlenmesi ve Hesaplamalar

Baz motor yağı ve grafen oksit katkılı motor yağlarının ısı iletkenliklerini ölçmek için, üniversitemizin Gıda Mühendisliği Laboratuvar'ında yer alan sıvı ve gaz maddelerin ısı iletkenliklerini ölçebilen P.A Hilton Limited-H471 marka cihaz kullanılmıştır. Deney düzeneği, bir silindirik ölçüm ünitesi ve bir ana konsol olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Şekil 6.17'de silindirik ölçüm ünitesi gösterilmektedir.



Şekil 6.17: Isıl İletkenlik Katsayısı Ölçüm Ünitesi ve Bağlantıları

Şekil 6.18'de ölçüm ünitesinin kesiti üzerinde yer alan teçhizatları, ünitenin boyut özellikleri, soğutucu akışkan, havanın ve akışkanın giriş çıkış noktaları detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.18: Silindirik Ölçüm Ünitesi Kesit Görünümü (Özkal ve Tülek 2001)

Bununla birlikte silindirik ölçüm ünitesindeki ısıtıcı elemanın anlık çektiği elektrik gerilimini tespit edebilmek için bir multimetre ve yağların farklı sıcaklıklardaki ısı iletkenliğinin ölçmek için PID sıcaklık kontrollü Polscience marka bir soğutucu akışkan devirdaim ünitesi kullanılmaktadır. Şekil 6.19’da ısı iletim katsayısı ölçümünde kullanılan deney düzeneği gösterilmiştir.

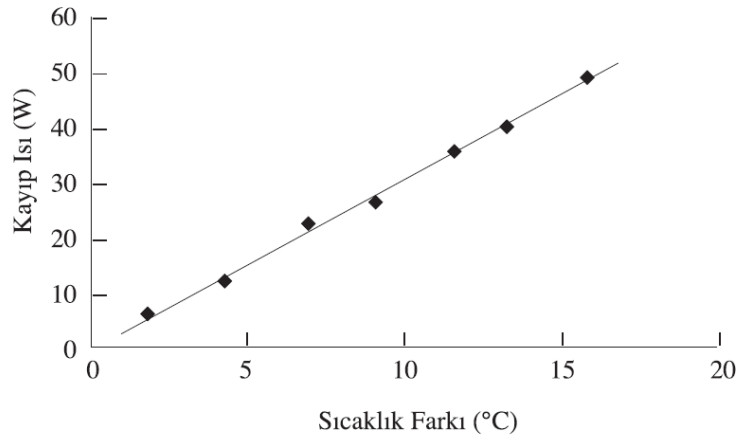


Şekil 6.19: Isı İletim Katsayısı Deney Düzeneği

Sistem kurulumundan sonra soğutucu akışkanın devir daimi başlatılarak, ölçüm ünitesi içerisine şırıngalar yardımıyla ısı iletim katsayısı belirlenecek akışkan yağ konulmuştur. Yağ enjeksiyonu sırasında akışkan içerisinde hava kabarcıklarının olmamasına dikkat edilmiştir. Daha sonra ana konsol devreye alınarak sistemdeki elektrik ısıtıcısı çalıştırılmıştır. Soğutucu akışkanın istenilen sıcaklığa gelmesinden sonra konsol üzerindeki gerilim değeri ayarlanarak dijital sıcaklık göstergesinde okunan sıcaklık değeri sabit olana kadar beklenilmiştir. Ardından gerilimölçer üzerindeki gerilim değeri (V), konsol üzerinde görülebilen T_1 ve T_2 sıcaklıkları ($^{\circ}\text{C}$) (Şekil 6.19) okunup, not edilmiştir. Farklı sıcaklıklar için konsol üzerinden gerilim ve soğutucu akışkan sıcaklığı değiştirilerek tekrarlanmış, her biri için gerilim ve sıcaklık değerleri not edilmiştir. Bu işlemler farklı GO konsantrasyonlu yağlar ve baz yağ için ayrı ayrı yapılmıştır.

Isı iletkenlik ölçümünden önce ısı iletim katsayısı belirlenmesi amaçlanan motor yağının üzerinden kondüksiyonla olan ısı transferinin dışında meydana gelen, diğer ısı transferlerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplanan ısı, kayıp ısı (Q_k) olarak adlandırılmıştır. Kayıp ısı miktarının hesaplanması yani cihazın kalibrasyonu cihazın üretildiği firmanın belirttiği şekilde kuru hava ile yapılmıştır. Kuru hava eldesi için temin edilen kuru hava tüpleri kullanılmıştır. Cihazın haznesine kuru hava

konulduktan sonra sisteme elektrik akımı verilerek belirlenen çeşitli voltaj değerlerinde yüksek iç sıcaklık (T_1) ve düşük dış sıcaklık (T_2) sıcaklıklarının sabitlendiği noktalarda multimetre üzerinde yazan ısıtıcı gerilim voltaj değeriyle birlikte, iç ve dış sıcaklık değerleri okunmuştur. Ardından elektriksel ısı girdisi (Q_e) ve kuru hava üzerindeki kondüksiyonla meydana gelen ısı transferi (Q_c) çıkartılıp, sistemdeki kayıp ısı ($Q_k = Q_e - Q_c$) hesaplanmıştır. Bu şekilde farklı voltajlarda hesaplanan kayıp ısılar ile elde edile sıcaklık farkları arasındaki bağıntı Şekil 6.20'deki cihaz kalibrasyon eğrisi elde edilir. (Özkal and Tülek 2001).



Şekil 6.20: Kayıp Isı ve Sıcaklık Farkı Arasındaki Bağıntıyı Gösteren Cihaz Kalibrasyon Eğrisi

Şekilde görüldüğü gibi sıcaklık farkı ile kayıp ısı arasında Fourier ısı iletim kanununa uygun lineer bir ilişki bulunmaktadır. Bu doğrunun denklemi lineer regrasyon ile bulunmuş ve motor yağı ısı iletkenlik hesaplamalarında kayıp ısının hesaplanmasında Denklem 6.2 ile belirlenen kayıp ısı değerleri kullanılmıştır.

$$Q_k = 3,0332 \times \Delta T - 0,5041 \quad (6.2)$$

Hesaplamalarda kullanılan deney düzeneğine ait veriler aşağıdaki gibidir;

Isıtıcı eleman direnci (R)	: $54 \, \Omega$
Ölçüm haznesi Radyal boşluk mesafesi (Δr)	: $0.345 \, mm$
Ölçüm haznesi silindirik yüzey alanı (A)	: $0,0133 \, m^2$

Kuru havadaki kondüksiyonla ısı transferinin hesaplanmasında Denklem 6.3 kullanılmıştır.

$$Q_c = k_a \cdot A \cdot \Delta T / \Delta r \quad (6.3)$$

Yukarıda tarif edilen şekilde cihaz kalibre edildikten sonra sistemdeki akışkan haznesine motor yağları sırası ile konulup tarif edilen yöntem ve denklemler kullanılarak motor yağlarının ısı iletkenlik değeri hesaplanmıştır. Sisteme giren elektriksel ısının hesaplanması için Denklem 6.4, motor yağları üzerindeki kondüksiyonla yapılan ısı transferinin hesaplanması için Denklem 6.5 ve ısı iletim katsayısının belirlenmesi için Denklem 6.6 kullanılmıştır (Özkal ve Tülek 2001).

$$Q_e = \frac{V^2}{R} \quad (6.4)$$

$$Q_c = Q_e - Q_k \quad (6.5)$$

$$k = Q_c \cdot \Delta r / A \cdot \Delta T \quad (6.6)$$

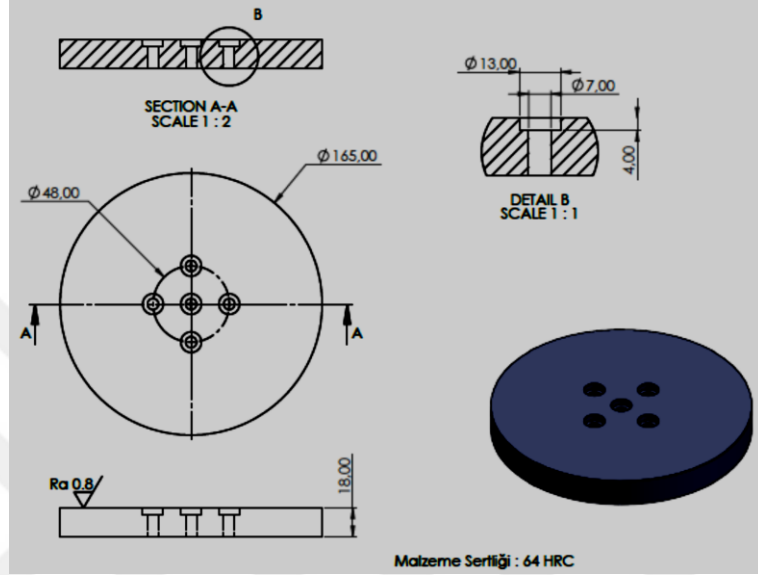
6.9 Ball On Disk Test Cihazı ve Çalışma Mekanizması

Triboloji testlerinde kullanılan TURKYUS marka Ball On Disk test cihazında, sürtünme mekanizması için gerekli dairesel bir disk ve aşındırılmak istenen parçayı bağlamak için kullanılan bağlama mekanizması bulunmaktadır. Numuneye uygulanan farklı yük miktarları için yük koyma mekanizması ve diskin dairesel hareketi ile oluşan aksel kuvvetlerin belirlenmesinde kullanılan sensör (Load cell) bulundurmaktadır. Ayrıca mekanizmaya kap içerisindeki yağın, merkezkaç kuvvetlerin etkisiyle bilye ve disk arasındaki temas yüzeyinden uzaklaşmasını engelleyen, temas yüzeyinde devamlı olarak yağ filminin var olmasını sağlayan bir sıyırıcı mekanizmada eklenmiştir. Şekil 6.21’de Ball On Disk cihazı görülmektedir.



Şekil 6.21: Ball On Disk Test Cihazı

Ball On Disk test cihazında aşındırma işlemi için kullanılan disk 100Cr6 çelik malzemeden imal edilmiştir. Disk yüzeyi CNC torna tezgahında işlendikten sonra yüzey pürüzlülük değerini Ra 0,8 kalitesine getirmek için özel taşlama tezgahlarında işleme tabi tutulmuştur. Şekil 6.22’de diskin imalatı için gerekli teknik resim gösterilmektedir.



Şekil 6.22: Sürtünme Diski İmalat Teknik Resmi

Ayrıca disk ısıtılma işlemi tabi tutularak yüzey sertliği 64 HRC’ye getirilmiştir. 100Cr6 çeliğinin yapısında bulunan elementler Tablo 6.6’da gösterilmektedir.

Tablo 6.6: Disk Çeliği Element Analizi

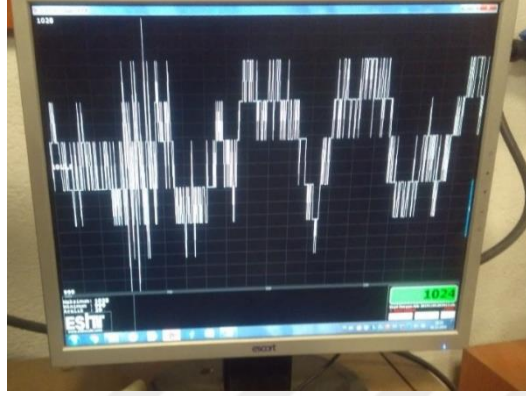
100Cr6 Disk Yapı Çeliğinin Element Analizi							
C	Cr	Si	Mn	S _{maks}	P _{maks}	Mo	Sertlik
0,93-1,05	1,35-1,60	0,15-0,35	0,25-0,45	0,015	0,025	≤0,1	64 HRC

Disk üzerinde aşınmaya maruz bırakılacak çelik bilyeler KAMA firması tarafından üretilmiştir. Bilyeler 8 mm standart çapta olup AISI 420-B çeliğinden imal edilmiştir. Bilye yapısını oluşturan çeliğin element analizi Tablo 6.7’de gösterilmiştir.

Tablo 6.7: AISI 420-B Çelik Bilye Element Analizi

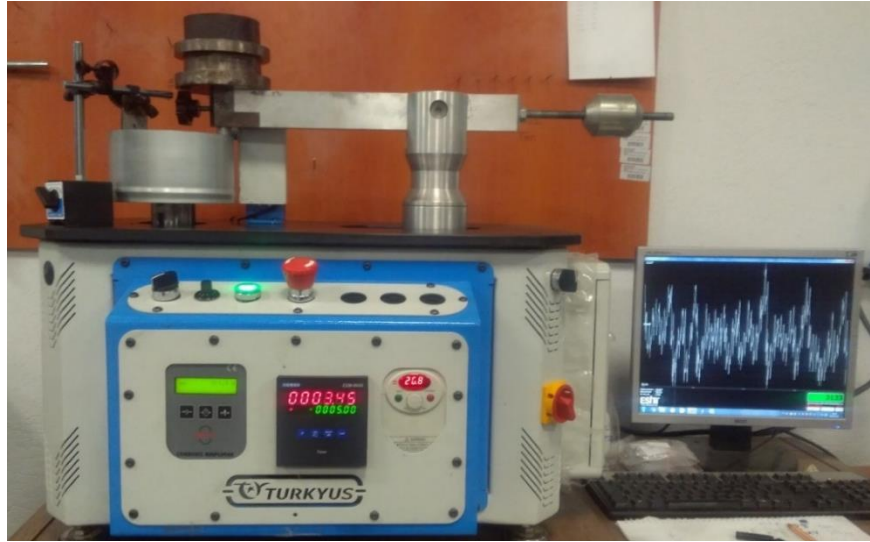
Malzeme	İçerik %						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Sertlik
AISI 420 B Paslanmaz Çelik	0,28 / 0,35	1,00 maks	1,00 maks	0,045 maks	0,030 maks	12,00 min / 14,00 maks	45-50 HRC

Aşındırma sırasında oluşan sürtünme kuvvetleri Ball On Disk cihazı üzerindeki yük hücresi tarafından ölçülmekte ve cihaza bağlı olan bilgisayara aktarılmaktadır. Bilgisayara aktarılan bu değerler bilgisayar üzerindeki ESİT yazılımı ile kayıt altına alınmaktadır. Şekil 6.23'te ESİT programına ait ekran görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 6.23: Aşındırma Cihazı Veri Kayıt Programı ESİT

Şekil 6.24'te görüldüğü gibi Ball On Disk test cihazının kontrol panelinden farklı hız ve zaman ayarlamaları yapılabilmektedir. Ayrıca disk üzerindeki sürtünme çapının cihaz tarafından ayarlanabilir olması toplam sürtünme mesafesini de artırıp azaltmaya yardımcı olmaktadır. Cihaz üzerindeki sabit yük koyma koluna istenilen yük miktarları yerleştirilip farklı yük değerleri altında çalışma yapılabilmektedir.



Şekil 6.24: Ball On Disk Aşındırma Test Cihazı ve Veri Aktarım Sistemi

Cihaz üzerindeki diskin dönme devir sayısı, cihaz üzerinden manuel olarak ayarlanmış ve kullanılan optik devir ölçüm takometresi ile kullanılarak kontrol edilmiştir. Devir ölçüm takometresi Şekil 6.25'te gösterilmiştir.



Şekil 6.25: Optik Devir Ölçüm Takometresi

6.10 Triboloji Test Parametrelerinin Belirlenmesi

Yağlama yağlarının tribolojik etkinliğini ölçmek için yük, hız, yağlayıcı maddenin viskozitesi ile sürtünme katsayısı arasındaki bağıntı hakkında bilgi veren Stribeck diyagramları kullanılmıştır. Bu çalışmada da nanopartikül katkılı motor yağlarının etkinliğinin belirlenmesinde hız ve normal yük değerleri arasında hesaplamalar yapılarak sınır, karışık ve hidrodinamik yağlama rejim bölgeleri belirlenmiştir. Normal yük olarak 20, 40 ve 60 N 'luk yükler, devir olarak 8 ila 155 d/dk aralığı ve sürtünme yarıçapı olarak 0,07 m kullanılmıştır. Bu yükler ve stribeck eğrisinde istenilen noktaları veren disk dönme hızları Tablo 6.8'de gösterilmiştir.

Tablo 6.8: Ball On Disk Testleri İçin Stribeck Eğrisine Göre Disk Dönüş Hızlarının Belirlenmesi

Normal Kuvvet (N)	Disk Dönüş Hızı (d/dk)	Açısal Hız (rad/s)	Temas Yarıçapı (m)	Baz Yağ Viskozite (mm/s^2)	Çizgisel Hız (m/s)	Stribeck Eğrisi X Eksen
60	8,38	0,88	0,07	97,6	0,06	0,10
60	41,89	4,39	0,07	97,6	0,31	0,50
60	75,41	7,90	0,07	97,6	0,55	0,90
60	108,92	11,41	0,07	97,6	0,80	1,30
40	94,95	9,95	0,07	97,6	0,70	1,70
40	117,30	12,29	0,07	97,6	0,86	2,10
40	139,64	14,63	0,07	97,6	1,02	2,50
40	167,57	17,55	0,07	97,6	1,23	3,00
20	97,75	10,24	0,07	97,6	0,72	3,50
20	111,71	11,70	0,07	97,6	0,82	4,00
20	125,68	13,17	0,07	97,6	0,92	4,50
20	139,64	14,63	0,07	97,6	1,02	5,00
20	153,60	16,09	0,07	97,6	1,13	5,50

Stribeck eğrisinin düzgün çizilebilmesi için sınır, karışık ve hidrodinamik yağlama bölgeleri üzerinde 13 farklı noktaya göre hız ve yük durumları belirlenmiştir. Bu koşullar altında baz yağ ve diğer konsantrasyonlardaki GO katkılı motor yağları ball on disk cihazı üzerinde testlere tabi tutulmuştur. Ölçümler her bir yağ ve her bir parametre için 5 dakika boyunca kaydedilmiştir. Ball on disk cihazına bağlı olan ESİT programı yardımıyla saniyede 25 veri alınarak kaydedilmiştir. Yapılan testler sonucunda Tablo 6.8’de yer alan her bir stribeck X değeri için sürtünme kuvveti uygulanan normal kuvvete bölünerek sürtünme katsayıları elde edilmiştir.

6.11 Aşınma Çaplarının Ölçülmesi

Ball On Disk cihazında sürtünmeye maruz bırakılan çelik bilyeler üzerindeki aşınma çaplarının belirlenebilmesi ve katkılı yağların incelenmesi için üniversitemizin Malzeme Mühendisliği Uygulama Laboratuvar’ında yer alan NIKON marka Eclipse LV150NL model optik mikroskop kullanılmıştır. Şekil 6.26’da optik mikroskop gösterilmiştir.



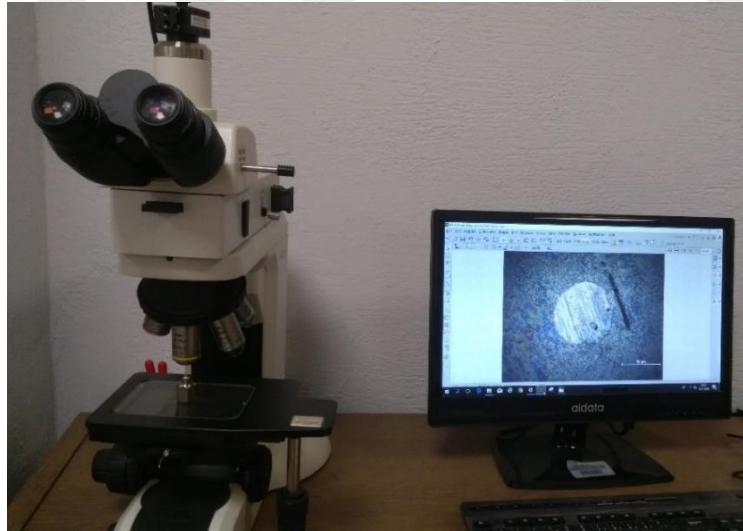
Şekil 6.26: Aşınma Çapı belirlemek İçin Kullanılan Optik Mikroskop

Farklı GO konsantrasyonlarıyla ve baz yağ ile yapılan sürtünme testlerinden sonra bilyeler alkol ile temizlenerek paslanmaması için dış havadan izole kilitli poşetler özelliklerine göre numaralandırılarak sınıflandırılmıştır. Tüm farklı yağ konsantrasyonları için deneyler tamamlandıktan sonra bilyeler üzerindeki aşınma miktarlarının belirlenmesi işlemine geçilmiştir. Bu işlem için öncelikle küresel yapıdaki bilyeyi mikroskop tablasında sabit tutabilmek için Şekil 6.27’de gösterilen tutucu aparat kullanılmıştır.



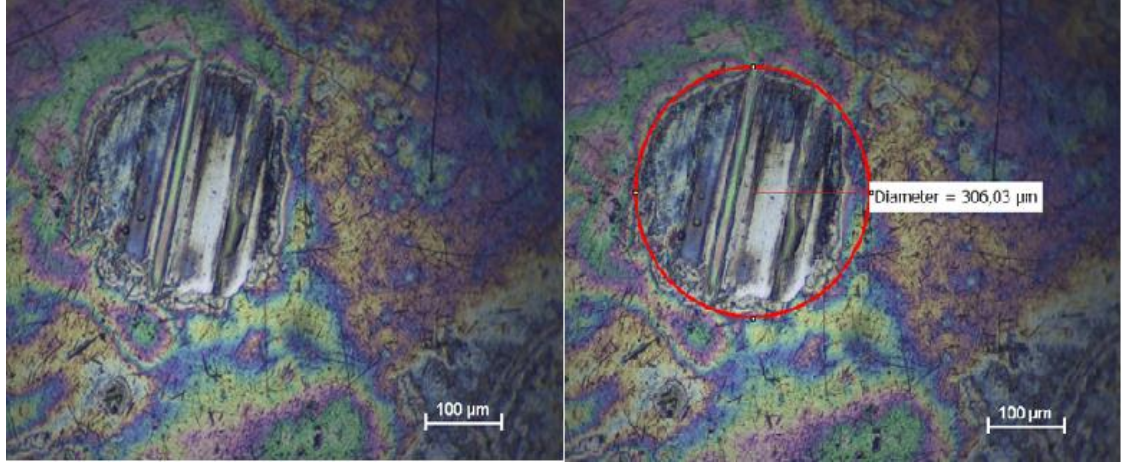
Şekil 6.27: Bilye Tutucu Aparat ve Bilye

Bilye üzerinde aşınmış olan bölgeyi bulabilmek için optik mikroskoptaki görüntü 50 kat büyütülmüş ve aşınmanın olduğu bölgedeki mikroskobik aşınma görüntülerin alınacağı kısım belirlenmiştir. Bu işlemten sonra optik mikroskoptaki görüntüler mikroskoba bağlı olan bilgisayardaki NIS-Elements D programı yardımıyla Şekil 6.28’de görüldüğü gibi incelenmiştir.

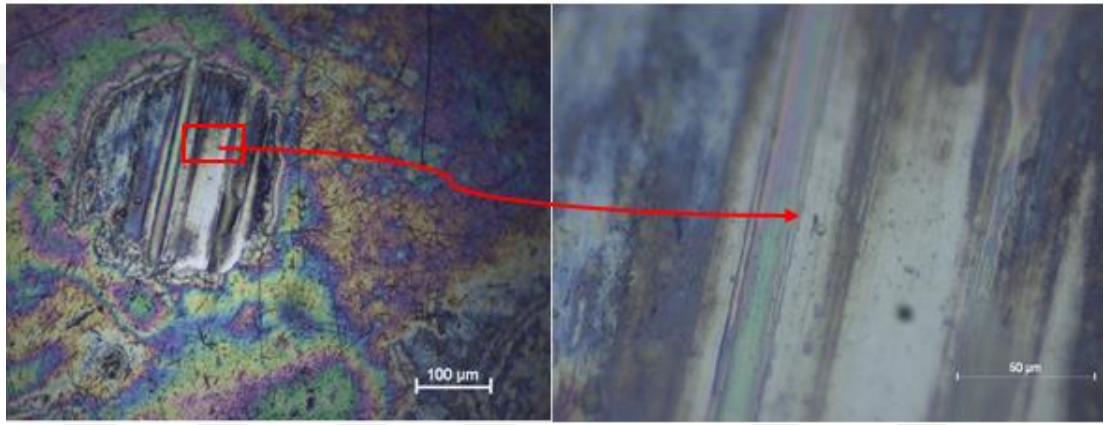


Şekil 6.28: Optik Mikroskop ve NIS-Elements D Programı

Optik mikroskop yardımıyla görüntüler 100 kat büyütülerek NIS-Elements D programının üzerinden aşınma çapları hassas bir şekilde ölçülmüştür. Ardından mikroskopla 500 kat büyütülerek aşınma izlerinin detayları Şekil 6.29 ve 6.30’da gösterildiği gibi incelenmiştir. Bu ölçümler tüm deney numuneleri için yapılarak veriler kaydedilmiştir.



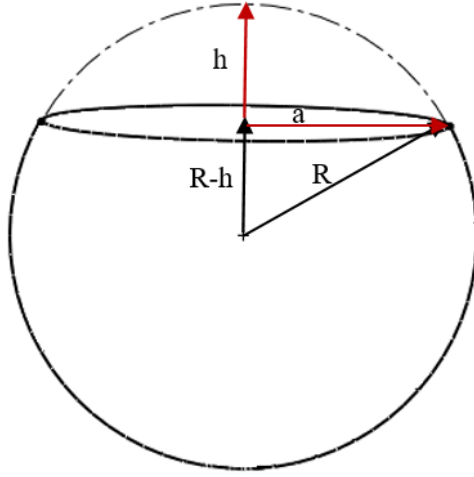
Şekil 6.29: 100 kat büyütülmüş optik görüntü ve çap belirleme (0,5 mg/ml GO, 40 N,140 d/dk)



Şekil 6.30: 500 Kat Büyütülmüş Optik Görüntü (0,5 mg/ml GO, 40 N,140 d/dk)

6.12 Aşınma Miktarının Belirlenmesi

Ball On Disk cihazında sürtünmeye maruz bırakılan çelik topların aşınma miktarının belirlenmesinde daha önceki konularda da bahsedilen iz değişim yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle göre özellikleri bilinen standart 8 mm çaptaki çelik bilyelerin hacimleri Şekil 6.31'deki ifadeler dikkate alınarak Denklem 6.7 ile hesaplanmıştır. Daha sonra sürtünmeye maruz bırakılan bilyelerin optik mikroskop ile belirlenen çapları kullanılarak aşağıdaki formüllerle belirtilen işlemler yapılmıştır.



Şekil 6.31: Küresel Yapıdaki Aşınmanın Hesaplanması (Noorawzi ve Samion 2016)

¶ Kürenin hacmi;

$$V_1 = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \quad (6.7)$$

¶ Aşınma ile bilyeden ayrılan hacim;

$$V_2 = 1/3 \cdot \pi \cdot h^2 \cdot (3R - h) \quad (6.8)$$

$$V_2 = (\pi \cdot a^4) / (4 \cdot R) \quad (6.9)$$

¶ Aşınma sonucu kalan bilye hacmi;

$$V = V_1 - V_2 \quad (6.10)$$

¶ Bilyenin aşınmış kısmının ağırlığı;

$$V_2 \times d \quad (6.11)$$

Belirlenmiş çaplar doğrultusunda Denklem 6.8 kullanılarak aşınma sonucu bilyeden ayrılan hacim hesaplanmıştır. Ardından bu hacim kullanılarak Denklem 6.11'deki hesaplama yapılmış ve malzeme özgül ağırlığından da yararlanılarak bilyeden aşınma ile kaybedilen ağırlık tespit edilmiştir.

6.13 SEM Analizleri

Bilyelerdeki aşınmaların daha detaylı incelenebilmesi için Pamukkale Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde (İLTAM) yer alan Şekil 6.32'deki Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. SEM ile daha önce optik mikroskopla incelenen aşınma çapları çok daha fazla büyütme oranları ile incelenerek yüzeydeki aşınmaların fiziksel özellikleri ve GO yapısının yüzeydeki sürtünmeyi nasıl etkilediği incelenmiştir.



Şekil 6.32: Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

6.14 Motor Testi ve Sürtünme Hesaplamaları

Farklı konsantrasyondaki GO nanopartikül katkılı yağlar ile Laboratuvar ortamındaki yapılan triboloji testleri sonucunda, sürtünme ve aşınma bakımından en etkili konsantrasyon oranı belirlenmiştir. Ardından GO nanopartikül içermeyen baz motor yağı (10W-40) ve belirlenen en etkili konsantrasyona sahip katkılı motor yağının gerçek motor performansına etkisinin değerlendirilebilmesi için çeşitli motor hızları, motor yükleri ve motor karter yağı sıcaklıklarında motor deneyleri yapılmıştır. Motor deneyleri Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, İçten Yanmalı Motorlar Test Laboratuvarı'nda bulunan motor test dinamometresi ile yapılmıştır.

6.14.1 Motor Teknik Özellikleri

Motor testleri Şekil 6.33'de gösterilen tek silindirli, yerli üretim Antor 6 LD 400 dizel bir motor kullanılarak yapılmıştır. Motor teknik özellikleri Tablo 6.9'da verilmiştir.

Tablo 6.9: Antor 6 LD 400 Test Motorunun Teknik Özellikleri

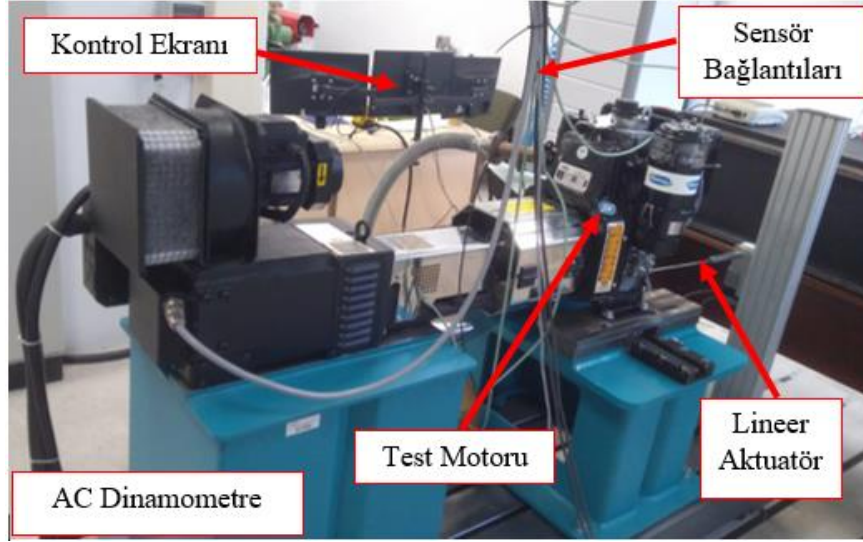
Antor 6 LD 400 Test Motorunun Teknik Özellikleri		
Silindir Sayısı	<i>Adet</i>	1
Silindir Hacmi	<i>cm³</i>	395
Silindir Çapı	<i>mm</i>	86
Strok	<i>mm</i>	68
Sıkıştırma Oranı	-	18:1
Motor Devri	<i>d/dk</i>	3600
Motor Gücü	<i>kW</i>	6,3
Maksimum Tork	<i>kgm</i>	2000-2200 <i>d/dk</i>
Yakıt Depo Kapasitesi	<i>L</i>	4,5
Özgür Yakıt Sarfıyatı	<i>gr/BGh</i>	220
Karter Yağ Kapasitesi	<i>L</i>	1,2
Boş Ağırlığı	<i>kg</i>	45



Şekil 6.33: Antor 6 LD 400 Test Motoru

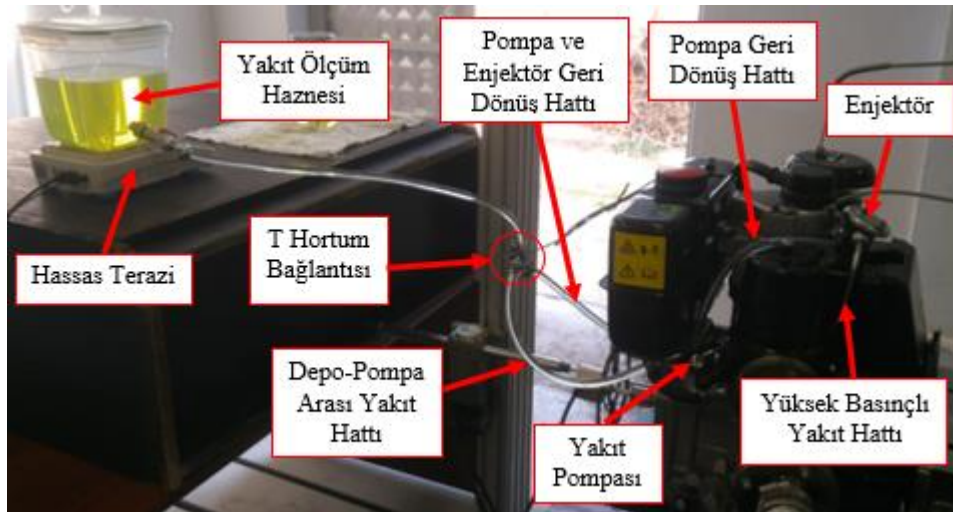
6.14.2 Motor Test Dinamometresinin Özellikleri

Deneyler, PCS marka motor test sistemi üzerinde bulunan ABB marka ve VH3.5 model 3000 d/dk da 16,7 kW güç absorbe etme kapasitesine sahip aktif AC elektrikli dinamometre üzerinde yapılmıştır. Motor test sistemi temel olarak şu alt yapılardan oluşmaktadır; düşük atalet momentine sahip asenkron servo motor motor, 19" lik sistem panosu içerisinde ethernet altyapısını kullanan DTC motor kontrol özelliğine haiz rejeneratif sürücü, 19" rack kabin içerisinde bilgisayar kontrollü NI veri toplama sistemi ve NI LabVIEW tabanlı PCS motor test yazılımından oluşmaktadır. Dinamometre sürücüsünde bulunan tristör sürücü devresinin mikroişlemci ile kontrolü sayesinde hassas bir şekilde hız kontrolü yapılabilmekte ve ayrıca dinamometre tahrik modunda motor olarak da çalıştırılabilmektedir. Dinamometre düzenğinde bağlanmış test motorunun gaz kremayeri elektrikli servo kontrollü lineer aktüatör ile kontrol edilmektedir. Böylece istenilen gaz keleşği konumlarının % 1 hassasiyetle kontrolü sağlanmakta ve tüm farklı testlerde aynı özellikler hassas bir şekilde uygulanabilmektedir. Sistemde hassas tork ölçümü için 200 Nm kapasitede % 0,1 hassasiyette tork ölçebilen Tilkom marka M40 model flanşlı temassız telemetrik tip tork sensörü dinamometre şaftına bağlanmıştır. Yine dinamometre motoruna entegreli 1024 darbe/devir ölçümü içeren $\pm 0,1$ devir hassasiyetinde enkoder ile motor hızı ölçümü yapılmaktadır. Şekil 6.34'de dinamometre tezgahı, sensör bağlantıları ve kontrol ekranları görülmektedir.



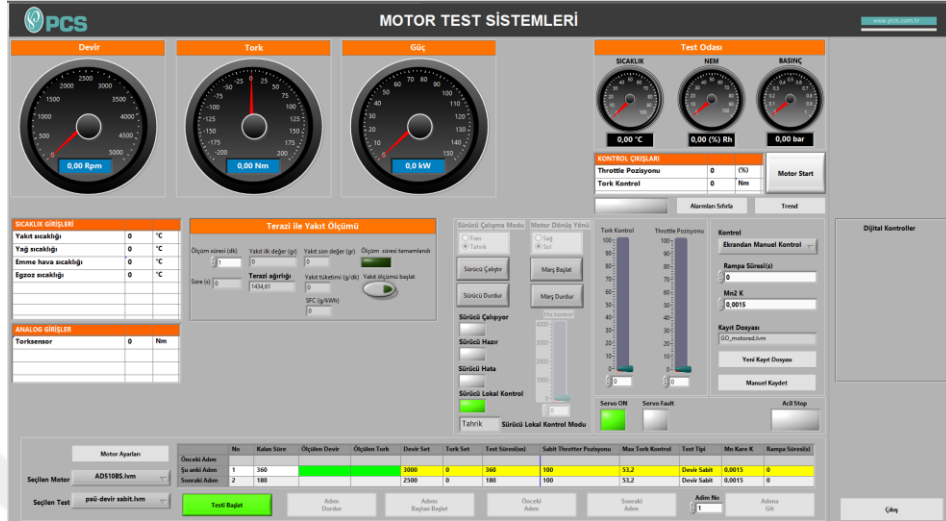
Şekil 6.34: Motor Test Dinamometresi

Yakıt tüketimini ölçmek için Radwag marka WTC 2000 model hassas terazi dinamometre veri aktarım sistemine bağlanmıştır. Ayrıca geri dönüş hattındaki yakıtın terazi üzerindeki yakıt haznesine dönerken terazinin hassasiyetini bozmasını engellemek için pompa ve enjektör geri dönüş hattı bir T nipel yardımıyla yakıt haznesi-yakıt pompası ara hattına bağlanmıştır. Böylece kullanılmadan geri dönen fazla yakıtın terazinin hassasiyeti bozması engellenmiştir. Şekil 6.35'te yakıt ölçüm sistemi ve yakıt hattı bağlantıları gösterilmiştir. Sistemde yakıt sıcaklığı, emilen hava sıcaklığı, yağ sıcaklığı ve egzoz sıcaklığı K tipi termokupllar ile ölçülmektedir. Test odası ortam basıncı, ortam sıcaklığı ve nemi ise PC85 meteorolojik transmitter ile ölçülmektedir.



Şekil 6.35: Yakıt Ölçüm Sistemi ve Yakıt Hattı Bağlantıları

Sensörlerden alınan ölçümler anlık olarak dinamometre veri aktarım sistemi ile hassas bir şekilde işlenip kaydedilebilmekte ve bu veriler kontrol panelinde yer alan Şekil 6.36'daki Proses Kontrol Sistemi (PCS) kumanda ekranından takip edilmektedir.



Şekil 6.36: Dinamometre Otomasyon ve Veri Aktarım Program Ekranı

6.14.3 Motor Test Koşulları

Bu araştırmadaki motor testleri motorun maksimum tork devri (2000-2200 d/dk) dikkate alınarak 1700-2800 d/dk arasında beş farklı devirde ve tam yüklü durumlarda yapılmıştır. Ayrıca testler yağın farklı sıcaklıklardaki performansının değerlendirilebilmesi için karter yağ sıcaklığının 40-100 °C aralığında yedi farklı sıcaklıkta ayrı ayrı yapılmıştır. Testler ile motor gücü, torku, yakıt tüketimi ve toplam sürtünme güçleri kaydedilmiştir. Yakıt tüketimleri karter yağ sıcaklığı 75-90 °C arasındayken kaydedilmiştir.

Doğrudan motorda meydana gelen sürtünme kayıplarını ölçerken motor çalıştırılıp karter yağı uygun sıcaklığa getirildikten sonra motor durdurulup yani pompalama kayıpları ortadan kaldırılıp belirlenen motor devir ve karter yağı sıcaklıklarında içten yanmalı motor bir elektrik motoru ile tahrik edilir (Ali ve diğ. 2018^a). Bir diğer ifade ile içten yanmalı motor durdurulup dinamometre motor olarak çalıştırılır ve doğrudan motor parçaları arasında meydana gelen sürtünme kayıpları belirlenir. Testlerin güvenilirliği için tüm farklı koşullarda yapılan testler en az üç kez tekrarlanmış ve ortalama değerler nihai sonuç olarak kabul edilmiştir.

6.14.4 Motor Sürtünme Hesaplamaları

İçten yanmalı motorların farklı boyutlarda olmasından ve farklı hızlarda çalışmasından dolayı sürtünme kayıplarını sınıflandırmanın ve bunları karşılaştırmanın en iyi yolu ortalama efektif basıncın belirlenmesidir. Ortalama efektif basınç (mep), bir çevrim başına yapılan iş ve güç terimleriyle ilgilidir (Gupta 2006).

$$\dot{W}, \quad W = (mep) \cdot V_H \quad (6.12)$$

$$\text{Güç}, \quad \dot{W} = (mep) \cdot V_H \cdot \left(\frac{n}{n_R}\right) \quad (6.13)$$

Burada;

V_H = toplam strok hacmi

n = motor devri

n_R = çevrim başına devir sayısı (Dört zamanlı motorlar için 2, iki zamanlı motorlar için 1)

Sürtünme ortalama efektif basıncı diğer ortalama efektif basınçlarla Denklem 6.14'de görüldüğü gibi ilişkilidir:

$$f_{mep} = i_{mep} - b_{mep} - a_{mep} - c_{mep} + t_{mep} \quad (6.14)$$

$$i_{mep} = g_{mep} - p_{mep} \quad (6.15)$$

Burada;

a_{mep} = diğer ekipman ve aksesuarların çalıştırılabilmesi için kullanılan ortalama efektif basınçlar

b_{mep} = fren ortalama efektif basıncı (krank milinde oluşturulan ortalama efektif basınç)

c_{mep} = süperşarj veya boşaltma pompası gibi motor ekipmanlarını çalıştırmak için kullanılan ortalama efektif basınç

f_{mep} = sürtünme ortalama efektif basıncı (motorun iç sürtünmesini yenmek ve yağ pompası gibi diğer ekipmanları çalıştırmak için kullanılan ortalama efektif basınç)

g_{mep} = toplam ortalama efektif basınç (sıkıştırma ve genişleme zamanlarında meydana gelen ortalama efektif basınç)

i_{mep} = belirtilen ortalama efektif basınç (yanma odasında oluşan ortalama indike basınç)

p_{mep} = pompalama ortalama efektif basıncı (emme ve egzoz zamanlarında meydana gelen ortalama efektif basınç)

t_{mep} = turboşarjla egzoz gazlarından dönüştürülen ortalama efektif basınç

$c_{mep} = t_{mep}$ ve $a_{mep} = 0$ kabul edilirse Denklem 6.16 düzenlenerek Denklem 6.17 elde edilir.

$$f_{mep} = i_{mep} - b_{mep} - a_{mep} - c_{mep} + t_{mep} \quad (6.16)$$

$$f_{mep} = i_{mep} - b_{mep} \quad (6.17)$$

Sürtünme ortalama efektif basıncı ampirik ifadelerle Denklem 6.18'deki gibi motor devri ile de ilişkilendirilebilir (Gupta 2006).

$$f_{mep} = A + Bn + Cn^2 \quad (6.18)$$

Burada;

n = Motor devri

A, B, C = Belirli bir motora özgü sabitler

Motorun yapısını oluşturan farklı özellikteki parçaların toplam sürtünmeye olan katkılarını yüzdesel olarak hesaplamak oldukça zordur ve hassas olmayan sonuçlar içerebilmektedir. Bu hesaplamaları yapmanın etkili yollarından biri motoru bir dış tahrik sistemi ile çalıştırmaktır. Yanmalı motorlar için bu yöntemin en çok kullanılan şekli krank miline bağlanan bir dış elektrik motorunun krank milini döndürmesidir. Elektrikli dinamometreler bu özelliklerinden dolayı oldukça ilgi çekicidir. Motor gücü veya torku, jeneratörün bir elektriksel yükle yüklenmesiyle dinamometre tarafından ölçülebilir. Dinamometre üzerinde yer alan elektrik motoru aynı zamanda bağlı olduğu motorun krank milini tahrik edebilme yeteneğine de sahip olan iki taraflı bir sistem olarak tasarlanabilmektedir. Böylece içten yanmalı motor bir elektrik motoru ile tahrik edildiğinde ateşleme olmadığından motorda yanma olayı gerçekleşmez. Motor döndürülmesi motora bağlı bir elektrik motoru tarafından sağlanır ve kontrol edilir. Yanmalı motorun tersine bu çalışma şekliyle çevrim boyunca meydana gelen emme-egzoz ve sıkıştırma-genişleme zamanlarının her ikisi de silindir

gazları üzerinden negatif iş yaparlar. Motorun dönmesi için elektrik motoru tarafından sağlanması gereken güç Denklem 6.19'da gösterildiği gibidir (Pulkrabek 2004).

$$\dot{W}_m = \dot{W}_f + \dot{W}_g + \dot{W}_p \quad (6.19)$$

Burada;

$\dot{W}_m$ = Dinamometrenin b_{mep} eşdeğer gücü

$\dot{W}_f$ = Sürtünme gücü

$\dot{W}_g$ = Toplam güç (sıkıştırma ve genişleme zamanı)

$\dot{W}_p$ = Pompalama gücü (egzoz ve emme zamanı)

Bu denklemin ortalama efektif basınç terimleri cinsinden ifadesi Denklem 6.20'deki gibi ifade edilip denklemdeki m indisi yanmasız motor çalışma şeklini ifade etmekte ve m_{mep} (motored ortalama efektif basınç) ifadesi de dinamometrenin çalıştırdığı motordaki b_{mep} 'e eşdeğer ortalama efektif basıncını belirtmektedir (Pulkrabek 2004).

$$m_{mep} = (f_{mep})_m + (g_{mep})_m + (P_{mep})_m \quad (6.20)$$

Elektrik motoru ile döndürmede yanma olayı olmadığından normal bir içten yanmalı motorda yanma olayı ile görülen basınç artışı meydana gelmez ve genişleme zamanı sıkıştırma zamanını tam tersine çevirir. Bu çalışma durumunda toplam indike güç ve iş yoktur. Böylece Denklem 6.21 elde edilir.

$$(g_{mep})_m = 0 \quad (6.21)$$

Ayrıca elektrik motoru tam yükte çalıştırılırsa, pompalama işi hemen hemen sıfıra denk olur. Böylece Denklem 6.22 elde edilir.

$$(P_{mep})_m = 0 \quad (6.22)$$

Bu durumda Denklem 6.20 ile Denklem 6.21 ve Denklem 6.22 birleştirilirse ortalama efektif basınç cinsinden Denklem 6.23 elde edilir.

$$(m_{mep})_m \approx (f_{mep})_m \quad (6.23)$$

haline gelir. Eğer yanma olmayan motorun çalışma durumunda motor sıcaklıkları, deviri gibi diğer çalışma parametreleri yanmalı motor ile uyumlu alınırsa;

$$(f_{mep})_m = (f_{mep})_{fired} \quad (6.24)$$

$$m_{mep} = (f_{mep})_{fired} \quad (6.25)$$

$$\dot{W}_f = \dot{W}_m \quad (6.26)$$

Denklemler 6.24, 6.25 ve 6.26 son hallerini alır. Bu denklemler kullanılarak motoru tahrik eden elektrik motorunun elektrik gücü girdisi ölçülür ve normal yanmalı motorun çalışmasında kaybedilen sürtünme gücünün iyi bir yaklaşımı elde edilir.

Bu deneylerde elektrik motoru ile çalıştırılan motorun tüm çalışma şartlarının yanmalı motor şartlarıyla aynı değerlerde olmasına dikkat edilmelidir. Özellikle sıcaklığın yanmalı motor sıcaklığı ile aynı olmasına önemlidir. Çünkü sıcaklık motorda kullanılan sıvıların (yağlama yağını, emilen hava sıcaklığını ve soğutma suyu sıcaklığını) viskozitesini değiştirir, motor parçalarının ısı genleşme veya büzülme hareketlerine neden olur. Bu durumların her biri motor sürtünmesi üzerinde önemli etkiye sahiptir. Motor yağı yanmalı motorda olduğu gibi aynı sıcaklık (viskozite) ve akış özelliklerinde motor parçaları arasında dolaştırılmalıdır. Motor gaz keleşbeği konumunun ayarı ve motor soğutma sıvısı pompasının hızları yanmalı motorda olduğu gibi olmalıdır. Motordaki sürtünmeyi motoru elektrik motoruyla tahrik etme yöntemi ile tork ve gücü ölçmenin normal yolu, ilk önce yanmalı motoru normal olarak ateşlemeli şekilde çalıştırmaktır. Ardından motorun tüm sıcaklıkların kararlı bir duruma ulaşması ile motor durdurulur ve elektrik motoru tahriki ile hızlı bir şekilde test yapılır. Bu durumda çok kısa bir sürede motor sıcaklıkları yanmalı motor durumundaki değerlerle aynıdır. Motor içerisinde yanma olmadığı için belli bir süre sonra motor sıcaklıkları düşmeye başlar, motor soğur ve çalışma şartları hızlıca değişir. Hızlı bir şekilde yapılan ölçümlerde motor çalışma şartları aynı olduğu durumda, elektrikli motor ile tahrik edilen içten yanmalı motorun elde edilen sürtünme verileri yanmalı motordan elde edilen sürtünme verileri ile yaklaşık aynı sonuçları verir. Bu durumda motor parçalarının her birinin sürtünmeye olan etkilerini belirlemek için ayrıca motor parçaları sökülerek testler yapılabilir (Pulkrabek 2004).

Motorda meydana gelen mekanik kayıplar çıkarıldıktan sonra motor volanından alınan güce efektif güç denilmektedir. Motor dinamometresi ile motor tork ve devrine göre efektif güç Denklem 6.27’de yer alan formülle hesaplanmıştır (Yardım 2017).

$$P_e = \frac{M_d \times n}{9549} \quad (6.27)$$

Burada;

P_e = Efektif Güç (kW)

M_d = Motor Torku (Nm)

n = Motor Devri (d/dk)

Ayrıca efektif gücün hesaplamasında fren ortalama efektif basıncına (b_{mep}) bağlı bir diğer formül Denklem 6.28’de gösterilmektedir (Heywood 1988).

$$P_e = \frac{b_{mep} \times V_H \times n}{n_R \times 10^3 \times 60} \quad (6.28)$$

Burada;

b_{mep} = Fren ortalama efektif basıncı (kPa)

V_H = Toplam strok hacmi (dm³)

n_R = çevrim başına devir sayısı

Denklem 6.28’den fren ortalama efektif basıncı (b_{mep}) çekilirse Denklem 6.29 elde edilir.

$$b_{mep} = \frac{P_e \times n_R \times 10^3 \times 60}{V_H \times n} \quad (6.29)$$

Elde edilen efektif basınçlar ile motorun mekanik verim (η_m) hesabı denklem 6.30’da yer alan eşitlikte gösterilmektedir (Cakir ve Akcay 2015; Heywood 1988).

$$\eta_m = \frac{b_{mep}}{i_{mep}} \quad (6.30)$$

Denklem 6.30 ile Denklem 6.17 ilişkilendirildiğinde ise Denklem 6.31’de yer alan formül meydana gelmektedir.

$$\eta_m = \frac{b_{mep}}{b_{mep} + f_{mep}} \quad (6.31)$$

Motorun tüketmiş olduğu yakıt miktarının, volan üzerinden elde edilen güce oranı özgül yakıt tüketimini verir. Özgül yakıt tüketimi fren özgül yakıt tüketimi (*BSFC*) olarak da adlandırılmaktadır. Bu değer motordan güç elde etmek için yakıtın ne derece verimli kullanıldığını ifade eder. Özgül yakıt tüketiminin hesaplanmasında Denklem 6.32’de yer alan eşitlik kullanılmıştır (Heywood 1988).

$$b_e = \frac{B_e}{P_e} \quad (6.32)$$

Burada,

b_e = Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)

B_e = Saatlik yakıt tüketimi (g/h)

Fren termik verimi (BTE), volanda elde edilen gücün, yakıtın yanması ile oluşan güce oranıdır. Başka bir ifade ile yakıtın faydalı güce dönüşebilme verimliliği olarak da ifade edilebilir (Heywood 1988). Fren termik verimi Denklem 6.33’de yer alan eşitlikteki formülle hesaplanmıştır.

$$\eta_t = \frac{P_e}{\dot{m}_f \times Q_{HV}} = \frac{3600}{b_e \times Q_{HV}} \quad (6.33)$$

Burada;

η_t = Termik verim

$\dot{m}_f$ = Yakıt debisi (g/s)

Q_{HV} = Yakıtın alt ısı değeri (MJ/kg)

Bir içten yanmalı motorun toplam verimi (η_T) ise motorun mekanik verimi ile termik veriminin çarpılması ile Denklem 6.34’te yer alan formülle hesaplanmıştır (Yardım 2017).

$$\eta_T = \eta_m \times \eta_t \quad (6.34)$$

Motorları karşılaştırmak için kullanılan bir diğer büyüklük ise ortalama piston hızıdır. Ortalama piston hızını (c_m) hesaplamak için Denklem 6.35 kullanılmıştır (Çetinkaya 2014).

$$c_m = \frac{H \times n}{30} \quad (6.35)$$

Burada;

H = Motor Stroğu (m)

n = Motor Devri (d/dk)

Sonuç olarak yukarıda belirtilen makine, teçhizat, malzeme, deney yöntemleri ve hesaplamalar kullanılarak bilimsel araştırma tekniklerine uygun şekilde bilimsel bir çalışma yapılmıştır.



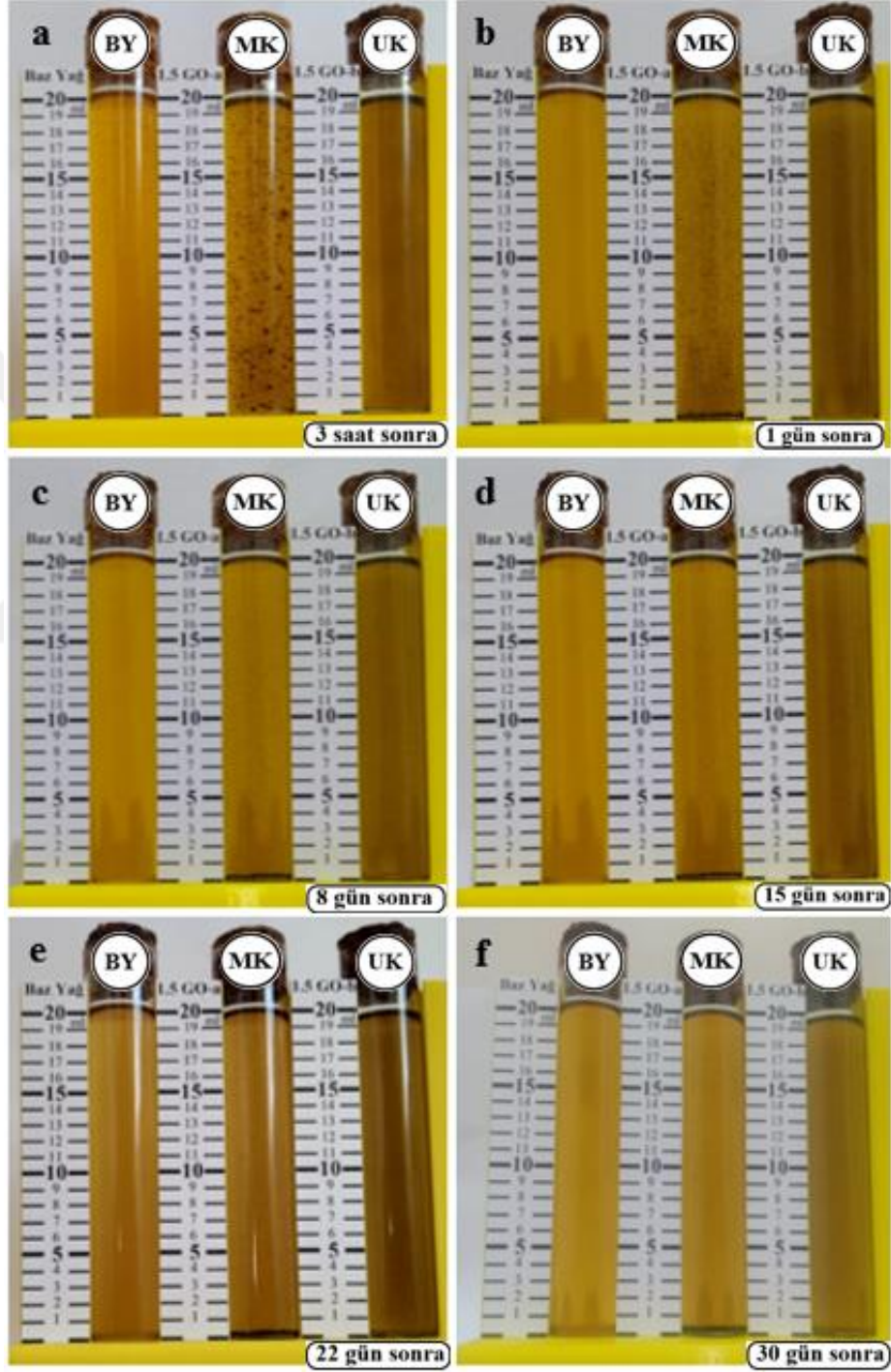
7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

7.1 GO'nun Baz Yağda Dağılım Kararlılığı ve Homojenliği

Grafen yapısı gereği kimyasal tepkime vermeye yatkın değildir ve çoğu çözücüde kolay bir şekilde dağılamaz (Zhang ve diğ. 2011). Bundan dolayı katkı maddesi olarak kullanıldığı yapılar içerisinde toplanma ve çökelti oluşturma eğilimindedir (Yang ve diğ. 2017). Baz yağlayıcılar içerisinde katkı maddesi olarak kullanılması durumunda meydana gelen birikme ve çökelmelerden dolayı sistemleri tribolojik açıdan olumsuz etkiler ortaya çıkarır (Rasheed ve diğ. 2016). Bu olumsuz etkiyi ortadan kaldırmak için grafen yapıları, stearik asit ve oleik ait gibi yüzeyi aktif maddelerle modifiye edilmektedir. Böylece yağlayıcı içerisinde çökeltme ve birikme olmadan grafen yapısının tüm yapı içerisinde uzun bir süre homojen olarak dağılabilmesi sağlanmaktadır (Lin ve diğ. 2011). Bu işlem ayrıca yağın tribolojik özelliklerini geliştirdiği gibi, yağın yük taşıma kapasitesini de artırmaktadır. Ayrıca kararlı bir dispersiyon oluşturmak ve katkılı yağ içerisindeki nanopartiküllerin aglomerasyonunu en aza indirmek için yağlayıcıya; homojenleştirme, sonikasyon, ultrasonikasyon vb. karıştırma işlemleri de yapılmalıdır (Rasheed ve diğ. 2016).

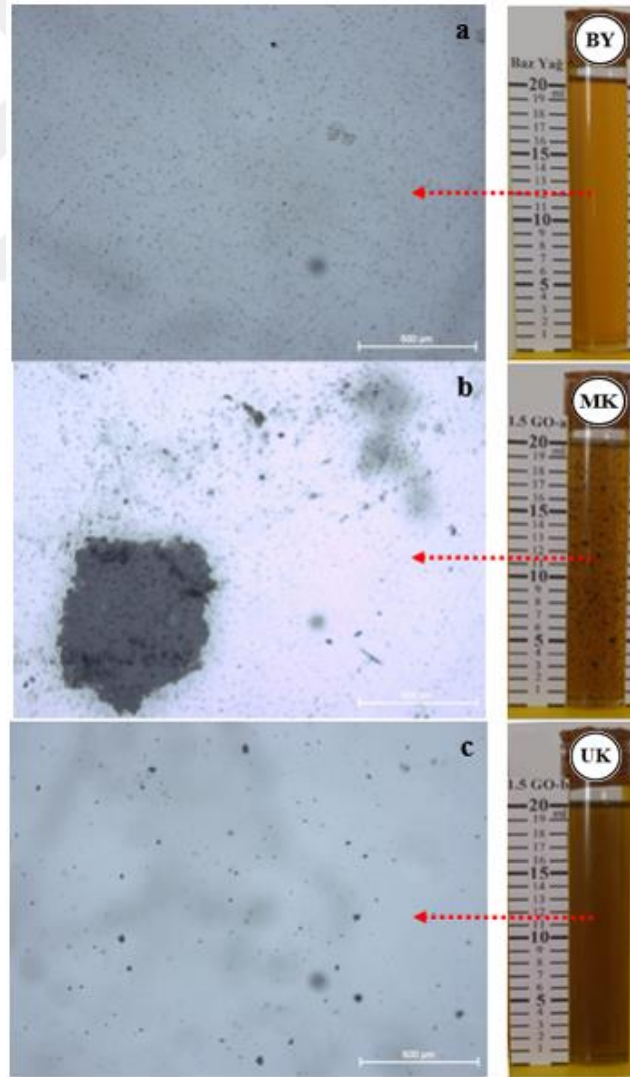
Tribolojik deneylerde kullanılan nano grafen oksit (GO) katkı maddesi, Modifiye Hummers Metodu ile elde edilmiştir. Elde edilen GO yapısının motor yağı içerisinde çökelti oluşturmaması ve homojen bir şekilde dağılabilmesi için oleik asitle modifiye edilmiştir. Modifiye işleminden sonra uygun konsantrasyonlarda baz yağın içerisinde katılan GO'nun homojen bir şekilde dağılabilmesi için katkılı yağ ultrasonik karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 7.1'de sırasıyla baz motor yağı (BY), mekanik karıştırma işlemine tabi tutulmuş GO katkılı motor yağı (MK) ve ultrasonik karıştırma işlemine tabi tutulmuş GO katkılı motor yağlarının (UK) farklı zaman aralıkları ile durumları gösterilmiştir. Mekanik karıştırma işlemine tabi tutulmuş olan GO katkılı motor yağı içerisinde tam olarak dağılamamış ve birikinti oluşturarak, çökeltme eğilimi göstermiştir. Şekil 7.1 b'de iki numaralı tüpte mekanik karıştırma işleminden bir gün sonra GO parçacıklarının büyük bir bölümü tüp tabanına indiği gösterilmiştir. Ultrasonik karıştırma işlemine tabi tutulan GO katkılar ultrasonik dalgalarla yağ içerisine homojen bir şekilde dağıtılmıştır. Ultrasonik olarak karıştırılan

GO katkılı motor yağı yaklaşık bir ay boyunca takip edilmiş ve 30. günün sonunda büyük bir bölümünün hala yağ içerisinde homojen bir şekilde kalabildiği görülmüştür. Böylece ultrasonik karıştırma yöntemi ile karıştırılan yağın içerisinde yer alan katkılarının homojen bir şekilde dağıtılabildiği ve bir ay boyunca herhangi bir çökellemeden yağın kullanılabilceği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 7.1: a) Karışımdan 3 Saat Sonra, b) Karışımdan 1 Gün Sonra, c) Karışımdan 8 Gün Sonra, d) Karışımdan 15 Gün Sonra, e) Karışımdan 21 Gün Sonra, f) Karışımdan 30 Gün Sonra Katkılı Yağın Görüntüleri (BY: Baz yağ, MK: Mekanik Karıştırma, UK: Ultrasonik Karıştırma)

Şekil 7.2’de gösterilen a, b ve c sırasıyla baz motor yağı, mekanik karıştırma işlemine tabi tutulmuş GO katkılı motor yağı ve ultrasonik karıştırma işlemine tabi tutulmuş GO katkılı motor yağlarına aittir. Şekillerde gösterilen yapılar bu motor yağlarının optik mikroskopla 50 kat büyütülerek alınmış görüntüleridir. Şekil 7.2 b’de görüldüğü gibi mekanik karıştırma işlemine tabi tutulmuş GO katkılı motor yağında GO nanopartiküllerinin yağlayıcı içerisinde toplandığı ve büyük birikintiler oluşturduğu görülmektedir. Şekil 7.2 c’de görülen ultrasonik karıştırma işlemine tabi tutulmuş GO katkılı motor yağındaki GO nanopartikülleri ise yağlayıcı içerisine homojen bir şekilde dağılmış ve birikinti oluşturmamıştır. Yağda GO nanopartiküllerinin homojen bir şekilde dağılması nanoyapının tribolojik çalışmalarda görevini daha iyi bir şekilde yerine getirerek yağlayıcı maddenin tribolojik özelliklerin iyileşmesini sağlamaktadır (Rasheed ve diğ. 2016).



Şekil 7.2: Numunelerin Optik Mikroskop Görüntüleri, a) Baz Yağ, b) Mekanik Karıştırma İşlemine Tabi Tutulmuş Yağ, c) Ultrasonik Karıştırma İşlemine Tabi Tutulmuş Yağ

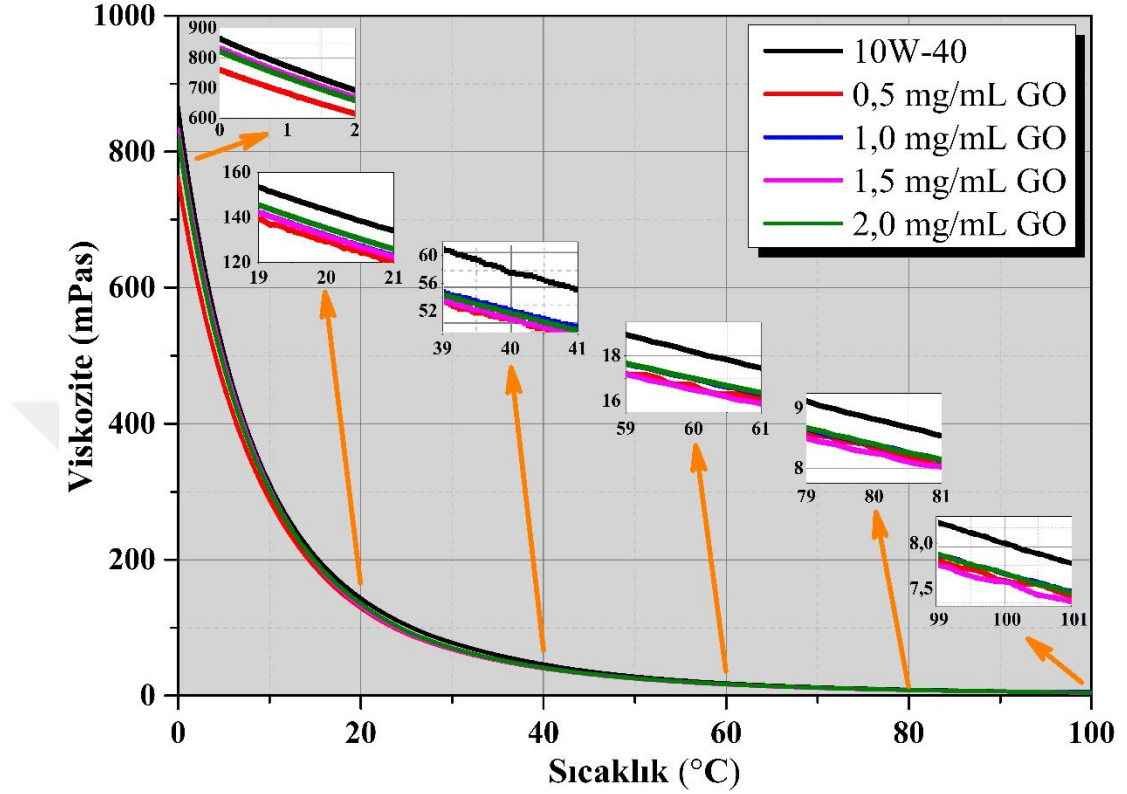
7.2 Viskozite ve Viskozite İndeksi

Viskozite akışkan maddenin yüzey üzerinde akmaya karşı göstermiş olduğu direnci ifade edip, yağlayıcı maddelerin en önemli özelliklerinden biridir. Herhangi bir yağlama maddesinin tüm yağlama koşullarında (sınır, karma, hidrodinamik yağlama) performansının belirlenmesinde, sürtünmenin değişimini veren ve yük, hız, yağlayıcı viskozitesinin kombinasyonu ile ifade edilen stribeck eğrileri kullanılır (Paul ve diğ. 2019). Stribeck eğrilerinde sürtünme değişiminin hesaplanmasında kullanılan viskozite, ayrıca hidrodinamik yağlama koşulları altında yağlayıcının özelliklerini önemli derecede etkileyen bir faktördür (Xiao ve Liu 2017; Ali ve diğ. 2018^a).

Viskozite testleri AND SV-10 marka titreşimli viskozimetre ile yapılmış ve farklı sıcaklıklarda detayların yer aldığı grafik Şekil 7.3'te gösterilmiştir. Genellikle yağın viskozitesi molekül ağırlığı ile artıp, doymamışlık seviyesiyle azalır. Bunun yanı sıra katkı maddesinin yağlayıcı içerisinde homojen bir şekilde dağılabilmesi de viskoziteyi etkiler (Ismail 2017). Nano katkılı yağlarda yağlayıcı içerisindeki nano katkının konsantrasyonu yağlayıcının viskozitesini etkilemektedir. Ortam sıcaklıklarında değerlendirildiğinde GO nano katkısının yağlayıcı içerisindeki konsantrasyonu arttıkça belli seviyelere kadar viskozite artmaktadır. Bunun nedeni de nano katkı maddesinin yağın içerisinde homojen bir dağılım gösterebilmesidir. Yağ içerisindeki GO nano katkısının konsantrasyonu arttıkça katkı maddesinin yağ içerisinde daha fazla yayılamayacak ve bundan dolayı da viskozitede bir artış meydana gelecektir (Gupta ve diğ. 2016). Ayrıca tüm sıcaklık değerlerinde farklı konsantrasyondaki GO katkılı motor yağlarının baz yağa göre viskozitelerinin düşük olduğu Şekil 7.3'te görülebilmektedir. Viskozitedeki bu azalmanın tüm yağlayıcı numunelerinde artan kayma gerilmesindeki azalmaya bağlanmıştır (Guo ve Zhang 2016).

Bir yağlayıcının farklı sıcaklıklarda makine parçaları arasında bir yağ filmi oluşturarak yağlamayı sağlaması, sürtünme ve aşınmayı minimum seviyeye indirmesi gerekmektedir. Şekil 7.3'teki grafik incelendiğinde düşük sıcaklıklarda GO katkılı yağların viskozitelerinin baz yağa göre düşük olduğu ve bunun da yağlayıcıların düşük sıcaklıklarda kolay bir şekilde yağ filmi oluşturarak, sürtünme ve aşınmanın azalmasını sağlayacağı bilinmektedir. Fakat yüksek sıcaklıklarda GO katkılı yağların

baz yağa göre düşük viskozitelerinin yağlayıcının taşıma kapasitesini düşürebileceği de öngörülmektedir. Fakat bu noktadaki viskozite düşüşünün önemsiz derecede az olduğu Şekil 7.3'te görülebilmektedir (Raygoza ve diğ. 2016; Senatore ve diğ. 2013).



Şekil 7.3: Baz Yağ ve Farklı Konsantrasyonlara Sahip GO Katkılı Motor Yağlarının Viskozitelerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Viskozite indeksi (VI), yağlayıcı maddede sıcaklık değişiminin viskozite üzerine etkisini ifade eden ampirik bir sayıdır. Optimum motor çalışma koşullarında yağın viskozitesinde daha az değişiklik olması için yüksek bir viskozite indeksi tercih edilir (Genesan 2012; Gupta 2006). Bundan dolayı 40°C ve 100°C'deki motor yağlarının kinematik viskoziteleri kullanılarak ASTM-D2270 standardına uygun bir şekilde yağlayıcıların viskozite indeksleri hesaplanmış ve Tablo 7.1'de gösterilmiştir.

Tablo 7.1 incelendiğinde farklı konsantrasyondaki GO ile oluşturulan katkılı motor yağlarının viskozite indeksleri baz yağa göre az miktarda artış gösterdiği görülmektedir. Viskozite indeksindeki bu artış katkılı yağlama maddelerinin daha geniş bir sıcaklık aralığında viskozitelerinin değişmeden başarılı bir şekilde çalışabileceğini göstermektedir (Patel ve diğ. 2019^b).

Viskozite indekslerinin sınıflandırılmasına bakıldığında tüm yağlayıcıların viskozitelerinin 100'den büyük olması ($VI > 100$) yağlayıcıların aşırı yüksek viskozite indekslerine sahip olduğunu göstermektedir (Akyazı 2015). Bununla birlikte Amerika Petrol Enstitüsü'ne (API) göre bir akışkanın viskozite indeksi 80 ila 120 arasında ise katı katkı maddelerinin baz yağ içerisine kolay bir şekilde dağılabileceği ifade edilmiştir (Patel ve diğ. 2019^b). Tablo 7.1'de viskozite indeksi değerleri incelendiğinde yağlayıcıları viskozite indeksi değerlerinin belirtilen bu kabul edilebilir aralıkta olduğu ve katı GO nano yapılarının baz yağ içerisine kolay bir şekilde dağılabileceğini göstermektedir.

Tablo 7.1: Yağlayıcıların Kinematik Viskoziteleri ve Viskozite İndeksleri (VI)

Özellikler	10W-40	0,5 mg/mL	1,0 mg/mL	1,5 mg/mL	2,0 mg/mL
Viskozite, 40 ° C mm^2 / s	58,8	51,35	52,59	51,59	52,44
Viskozite, 100 ° C mm^2 / s	8,06	7,64	7,69	7,58	7,67
Viskozite İndeksi (VI)	103,9	112,972	110,548	110,145	110,373

Sonuç olarak baz motor yağına göre düşük kinematik viskozite ve yüksek viskozite indeksine sahip GO nano katkılı motor yağı sürtünme yüzeylerinde kaymayı kolaylaştırıp, aşınmayı ve sürtünme kayıplarını azaltıp, motor performansını iyileştirebileceği öngörülmektedir (Omranı ve diğ. 2019; Xiao ve Liu 2017). Ayrıca baz yağ içerisine katılan nano GO yapısı yağlayıcının viskozitesini düşürmüş ve viskozite indeksinde ise ortalama % 6-7'lik bir artış sağlamıştır. Viskozite indeksinin yüksek olması yağlayıcıların kullanıldığı uygulamalar için arzu edilen bir durumdur.

7.3 Yoğunluk Sonuçları

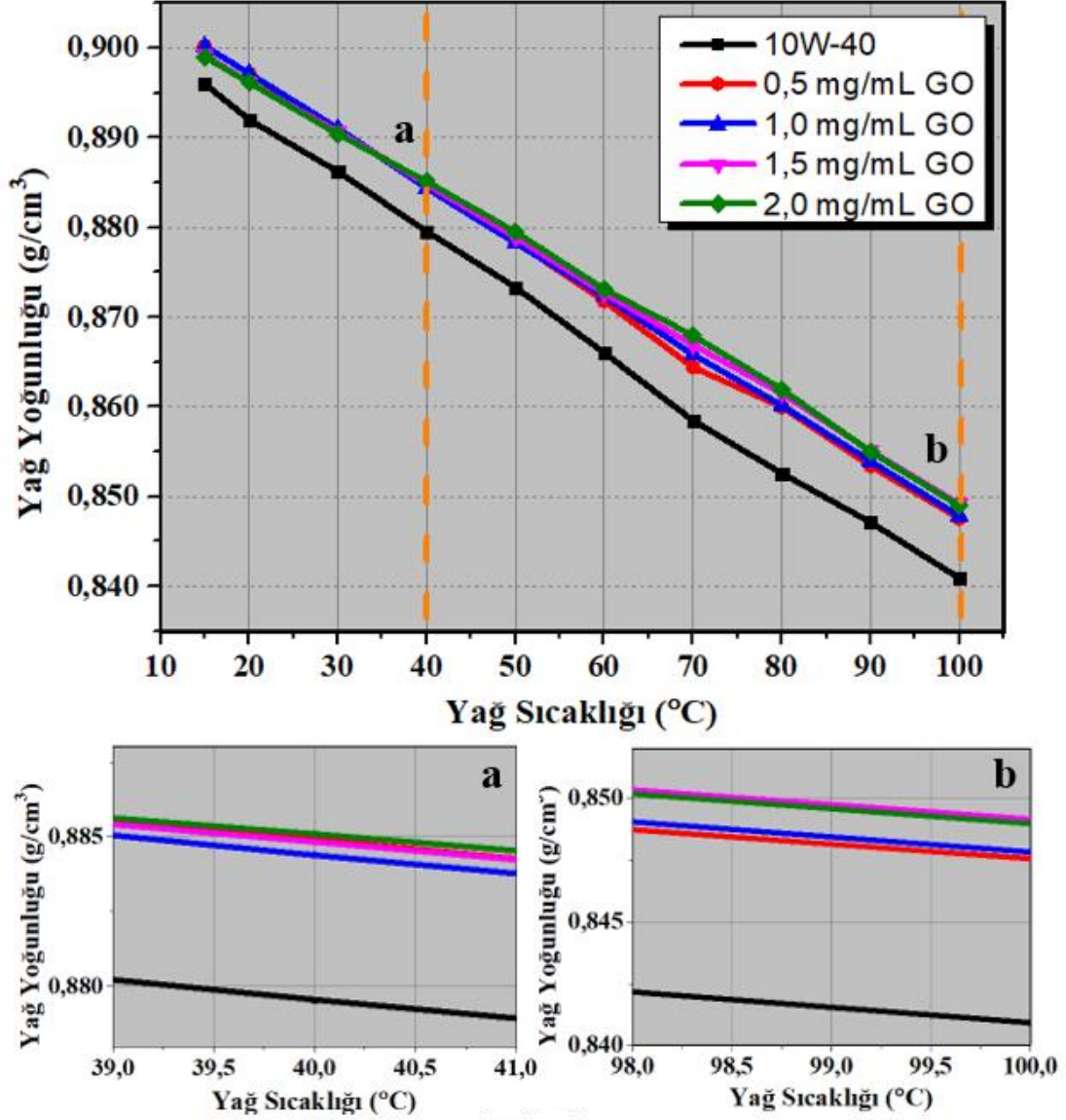
Genellikle baz yağ ve katkı maddeleri kullanılarak formüle edilen motor yağlarının kimyası genel olarak yağlayıcının fizikokimyasal özelliklerini ve ayrıca tribolojik performansını belirler. Bundan dolayı viskozitenin yanında motor yağları için önemli bir özellik olan yağın yoğunluğunun da bilinmesi gerekir. Viskozite, yoğunluk gibi karakteristik özellikler motor yağlarının uygulanabilirliği hakkında bilgi sağlarlar (Thapliyal ve Thakre 2017). Şekil 7.4'te yer alan grafikte 10W-40 motor

yağı ve GO katkılı motor yağlarının yoğunluklarının sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde tüm motor yağlarının artan sıcaklıkla birlikte yoğunluk değerlerinin doğrusala yakın bir şekilde düştüğü görülmektedir (Kardos ve Pietrikova 2016; Yang ve diğ. 2017). Bunun nedeni sıcaklığın artması ile sıvı hacminin genişlemesine böylece yoğunluk formülünde olduğu gibi ($d = \frac{m}{V}$) birim hacimdeki kütle miktarının azalmasıdır.

Şekil 7.4'teki grafik incelendiğinde GO katkılı motor yağlarının baz motor yağına göre yoğunluklarının çok az bir miktar yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni grafen oksit katkı maddesinin yapısında fazla miktarda yer alan karbonlar (C) nedeniyle yoğunluğunun ($1,80 \text{ g/cm}^3$), baz motor yağının yoğunluğuna ($0,86 \text{ g/cm}^3$) göre yüksek olmasıdır. Bununla birlikte GO nanopartikülünün yoğunluğunun yüksek olmasından dolayı GO katkılı motor yağlarının kendi içerisinde karşılaştırıldığında yağ içerisindeki artan GO konsantrasyonu ile birlikte yağın yoğunluğunun da artma eğiliminde olduğu görülmektedir (Ismail 2017). Ayrıca Şekil 7.3'te yer alan viskozite-sıcaklık grafiği ve Şekil 7.4'te yer alan yoğunluk-sıcaklık grafikleri beraber incelendiğinde viskozite ile yoğunluk arasında bir ilişki olduğu görülebilmektedir. Bu ilişki yoğunluğun artan sıcaklıkla birlikte doğrusal olarak azaldığı buna karşılık viskozitenin artan sıcaklıkla birlikte hiperbolik olarak azaldığıdır ve bu durum grafiklerde açık bir şekilde görülmektedir (Kardos ve Pietrikova 2016).

Yağ içerisinde artan GO konsantrasyonu ile birlikte viskozite ve yoğunlukta etkilenebilmektedir. Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'te yer alan grafiklerde yağ içerisinde artan konsantrasyon ile birlikte viskozitenin ve yoğunluğun arttığı görülmektedir. Viskozitede meydana gelen bu artışın nedeni yağ içerisindeki GO konsantrasyonunun artmasıyla nanopartikülün yağ içerisinde homojen olarak dağılmasının zorlaşmasına ve bundan dolayı nanopartikül birikerek viskoz kuvvetleri artırmasından dolayıdır (Gupta ve diğ. 2016; Ismail 2017). Aynı şekilde GO'nun yoğunluğunun baz yağın yoğunluğundan yüksek olmasından dolayı GO konsantrasyonunda meydana gelen artışla katkılı yağın yoğunluğunun arttığı bilinmektedir. Buradan sonuçla viskozite veya yoğunlukta meydana gelecek herhangi bir artışın birbirini doğrudan etkileyebileceği sonucuna ulaşılmaktadır. Bununla birlikte artan GO konsantrasyonu ve zorlaşan homojen dağılımla birlikte, yağ içerisindeki GO katkısının çökelti oluşturma ihtimali artar (Rasheed ve diğ. 2017). Bundan dolayı küçük çaplı yağ

kanallarının zamanla tıkanmasına, yağlama sisteminin düzgün çalışmamasına ve nanopartiküllerin sürtünme yüzeyleri arasına girememesinden dolayı katkılı yağların tribolojik performanslarının düşmesine neden olmaktadır.



Şekil 7.4: Yağ Yoğunluğunun Sıcaklık İle Değişimi

7.4 Isıl İletkenlik Sonuçları

Geçmişten günümüze akışkanların ısı iletim özelliklerini geliştirmek için birçok araştırma yapılmıştır. İlk çalışmalar Maxwell öncülüğünde 1881 yılında geleneksel ısı transferi akışkanlarının ısı iletkenlik özelliklerini geliştirmek için katı parçacıkları soğutucu akışkan içerisine eklemesiyle başlamıştır. Başlangıçta

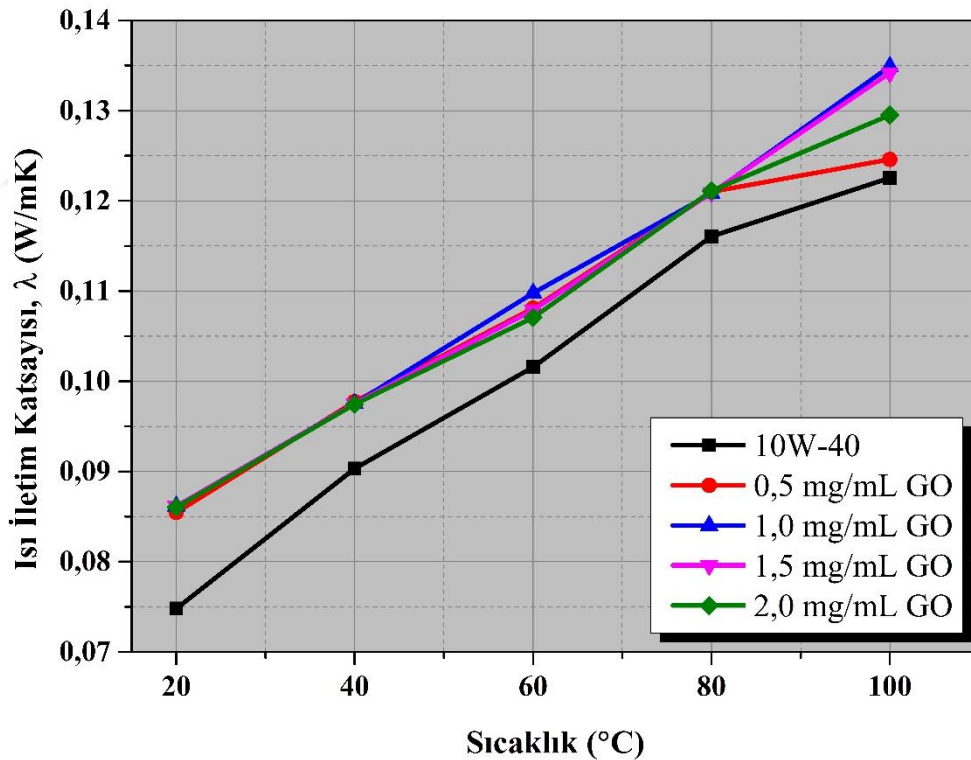
araştırmalarda mikrometre ve hatta daha büyük milimetre boyutlarında katı parçacıklar akışkanların içerisine karıştırılmıştır. Fakat büyük boyuttaki bu parçaların kanalları tıkaması, aşındırması ve sürtünmeyi arttırmasından dolayı sistemlerin çalışmasında birçok sorun meydana gelmiştir (Arslan ve Günerhan 2017; Karabulut ve diğ. 2018).

Son yıllarda geline n noktada ise yenilikçi çalışmalar ve teknolojiadaki ilerlemeler sayesinde çok daha küçük boyutta nano yapılar elde edilmiş ve soğutucu akışkanlar içerisine bu yapılar katılarak akışkanın termal özellikler başta olmak üzere birçok özellikleri geliştirilmiştir. Bu nano akışkanlar, 100 nm ve daha küçük boyutlardaki metal, metal oksit, grafen gibi partiküllerin akışkanların içerisine çok küçük konsantrasyonlarda eklenmesiyle oluşan yapılardır (Karabulut ve diğ. 2018; Ziyadanoğulları ve Yücel 2017). Bu nano yapılar karşılaştırıldığında, karbon ve türevleri, metal ve türevlerine göre yüksek ısı iletkenliğine ve düşük yoğunluğa sahip olmalarından dolayı diğer yapılardan daha ilgi çekici hale gelmiştir. Grafen mükemmel mekanik ve elektriksel özelliklerinin yanında yüksek ısı iletkenliği ve yüksek yüzey alanına sahip olup, diğer nano yapılarla hatta karbon nanotüplerle karşılaştırıldığında akışkanların ısı transferinden kullanılan diğer katkılara göre daha iyi performans göstermektedir (Eswaraiah ve diğ. 2011; Karabulut ve diğ. 2018; Mungse and Khatri 2014). Grafenin hidrofobik özelliği nedeniyle akışkanlar içerisinde kararlı bir şekilde dağıtılabilmesini sağlamak için oleik asit ile modifiye edilerek grafen oksit elde edilmiştir. Grafene göre ısı iletkenliğinin bir miktar düşmesine rağmen GO'nun baz yağ içerisinde çökelme oluşturmadan, kararlı bir şekilde dağılmasını için bu işlem gereklidir (Karabulut ve diğ. 2018).

Bu çalışmada baz motor yağı içerisine katkı olarak grafen oksit nanopartikülü ilave edilmiş ve baz yağ ile farklı konsantrasyonlarda GO'ya sahip katkılı yağların ısı iletkenliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Isı iletkenlik, akışkanın ısı transfer performansının iyileştirilmesinde önemli bir parametredir (Karabulut ve diğ. 2018). Baz motor yağına eklenen daha yüksek ısı iletim katsayısına sahip grafen oksit ile baz yağın ısı iletim katsayısının arttırılması beklenmektedir. Hareketli motor parçalarının soğutulmasında yağlayıcı maddenin ısı iletkenliği ve yağ filmi kalınlığı hem iletim hem de taşınım ile ısı iletiminde çok önemlidir (Rasheed ve diğ. 2016). Ayrıca motorun kolay bir şekilde soğutulabilmesine yardımcı olan yağlayıcı maddenin ısı

iletkenliği arttıkça motorun ısı transfer verimi artacak ve motor daha iyi soğutulabilecektir (Hiteshwer 2018).

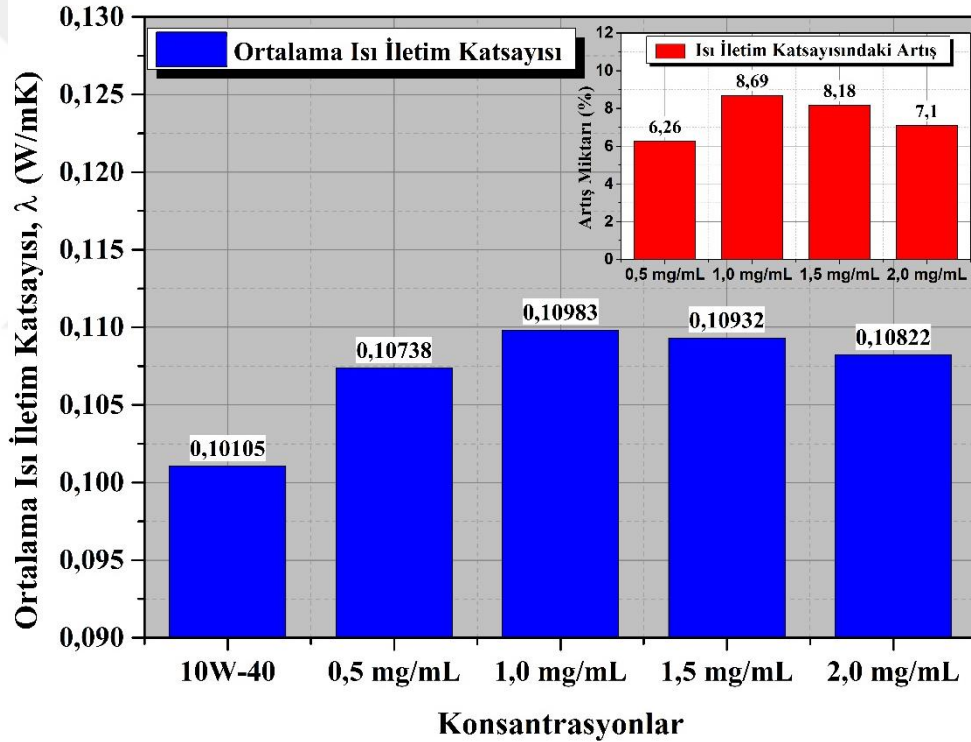
Şekil 7.5'te gösterilen grafikte baz yağ ve farklı GO konsantrasyonlarına sahip motor yağlarının farklı sıcaklıklar altında sahip oldukları ısı iletim katsayıları gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde farklı GO konsantrasyonlarına sahip katkılı motor yağlarının baz motor yağına göre tüm sıcaklıklarda ısı iletim katsayılarının daha yüksek olduğu ve yapılan deneylerde ısıyı verimli bir şekilde dağıttığı görülmüştür (Ota ve diğ. 2015). Bu durumun en büyük nedeni, baz motor yağına eklenen ve yüksek ısı iletkenliğe sahip olan GO nanopartiküllerinin motor yağının ısı iletkenliğini arttırmasıdır (Karabulut 2018). Diğeri bir etken ise grafenin yüzey alanının çok yüksek olması ve böylece ısıнын yüzey boyunca daha hızlı iletilmesinin sağlanmasıdır. Dolayısıyla buradan nano partikülün yüzey alanı ile ısı iletkenlik arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.



Şekil 7.5: Baz Yağı ve Farklı GO Konsantrasyonlarına Sahip Katkılı Motor Yağlarının Isı İletim Katsayıları

Şekil 7.5'teki grafikte sıcaklıktaki yükselme ile birlikte ısı iletim katsayılarının tüm motor yağlarında arttığı görülmüştür. Bunun nedeni, artan sıcaklıkla birlikte ısı iletkenliği arttıran Brownian hareketinin (rastgele dönme ve öteleme hareketleri)

artmasına ve bundan kaynaklı nanoparçacıkların daha hızlı hareket ederek ısıyı daha hızlı taşımalarına bağlanılabilir. Bununla birlikte Şekil 7.6’da başlangıçta GO konsantrasyonu ile birlikte artan ısı iletim katsayısının belli bir konsantrasyondan ($> 1,5 \text{ mg/mL}$) sonra düşme eğiliminde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni artan konsantrasyon ile Van Der Waals çekim kuvvetlerinin GO nano partiküllerini bir araya getirmeye çalışması ve nanopartiküllerin yaptığı Brownian hareketlerinin kısıtlanmasıdır. Ayrıca Brownian hareketinin küçük parçacıklarda büyük parçacıklara göre daha etkili olması nedeniyle GO nano partikülünün küçük boyutu büyük bir avantaj oluşturmaktadır (Rasheed 2017). Bu durum katkılı yağlarda çalışmaya en uygun ve en verimli nanopartikül konsantrasyonunun belirlenmesini ve mümkün olduğunca küçük boyutta partiküllerin seçilmesini gerektirmektedir.



Şekil 7.6: Tüm Sıcaklıklardaki Isı iletim Katsayılarının Ortalaması ve Baz Yağa Göre Isı İletimindeki Artış Miktarı

Ayrıca yağlayıcı içerisine katılan GO nanopartiküllerinin baz yağ içerisine homojen bir şekilde dağılması ve çökelti eğiliminde olmaması katkılı yağı kararlı hale getirerek, yağın ısı iletkenliğini artırmaktadır (Rasheed 2017). Bu nedenle nano yapıların homojen bir şekilde motor yağı içerisine dağılması için GO’nun yüzeyi aktif maddelerle modifiye edilmiş ve ultrasonik karıştırma işlemine tabi tutulmuştur.

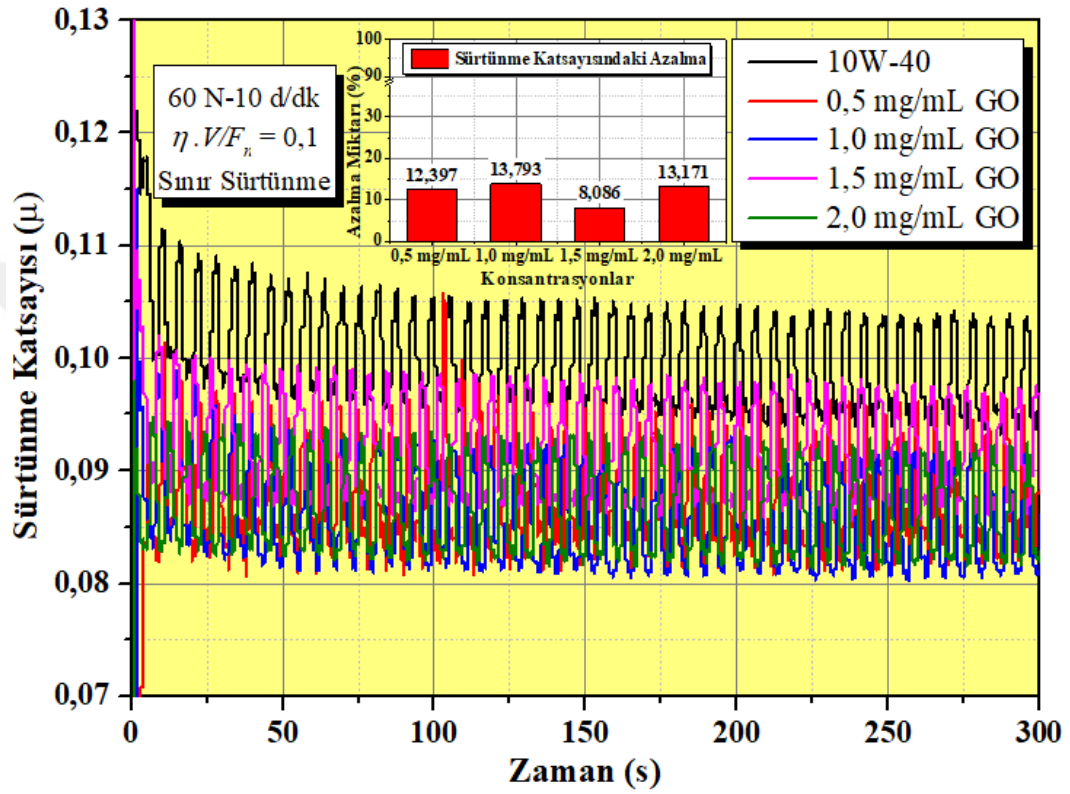
7.5 Sürtünme Katsayısı ve Stribeck Eğrisi

İki hareketli yüzey arasında meydana gelen ve mekaniğin en eski problemlerinden biri olan sürtünme; mekanizmanın dayanıklılığının azalmasına, arızalanmasına, veriminin düşmesine neden olan olumsuz bir durumdur. Bundan dolayı ilk zamanlardan beri sürtünmenin ortadan kaldırılması veya en aza indirilebilmesi için birçok çalışma yapılmıştır ve yapılmaya devam edilmektedir. Sürtünmeyi kontrol edebilmenin etkili yollarından biri sıvı, katı, gaz veya sıvı-katı karışımı kayganlaştırıcıları kullanmaktır. Yapılan çalışmalar gelişen teknolojiyle birlikte yeni malzemeler, kaplamalar, yağlayıcılar üzerine yoğunlaşmıştır. Üzerine araştırmaların yapıldığı malzemelerden biriside sıvı baz yağlayıcı içerisinde katkı maddesi olarak nano boyuttaki grafen ve türevlerinin kullanılmasıdır. Grafen tek başına katı bir yağlayıcı olarak kullanılabildiği gibi baz yağlara ilave olarak kullanılıp baz yağın sürtünme ve aşınma özelliklerinde iyileştirebilmektedir (Berman 2014). Ayrıca iki fazlı (sıvı-katı) yağlayıcılarda sıvı yağlayıcılar içerisine katı yağlayıcılar eklenerek sürtünme temas yüzeylerinin ağır yük koşullarında bile düşük kayma gerilmeli ve yüksek dayanıklılığa sahip bir yağ filmi ile ayrılması, sürtünmenin azaltılmasını sağlamaktadır (Guo ve Zhang 2016).

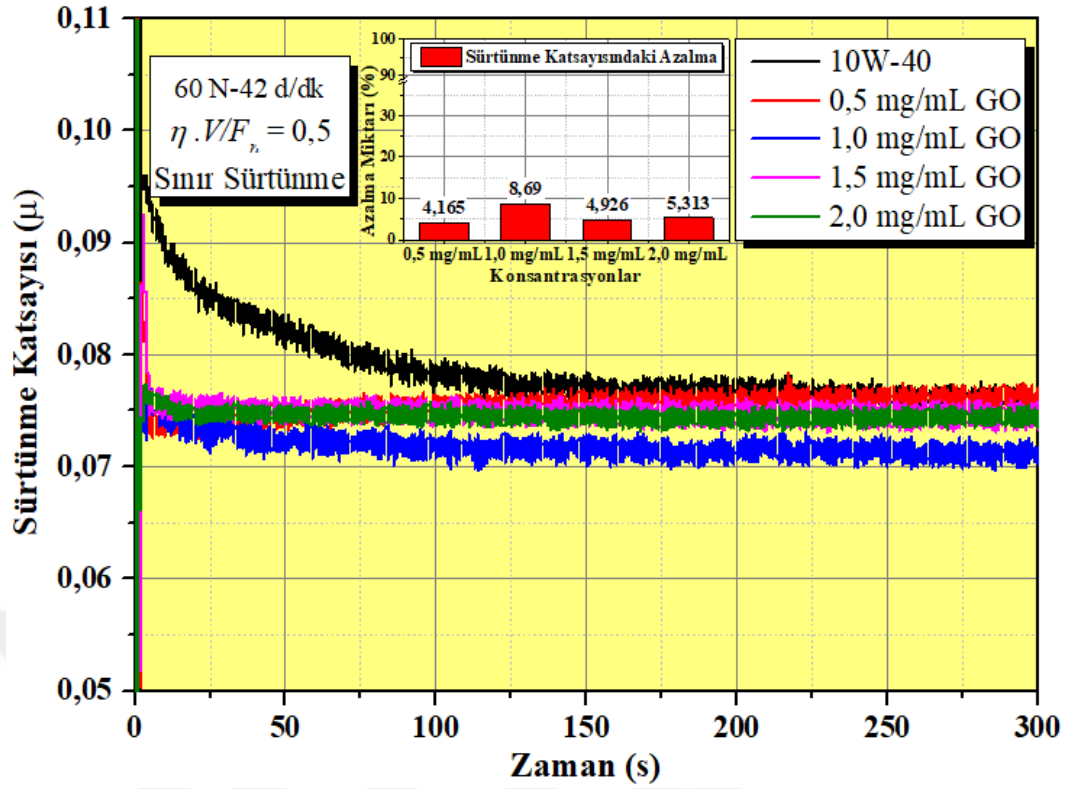
Bu çalışmada da grafenin oksitlenmesiyle elde edilen GO yapısı, motor yağı katkı maddesi olarak kullanılmış ve sürtünme performansları incelenmiştir. Farklı GO konsantrasyonlara sahip katkılı yağlar ve baz yağ, Tablo 6.7’de belirlenen farklı hız ve yük parametrelerine göre ball on disk cihazında oda sıcaklığında çeşitli testlere tabi tutulmuş ve elde edilen veriler aşağıdaki grafiklerde sıralanmıştır. Sıralama sınır yağlama, karma yağlama ve hidrodinamik yağlama şeklinde olup, her bir farklı yağlama bölgesine ait olan grafiklerin kolay anlaşılabilmesi için arka planı farklı renkte gösterilmiştir. Ayrıca yağlama bölgesindeki farklı yağ konsantrasyonlarının baz yağa göre sürtünme katsayısındaki azalmaya yapmış olduğu katkılar yüzdelik ifadeler ile yine grafikte ifade edilmiştir.

Sınır yağlama durumu düşük hız ve yüksek yük koşullarında gerçekleşir (Ali ve diğ. 2019). Şekil 7.7, 7.8 ve 7.9’da gösterilen grafiklerde sınır yağlama bölgesindeki hareketli yüzeylerin farklı yük ve hız koşullarında teması sonucu meydana gelen sürtünme katsayıları gösterilmiştir. Test süresince GO katkılı motor yağları baz motor

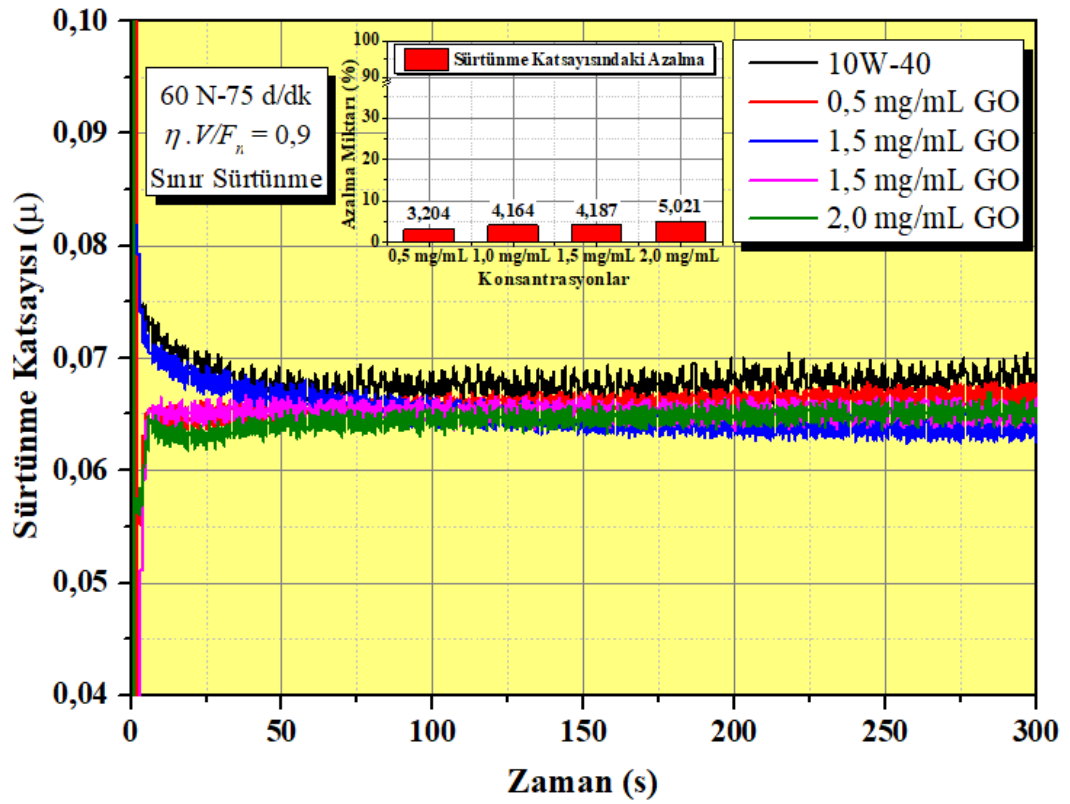
yağına göre daha düşük sürtünme katsayısı ortaya koymuştur. Sınır yağlama bölgesindeki ortalama sürtünme katsayıları Tablo 7.2’de gösterilmiş olup, bu bölgedeki en düşük sürtünme katsayısı 1,0 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip motor yağında 0,0744μ büyüklüğündedir.



Şekil 7.7: 60 N – 10 d/dk ve $\eta V/F_n = 0,1$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği

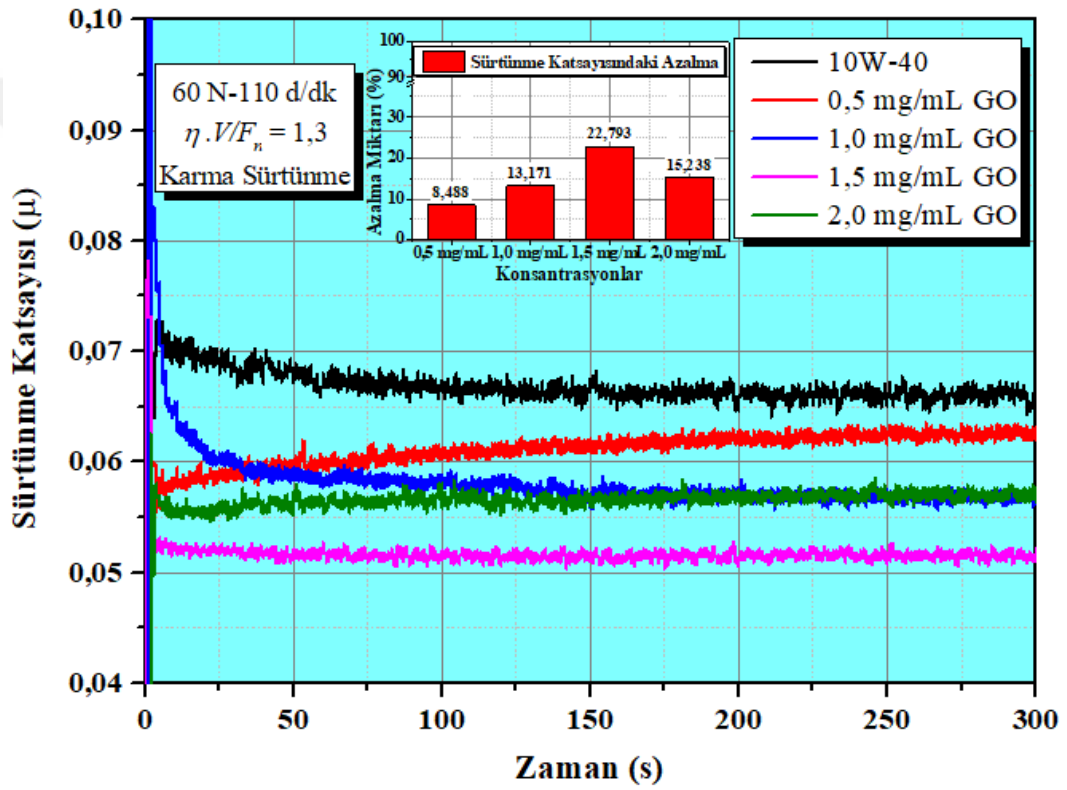


Şekil 7. 8: 60 N – 42 d/dk ve $\eta V/F_n = 0,5$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği

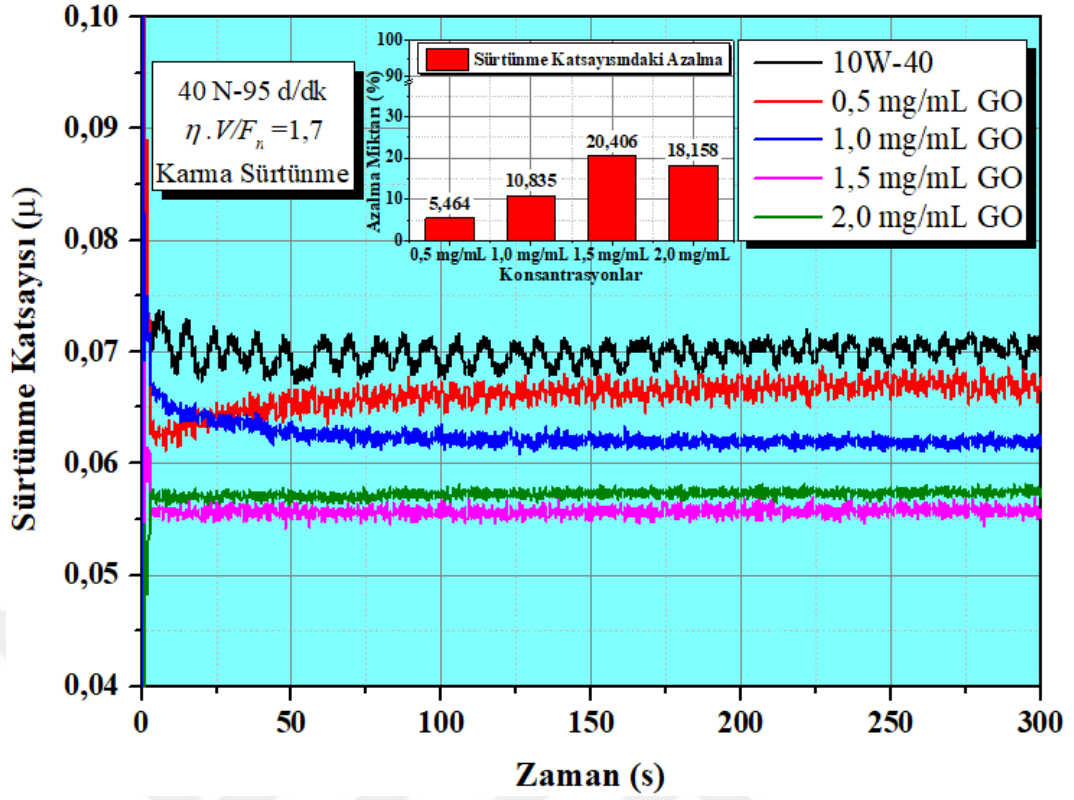


Şekil 7.9: 60 N - 75 d/dk ve $\eta V/F_n = 0,9$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği

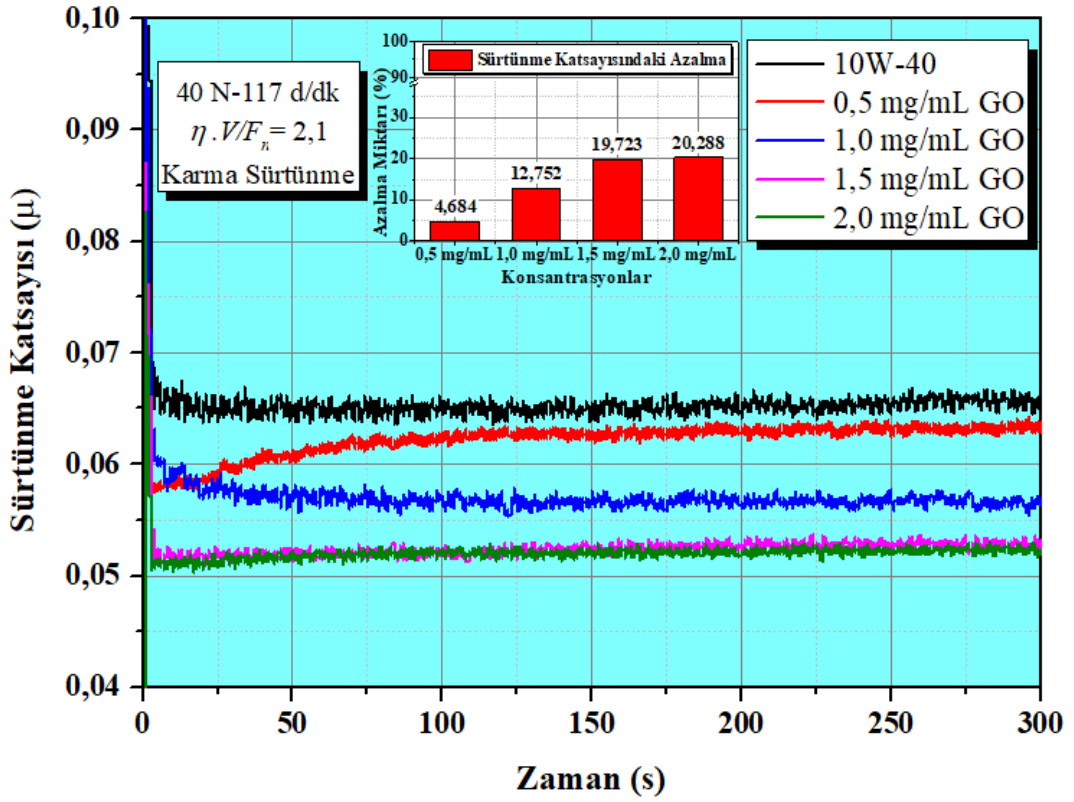
Karma yağlama durumu düşük bir temas ve kısmi yağlama koşullarında gerçekleşir (Ali ve diğ. 2019). Şekil 7.10, 7.11, 7.12, 7.13 ve 7.14'te gösterilen grafiklerde karma yağlama bölgesindeki hareketli yüzeylerin farklı yük ve hız koşullarında teması sonucu meydana gelen sürtünme katsayıları gösterilmiştir. Test süresince GO katkılı motor yağları baz motor yağına göre daha düşük sürtünme katsayısı ortaya koymuştur. Karma yağlama bölgesindeki ortalama sürtünme katsayıları Tablo 7.3'te gösterilmiş olup, bu bölgedeki en düşük sürtünme katsayısı 1,5 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip motor yağında 0,05 μ büyüklüğünde olmuştur ve oldukça düşüktür.



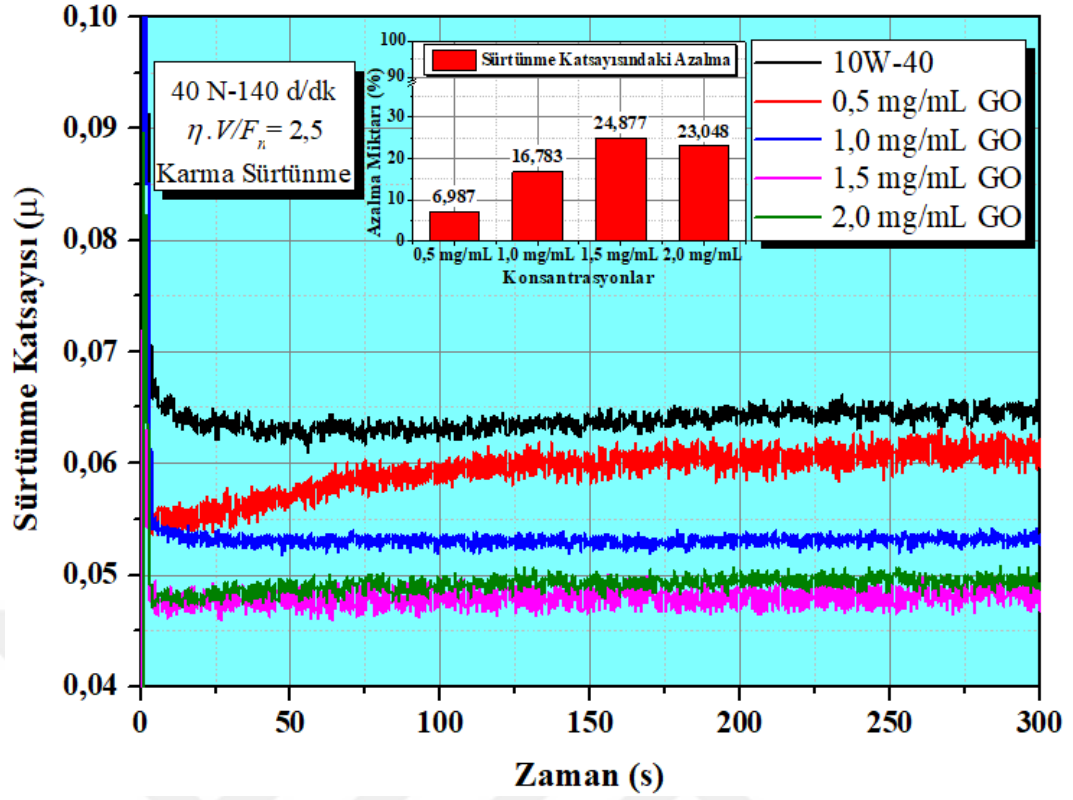
Şekil 7.10: 60 N - 110 d/dk ve $\eta V/F_n = 1,3$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği



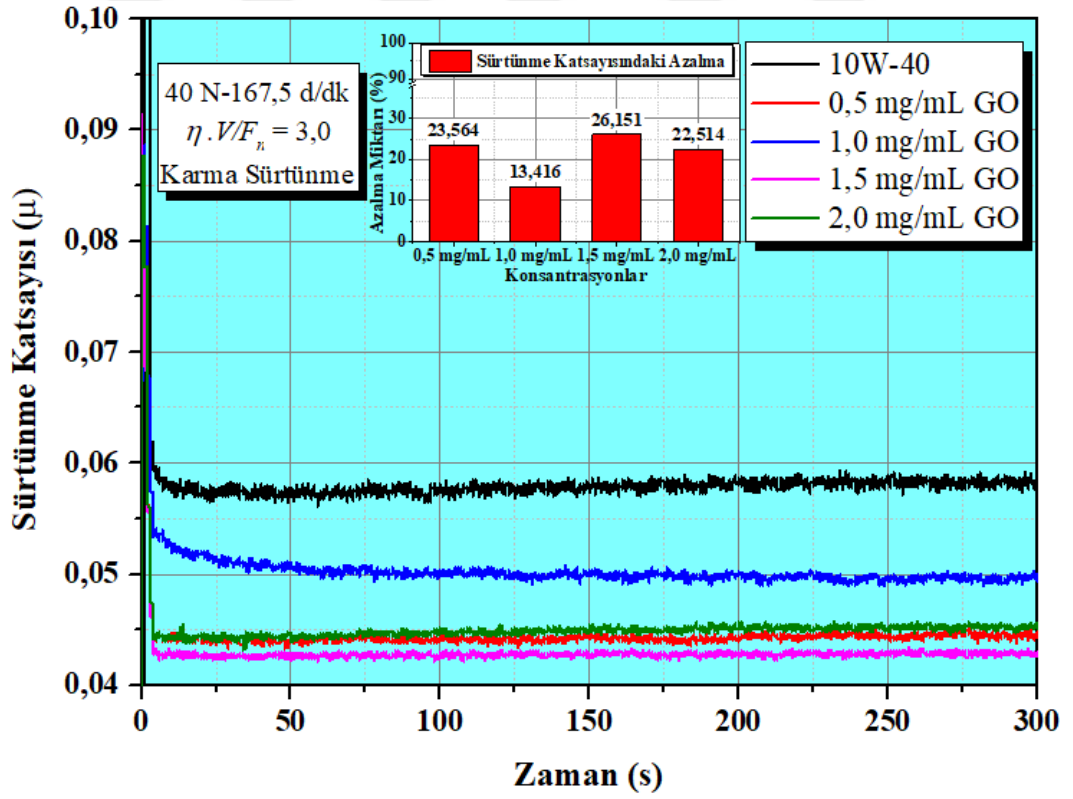
Şekil 7.11: 40 N – 95 d/dk ve $\eta V/F_n = 1,7$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği



Şekil 7.12: 40 N – 117 d/dk ve $\eta V/F_n = 2,1$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği

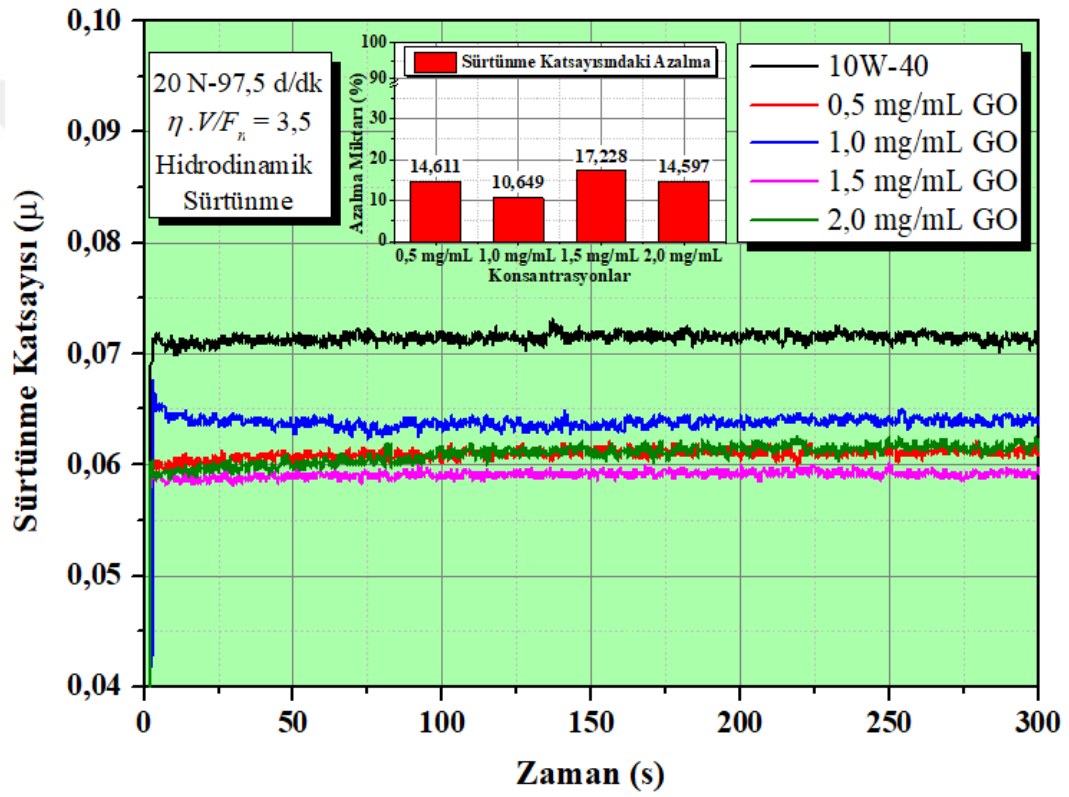


Şekil 7.13: 40 N – 140 d/dk ve $\eta V/F_n = 2,5$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği

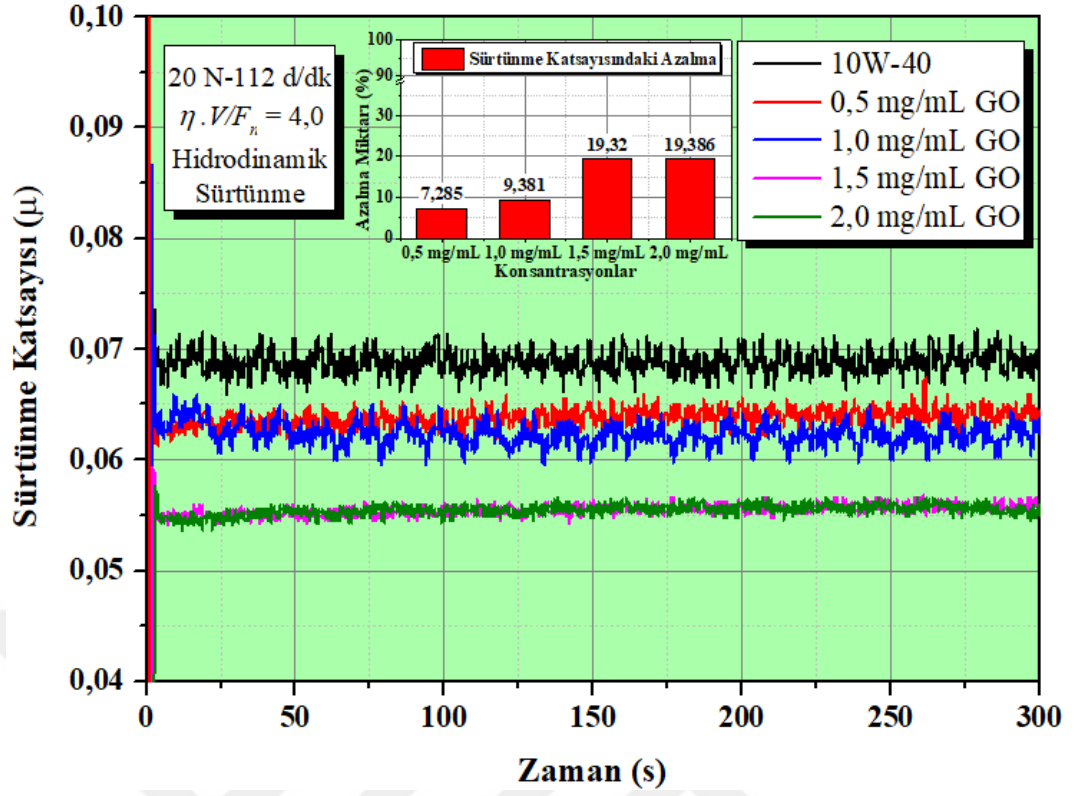


Şekil 7.14: 40 N - 167,5 d/dk ve $\eta V/F_n = 3,0$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği

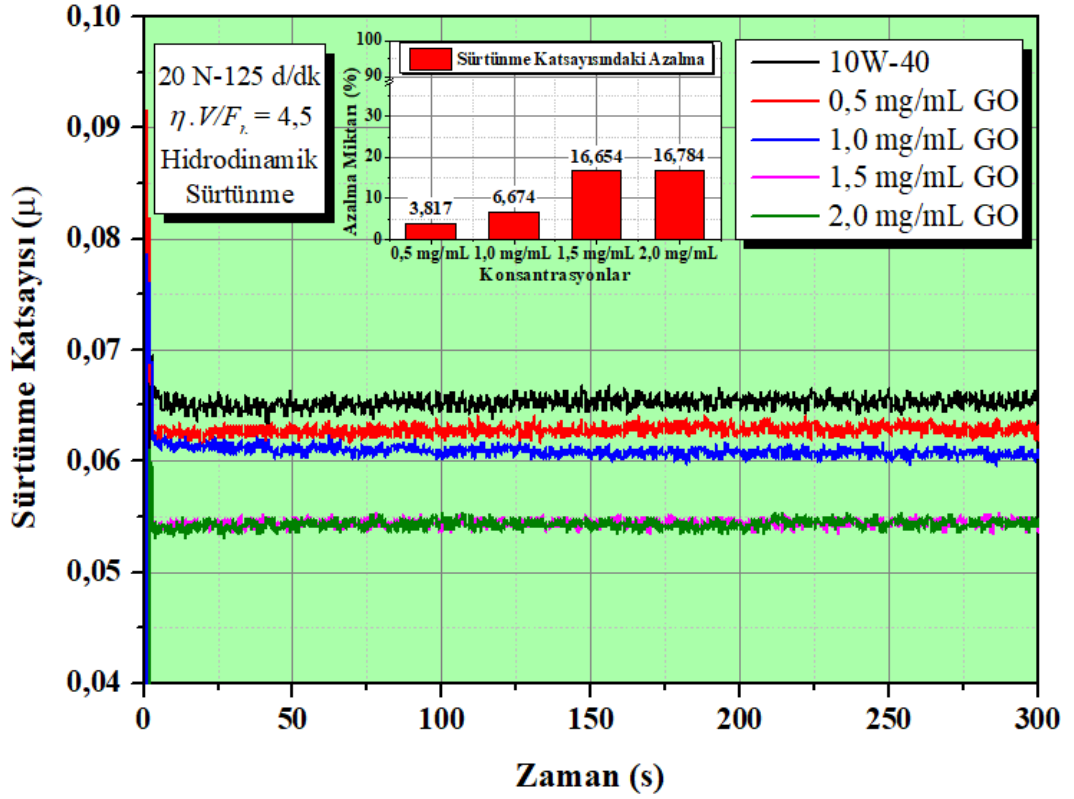
Hidrodinamik yağlama, sürtünme yüzeylerinin bir yağlama filmi ile tamamen ayrıldığı koşullarda gerçekleşir (Ali ve diğ. 2019). Şekil 7.15, 7.16, 7.17, 7.18 ve 7.19’da gösterilen grafiklerde hidrodinamik yağlama bölgesindeki hareketli yüzeylerin farklı yük ve hız koşullarında teması sonucu meydana gelen sürtünme katsayıları gösterilmiştir. Test süresince GO katkılı motor yağları baz motor yağına göre daha düşük sürtünme katsayısı ortaya koymuştur. Hidrodinamik yağlama bölgesindeki ortalama sürtünme katsayıları Tablo 7.3’te gösterilmiş olup, bu bölgedeki en düşük sürtünme katsayısı 1.5 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip motor yağında 0,0539 μ büyüklüğünde olmuştur.



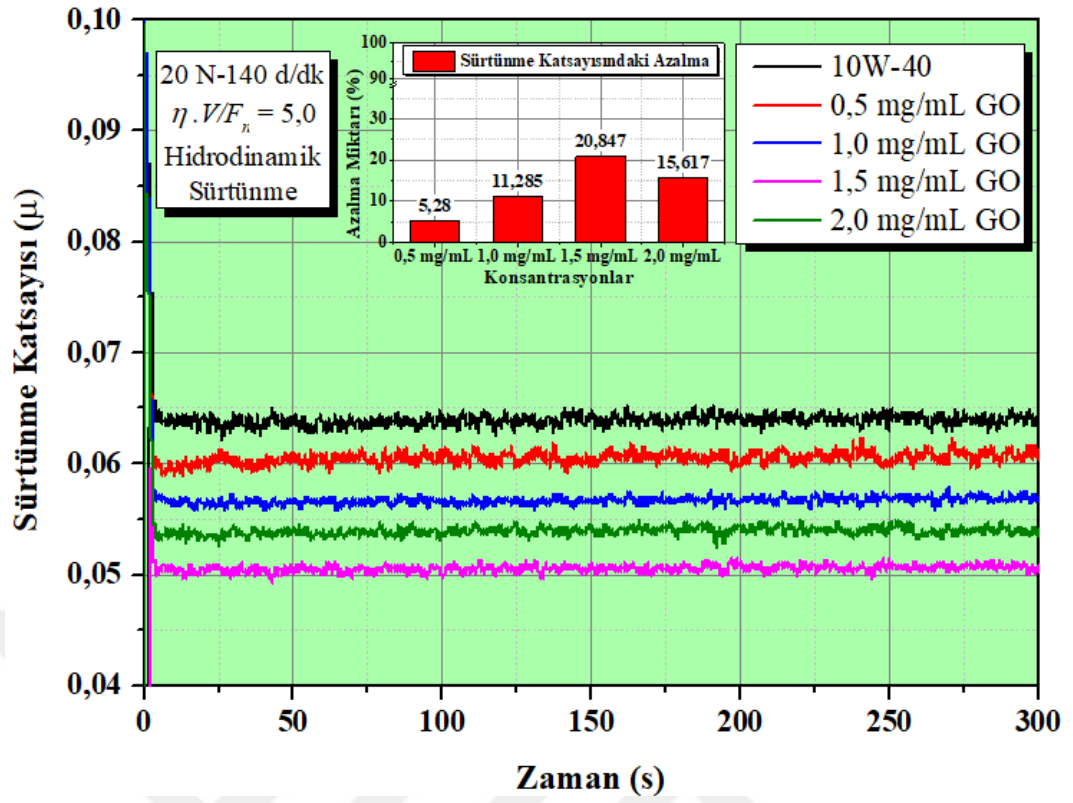
Şekil 7.15: 20 N - 97,5 d/dk ve $\eta V/F_n = 3,5$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafığı



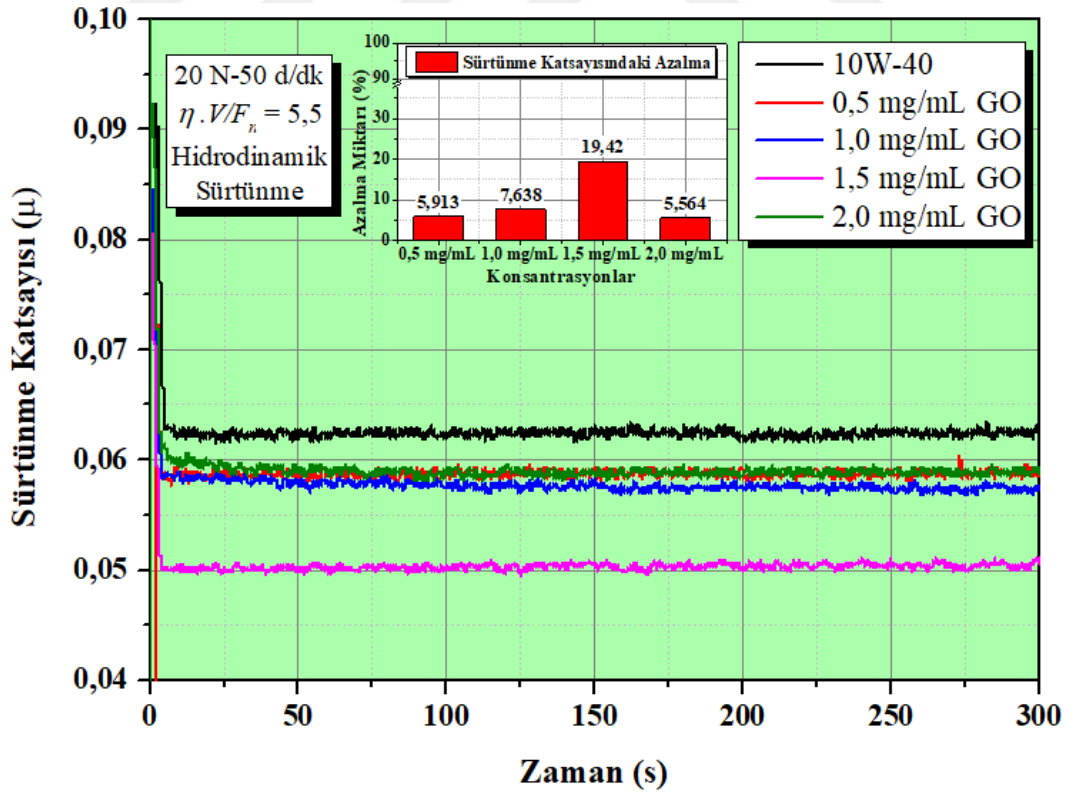
Şekil 7.16: 20 N – 112 d/dk ve $\eta V/F_n = 4,0$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği



Şekil 7.17: 20 N – 125 d/dk ve $\eta V/F_n = 4,5$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği



Şekil 7.18: 20 N – 140 d/dk ve $\eta V/F_n = 5,0$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği



Şekil 7.19: 20 N-150 d/dk ve $\eta V/F_n = 5,5$ Koşullarında Baz ve GO Katkılı Motor Yağlarının Anlık Sürtünme Katsayısı Grafiği

Yukarıdaki sınır, karma ve hidrodinamik yağlama bölgelerinde elde edilen grafikler incelendiğinde tüm yağlama koşullarında GO katkılı motor yağlarının baz motor yağına göre sürtünme katsayısını düşürdüğü görülmektedir. Sürtünme katsayısındaki bu düşmenin ana etkeni baz yağ içerisine katılan nanopartikülün çalışma performansına ve GO yapısının sahip olduğu mükemmel mekanik ve tribolojik özelliklerine bağlanılabilir (Eswaraiah 2011). Sürtünme katsayısının başlangıçtan sınır yağlamadan itibaren düşmesi GO'nun sahip olduğu düşük kayma gerilmesine sahip tabakaların sürtünme yüzeyine etkiyip sürtünmeyi düşürmesine atfedilebilir (Senatore ve diğ. 2013). Ayrıca grafen iki boyutlu yapısı ile temas bölgelerine kolay bir şekilde girip yüzeylerin doğrudan birbirine temas etmesini engelleyerek kesintisiz bir yağ filmi oluşturup, yüzeyi korur, parlatır ve yağlama verimini artırır (Lin ve diğ. 2011; Xiao ve Liu 2017; Ali ve diğ. 2019) GO'nun kendi kendini yağlama özelliğine ve nano boyuta sahip bir malzeme olması da sürtünme katsayısını azaltan önemli bir diğer etkindir (Rasheed ve diğ. 2016). Burada nano boyuttaki GO partikülleri sürtünme temas yüzeyleri arasında bir katman halinde tribo film oluşturarak yüzeylerin birbirine temas etmesini engeller, ve sürtünme önleyici görev yapar (Guo ve Zhang 2016). Ayrıca nano GO yapısı sürtünme yüzeyleri arasındaki boşlukları doldurarak yüzey düzensizliklerini pürüzsüzleştirir, hem sürtünmenin azalmasını sağlar hem de parçanın yüzeyini koruma görevi yapar (Patel ve diğ. 2019^b; Xiao ve Liu 2017).

Tablo 7.2: Ortalama Sürtünme Katsayıları ($COF-\mu$)

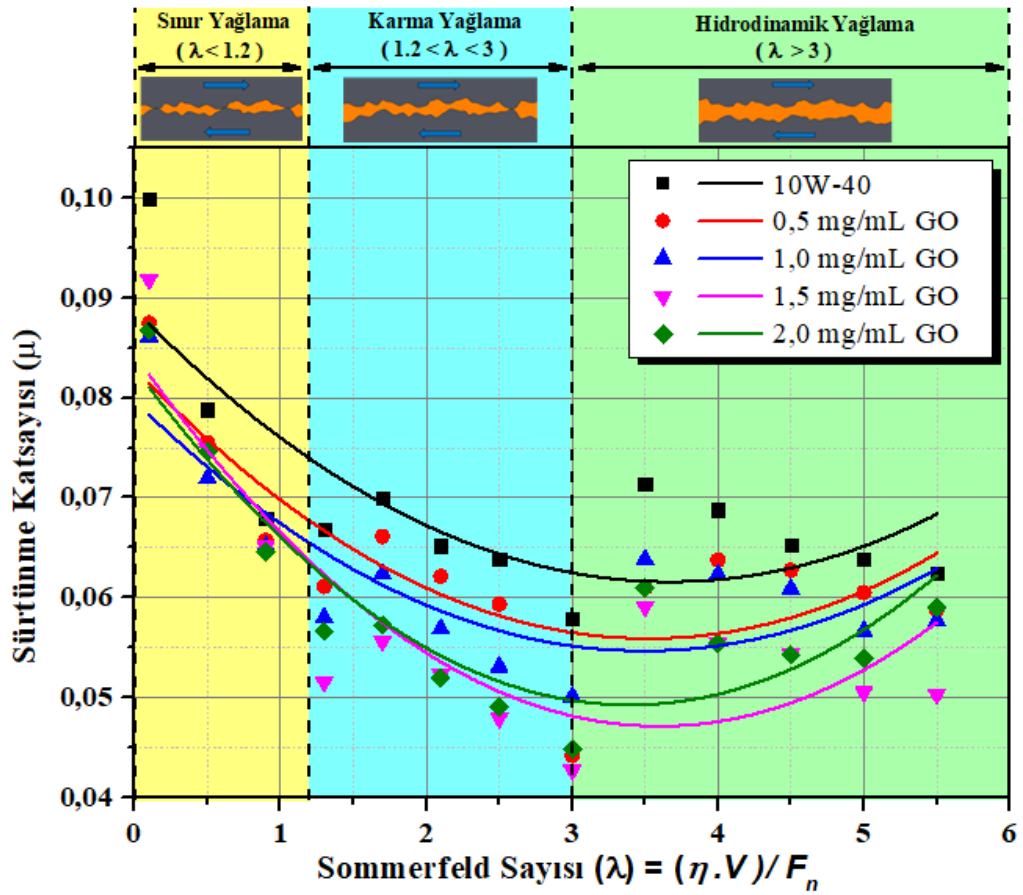
Yağ Özelliği / Yağlama Bölgesi	Sınır Yağlama Bölgesi	Karma Yağlama Bölgesi	Hidrodinamik Yağlama	Ortalama Sürtünme Katsayıları
Baz Yağ	0,0822	0,0647	0,0664	0,0711
0,5 mg/mL GO	0,0763	0,0586	0,0614	0,0654
1,0 mg/mL GO	0,0744	0,0561	0,0603	0,0636
1,5 mg/mL GO	0,0772	0,05	0,0539	0,0603
2 0 mg/mL GO	0,0753	0,052	0,0567	0,0613

Sürtünme önlemede diğer bir önemli etken ise katkı maddesinin konsantrasyonunun belirlenmesidir. Yukarıdaki grafikler ve Tablo 7.2'de yer alan ortalama sürtünme katsayıları incelendiğinde farklı GO konsantrasyon miktarları ile sürtünme katsayısını değiştiği görülmektedir. Tüm bölge ortalamaları baz alındığında sürtünme katsayısının en düşük orandan 1,5 mg/ml GO konsantrasyonuna kadar hızlı

bir şekilde düştüğü fakat 2,0 mg/mL konsantrasyonundan sonra tekrar artış eğilimine sahip olduğu gözükmemektedir. Bunun nedenin artan GO konsantrasyonu ile birlikte katkı maddesinin baz yağ içerisinde dağılmasının zayıflaması ve çökme nedeniyle daha büyük boyutta GO partiküllerinin oluşmasıdır (Patel and Kiani 2019^a; Guo ve Zhang 2016). Oluşan daha büyük boyuttaki partiküller sürtünme temas bölgelerine giremeyecek ve sürtünme önleyici görevlerini yapamayacaklardır. Burada ortaya çıkan bir diğer durumda baz yağ içerisine katılan katkı maddesinin çökmesinin engellenip, homojen bir katkılı yağ karışımı elde etmektir. Bunun nedeni partiküllerin yağlayıcı içerisinde her noktada homojen dağılması ile temas eden yüzeyler arasında daima GO nano partikülünün olmasının sağlanmasıdır (Srivyas ve Charoo 2018; Patel ve diğ. 2019^b). Bunu sağlamak için GO katkılı yağ karışımları ultrasonik karıştırma ile karıştırılıp kararlı bir karışım oluşturulmuş ve ayrıca GO nanopartikülünün çökmesi de engellenmiştir. Bu sürtünme önleyici özelliklerinin yanında sıvı ve gazlara karşı grafen tabakalarının geçirimsiz olması yüzey üzerinde oluşabilecek korozyonu engeller, oksidasyonu yavaşlatır ve aşınmayı en aza indirir (Xiao ve Liu 2017). Ayrıca grafenin bu özelliği ile silindir içerisinde piston ve segman bölgesine girerek yanma sonucu meydana gelen kompresyon kaçaklarını da azaltılabilir (Rasheed ve diğ. 2016).

Genel olarak yağlayıcıların sürtünme katsayısı; hız, kinematik viskozite ve kuvvetin bir fonksiyonudur (Lee ve diğ. 2007). Herhangi bir yağlama maddesinin performansını belirlemede; x eksenine uygulanan hız, viskozite ve yükün bir kombinasyonu olan Sommerfeld numarası ve y eksenine sürtünme katsayısını gösteren Stribeck eğrileri kullanılır (Paul ve diğ. 2019). Ayrıca içten yanmalı motorlarda yağlama; sınır, karma ve hidrodinamik yağlama olmak üzere üç ana rejimde gerçekleşir ve bu yağlama bölgelerinde yağlayıcının performansı stribeck eğrileri ile değerlendirilir (Ali ve diğ. 2019). Deneylerde kullanılan baz yağ ve farklı GO konsantrasyonlarındaki katkılı yağların sürtünme performanslarını göstermek için hız, viskozite ve yük verileri hesaplanarak Şekil 7.20’de gösterilen stribeck eğrisi oluşturulmuştur. Elde edilen grafikte farklı yağlama koşulları farklı renklerle ve yağlama mekanizmasının yüzeylerde nasıl etki ettiği grafiğin üst tarafında yer alan mekanizmalarda gösterilmiştir. Bilindiği gibi içten yanmalı motorlarda segman, yatak gibi bölgelerde meydana gelen sürtünmeler stribeck eğrileri ile açıklanmaktadır (Ali ve diğ. 2019). Şekil 7.20’de yer alan stribeck eğrisi incelendiğinde sınır, karma,

hidrodinamik yağlama bölgeleri olmak üzere tüm yağlama bölgelerinde GO katkılı yağların nano partikül yağlama mekanizmalarını (yuvarlama-yaglama, koruyucu, tamir ve parlatma) ve yapısında yer alan tribolojik özellikleri kullanarak sürtünme katsayısını baz motor yağına göre düşürdüğü ve baz motor yağına göre çok daha iyi bir yağlama yaptığı görülmektedir. Stribeck eğrisi incelendiğinde sınır yağlama bölgesinde başlangıçta 1,5 mg/mL ve 2,0 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip katkılı yağların sahip olduğu sürtünme katsayısı 1,0 mg/mL ve 0,5 mg/mL GO konsantrasyonlarına sahip katkılı yağlara göre daha yüksektir. Bunun nedeni o bölgedeki test koşullarında hızın çok düşük ve yükün fazla olması ile yüksek konsantrasyona sahip katkılı yağların yapısında bulunan GO nano partiküllerinin çökelti oluşturup sürüklenmesinden ve görevlerini yerine getirememesinden dolayıdır (Guo ve Zhang 2016). Eğride yer alan karma ve hidrodinamik yağlama bölgeleri incelendiğinde ise 1,5 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip katkılı yağın baz yağdan ve diğer katkılı yağlardan daha iyi bir sürtünme katsayısı değeri sağladığı görülmüştür. Bunun nedeni yüksek dönme hızının GO nanopartikülünün dağılmasını sağlamasına ve yağlamayı daha iyi hale getirip sürtünme katsayısının düşürülmesine bağlanmıştır.



Şekil 7.20: Yağlama Rejimlerine Göre Ayrılmış Stribeck Eğrisi

Hidrodinamik yağlama bölgesindeki yağlamanın etkinliği tamamen yağlayıcı filmin özelliklerinden etkilenmektedir (Lee ve diğ. 2007). Burada karma yağlama ile birlikte hidrodinamik yağlamada yeterli bir yağlama filmi oluşturmak için yüksek hız ve düşük yük koşullarında 0,5 mg/mL ve 1,0 mg/mL GO konsantrasyonlarının yetersiz malzeme sunarak, sürtünme önleyici özelliğini tam olarak göstermekte yetersiz kalmasına ve sürtünme katsayısının artmasına neden olmuştur (Ramón-Raygoza ve diğ. 2016). Yine hidrodinamik yağlama bölgesine bakıldığında 2,0 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip motor yağının artan konsantrasyonla birlikte katkı maddesinin baz yağ içerisinde dağılımı zayıflamış ve çökelti oluşturarak daha büyük boyutta partiküller meydana gelmesine neden olmuştur (Patel ve Kiani 2019^a). Burada meydana gelen büyük boyutlu partiküller sürtünme temas bölgelerine girememiş ve dibe çökme eğiliminde bulunarak sürtünme önleyici performanslarını gösterememiştir.

Şekil 7.20 incelendiğinde baz yağ ve GO katkılı yağlar farklı yağlama rejimlerinde farklı sürtünme özellikleri göstermiştir. Şekil 2.14’de gösterildiği gibi tüm motor parçalarının çalıştığı bir ortak yağlama rejimi vardır. Bunlar incelendiğinde motor parçalarının genellikle karma yağlama bölgesinde çalıştığı görülmektedir. (Ali ve diğ. 2017). Bu durum göz önüne alındığında karma yağlama bölgesinde ortalama 0,05 μ sürtünme katsayısı ile en iyi sürtünme azaltma performansını gösteren motor yağı 1,5 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip motor yağıdır. Yine stribeck eğrisine göre en düşük sürtünme katsayısı karma yağlama bölgesinde görülmektedir (Lee ve diğ. 2007). Tüm grafik genelinde ve karma yağlama bölgesi özelinde en düşük sürtünme katsayısı değeri 0,0427 μ ile yine 1,5 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip motor yağında elde edilmiştir. Deneyler sonucunda stribeck grafiği üzerinde tüm yağlama bölgeleri incelendiğinde sürtünme azaltma kabiliyeti bakımından optimum konsantrasyonun 1,5 mg/mL GO konsantrasyonu olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca GO katkılı motor yağının baz yağa göre sürtünme katsayısında ortalama %15-20’lik bir iyileşme sağlaması GO’nun mükemmel tribolojik performansını kanıtlar.

7.6 Aşınma Miktarı Sonuçları

Aşınma göreceli hareket nedeniyle yüzeye temas eden malzeme arasındaki aşamalı malzeme kaybı, yüzeye verilen hasar ya da yüzeydeki hacim kaybı olarak adlandırılır. Sürtünme ve aşınma birbiri ile yakından ilişkilidir fakat farklı durumlardır. Sürtünme ile ortaya çıkan enerji ısı ve aşınma üretir. Aşınma mekanizmaları sürtünmeden kaynaklanan kesme kuvvetinden ve sürtünmeyle ortaya çıkan sıcaklık artışından etkilenirken aynı zamanda sürtünmede aşınma davranışlarından ve aşınmanın neden olduğu yüzey değişikliklerinden etkilenmektedir. Bununla birlikte zaman ve kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısındaki değişiklikler genellikle aşınma davranışındaki değişikliklerle ilişkilendirilir (Bermüdez ve Jimies 2011). Buradan yola çıkarak bir önceki konuda bahsedilen ve sürtünmeyi etkileyen her bir durumun sürtünme davranışını da doğrudan veya dolaylı olarak etkileyebileceği sonucuna ulaşılabilmektedir.

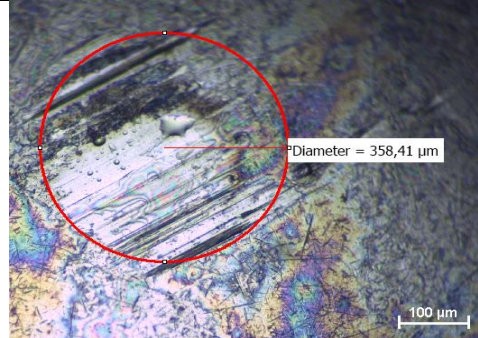
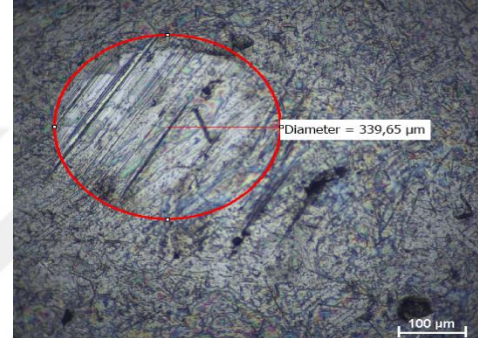
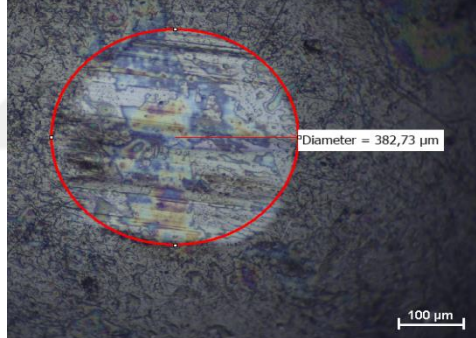
Bir yağlayıcının tribolojik performansının değerlendirilmesinde sürtünmenin yanında aşınma davranışı da önemli bir rol oynayan başka parametredir. Yağlayıcının aşınma davranışı çoğu durumda disk üstü bilye yöntemi kullanılarak bilye üzerinde elde edilen aşınma çapına yağlayıcının yapmış olduğu aşınma önleyici etkinin değerlendirilmesiyle yapılmakta olup bu çalışmada da aşınma deneyleri disk üstü bilye mekanizması ile yapılmıştır (Paul ve diğ. 2019; Guo and Zhang 2016). GO katkılı yağların baz yağa göre aşınma önleme performanslarını değerlendirmek için farklı yağlama rejimlerinde, farklı temas yükü ve farklı devirlerde disk üstü bilye yöntemi kullanılarak aşınma testleri yapılmıştır. Aşındırılan bilyeler optik mikroskopta incelenmiştir. Aşınmış bilyelere ait aşınma çapları Tablo 7.3'te verilmiştir. Buna ilave olarak baz yağ ve en düşük sürtünme katsayısını sağlayan 1,5 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip katkılı motor yağı etkisinde çalışmış aşınma bilyelerine ait aşınma görüntüleri sırasıyla sınır, karma ve hidrodinamik yağlama bölgelerine göre Tablo 7.4, 7.5 ve 7.6'da gösterilmiştir. Ayrıca nanopartiküllerin tribolojik performanslarının ve aşınma yüzey morfolojilerinin incelenmesinde araştırmacıların çoğu optik mikroskobu, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılım spektrometresi (EDS) ve elektron dağıtıcı spektrometre kullanmıştır (Paul ve diğ. 2019). Bu çalışmada da belirtilen cihazlar ve yöntemler kullanılarak aynı standartlarda deneyler değerlendirilip, karşılaştırılabilmiştir.

Tablo 7.3: Stribeck Eğrisi X değerine Göre Farklı Yağlayıcılarda Çalışan Bilyelere Ait Aşınma Çapları (μm)

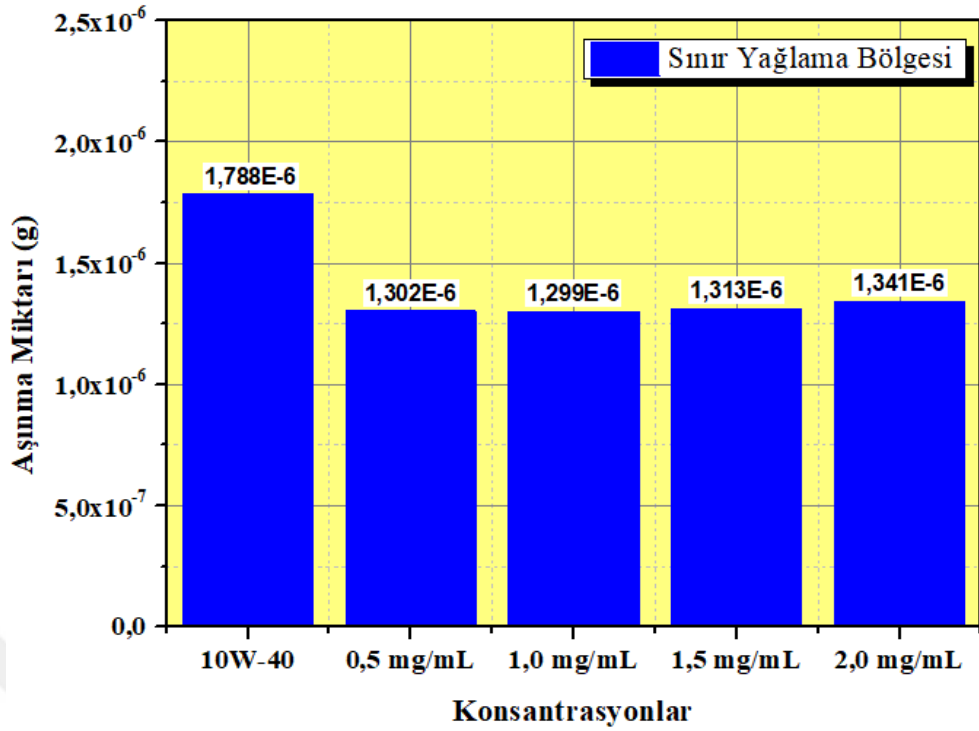
Stribeck Eğrisi X Değeri	10W-40	0,5 mg/mL GO	1,0 mg/mL GO	1,5 mg/mL GO	2,0 mg/mL GO
0,1	379,28	358,98	346,38	358,41	360,08
0,4	345,28	336,02	332,57	339,65	331,76
0,9	382,73	328,79	345,85	327,95	339,99
1,3	378,92	323,94	322,01	285,54	302,12
1,7	336,86	300,38	297,01	278,26	309,30
2,1	307,17	281,66	274,02	263,38	257,12
2,5	327,51	306,03	264,61	264,30	297,11
3	334,13	312,22	324,34	269,64	291,43
3,5	308,27	288,06	308,26	252,11	268,87
4	240,74	224,96	225,84	196,88	209,97
4,5	263,00	260,71	229,86	215,08	229,38
5	249,17	244,03	229,08	234,84	214,70
5,5	248,40	246,24	237,20	236,97	295,72

Tablo 7.4'te baz yağ ve 1,5 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip katkılı yağın sınır yağlama bölgesinde sürtünme etkisine maruz bırakılan bilyelerin aşınma yüzeylerinden alınmış 100 kat büyütmede görüntüleri ve aşınma çapları gösterilmiştir. Bu yağlama rejimi etkisinde çalışan bilyelerin aşınma çapları diğer yağlama rejimlerine göre genellikle daha yüksektir. Bunun nedeni düşük hız ve yüksek yükler altında çalışan aşınma yüzeylerindeki temas basıncının çok büyük olmasıdır (Ali ve diğ. 2019). Baz yağ ve 1,5 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip katkılı yağdaki aşınmış bilye çapları incelendiğinde GO katkılı motor yağında çalışmış bilyelerin aşınma çapları baz yağda çalışmış bilyelere göre daha düşüktür. Bunun temel nedeni temas yüzeyleri arasında kendiliğinden bir tribofilm yağlayıcı tabaka ile kayma ve yuvarlanma etkisi oluşturan GO katkılı kayganlaştırıcıdır (Ali ve diğ. 2019). Diğer bir neden ise grafenin çok küçük boyutu ve 2 boyutlu lamine yapısı ile temas bölgeleri arasına kolayca girmesi ve yüzeyde aşınmaya karşı koruyucu bir tabaka gibi görev yapmasıdır (Rasheed ve diğ. 2016). Ayrıca sınır yağlama bölgesinde temas yüzeylerinde yükün artması ile meydana gelen sürtünmeler yüzey sıcaklığının artmasına ve yüzey sıcaklığının artması da GO nanopartiküllerinin ısıl aktivasyonuna yol açar (Ali ve diğ. 2018^a). Bu durum aynı zamanda tribosinterizasyon olarak da bilinmektedir. Böylece kendi kendini yağlama özelliğine sahip GO katmanları aşınmış yüzeyle güçlü bir şekilde birleşerek yüzeyi koruyan mükemmel özelliklere sahip yağlayıcı sınır film katmanı oluşturur (Raygoza ve diğ. 2016).

Tablo 7.4: Sınır Yağlama Bölgesinde Çalışmış Bilyelerin Aşınma Çapları

	Sınır Yağlama Bölgesi	
	10W-40	10W-40 + 1,5 mg/mL GO
60 N-10 d/dk $\lambda = 0,1$		
60 N-42 d/dk $\lambda = 0,4$		
60 N-110 d/dk $\lambda = 0,9$		

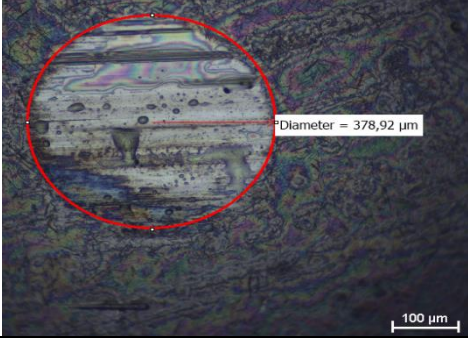
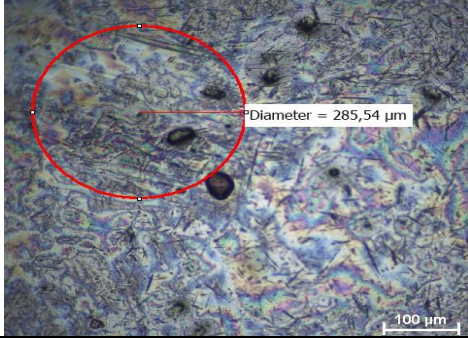
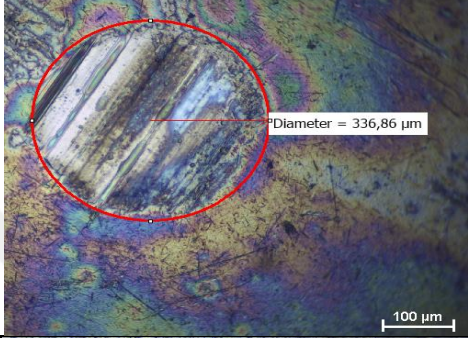
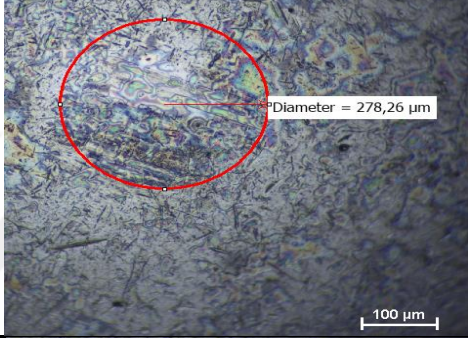
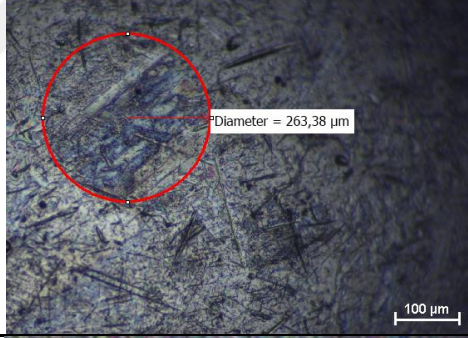
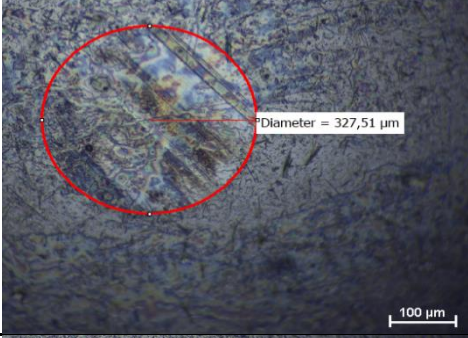
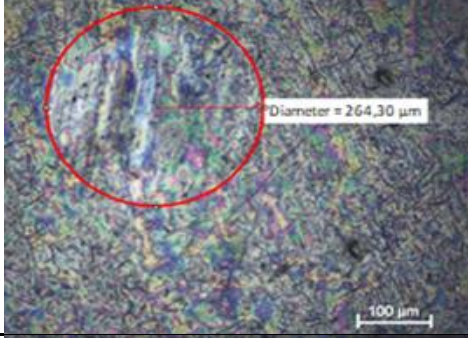
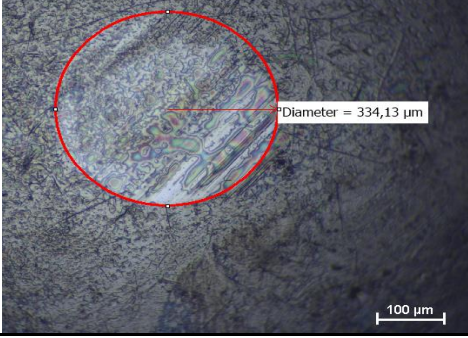
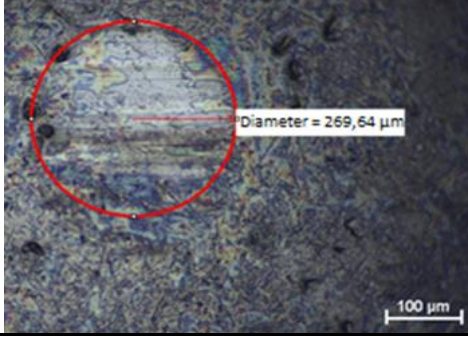
Şekil 7.21’de baz yağ ve GO katkılı yağların sınır yağlama rejimi etkisinde çalışan bilyelerin ortalama aşınma miktarları gösterilmiştir. GO katkılı yağlarla çalışan bilyelerdeki aşınmalar baz yağa göre oldukça düşüktür ve farklı GO konsantrasyonlara sahip yağlayıcılar sınır yağlama bölgesinde yaklaşık olarak aynı aşınma performansını göstermişlerdir. Bu bölgedeki en düşük aşınma miktarı $1,299 \times 10^{-6} g$ aşınma ile 1,0 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip katkılı yağda sağlanmıştır.



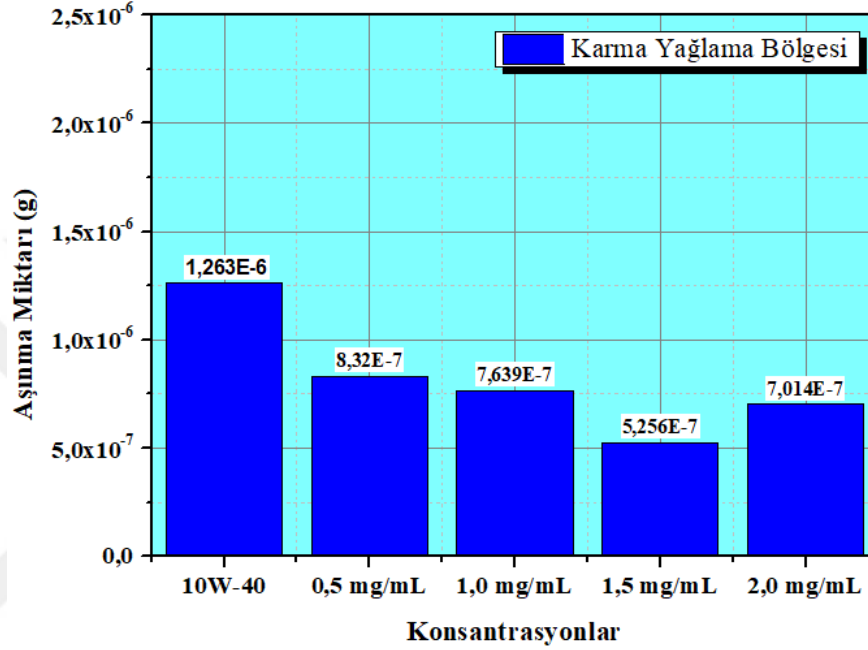
Şekil 7.21: Sınır Yağlama Bölgesinde Çalışan Bilyelerdeki Aşınma Miktarları

Tablo 7.5'te baz yağ ve 1,5 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip katkılı yağın karma yağlama bölgesinde sürtünme etkisine maruz bırakılan bilyelerin aşınma yüzeylerinden alınmış 100 kat büyütmede görüntüleri ve aşınma çapları gösterilmiştir. Karma yağlama bölgesinde artan hızla ve azalan temas yüküyle birlikte temas yüzeylerinin birbirinden uzaklaşması ve temas yüzeylerinin arasında bulunan yağ filmi kalınlığının artması ile yağlamanın daha iyi hale gelmesinden dolayı hem baz yağ hem de GO katkılı yağ etkisinde çalışan bilyelerin aşınma çaplarında bir azalmanın olduğu görülmektedir. Ayrıca karma yağlama bölgesinde baz yağa göre GO katkılı motor yağının daha iyi aşınma performansı göstermesinin nedeni ise GO nanopartikülünün eklenmiş oldukları yağlayıcıda boyutları ve tribolojik özellikleriyle; yuvarlanma etkisine, koruyucu film etkisine ve boşlukları doldurup sağladığı tamir etkisine bağlanmıştır (Ali ve Xianjun 2015).

Tablo 7.5: Karma Yağlama Bölgesinde Çalışmış Bilyelerin Aşınma Çapları

	Karma Yağlama Bölgesi	
	10W-40	10W-40 + 1,5 mg/mL GO
60 N-110 d/dk $\lambda = 1,3$		
40 N-95 d/dk $\lambda = 1,7$		
40 N-117 d/dk $\lambda = 2,1$		
40 N-140 d/dk $\lambda = 2,5$		
40 N-167,5 d/dk $\lambda = 3,0$		

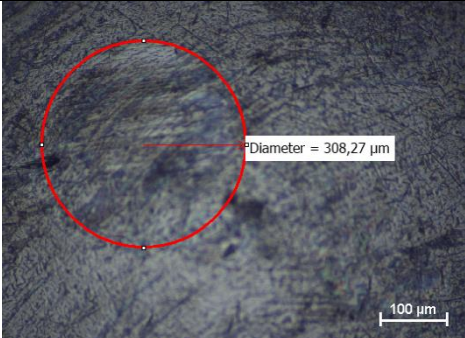
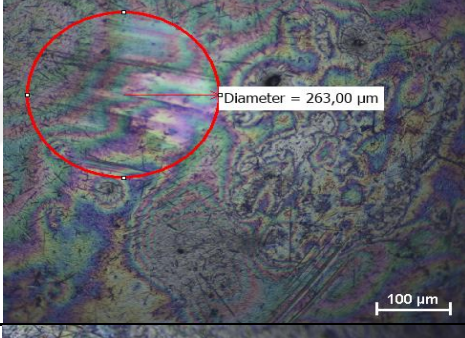
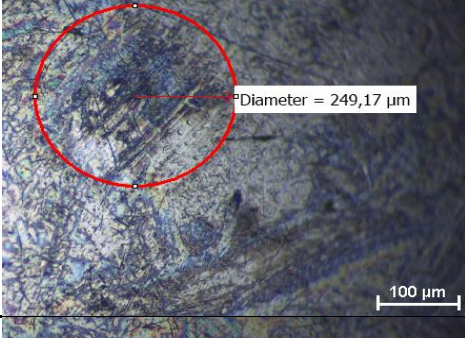
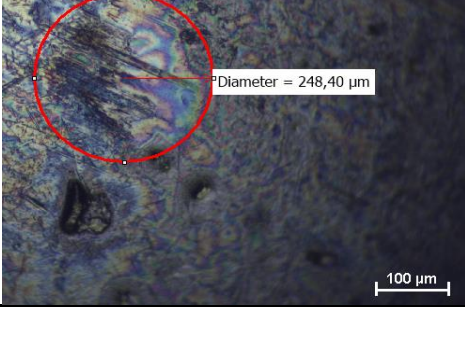
Şekil 7.22’de baz yağ ve GO katkılı yağların karma yağlama rejimi etkisinde çalışan bilyelerin ortalama aşınma miktarları gösterilmiştir. GO katkılı yağlarla çalışan bilyelerdeki aşınmalar baz yağa göre oldukça düşüktür ve katkılı yağlar baz yağa göre daha yüksek aşınma performansı göstermişlerdir. Bu bölgedeki en düşük aşınma miktarı $5,256 \times 10^{-7} g$ aşınma ile $1,5 mg/mL$ GO konsantrasyonuna sahip katkılı yağda sağlanmıştır.



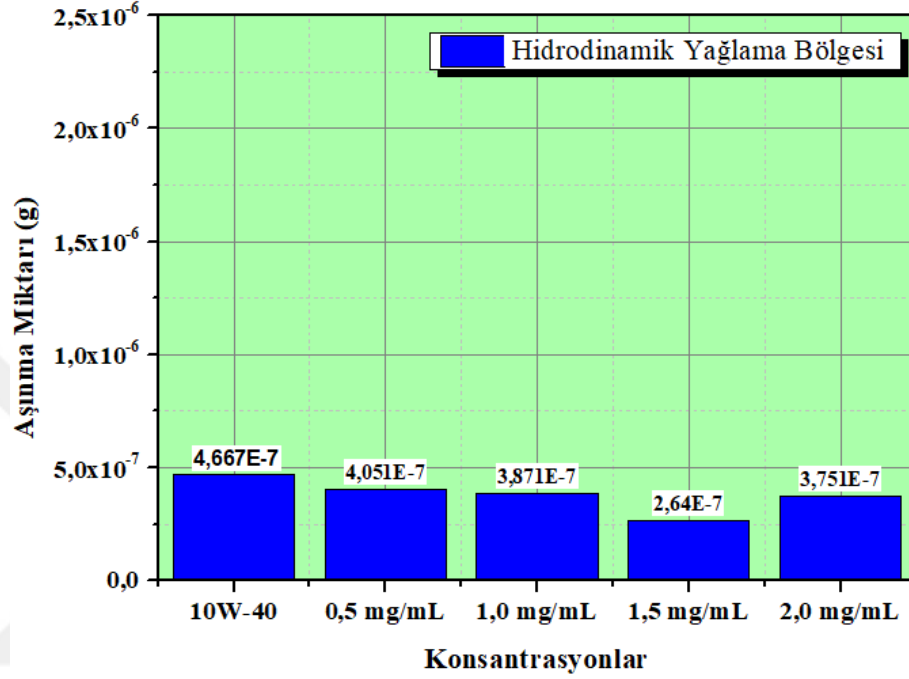
Şekil 7.22: Karma Yağlama Bölgesinde Çalışan Bilyelerdeki Aşınma Miktarları

Tablo 7.6’da baz yağ ve $1,5 mg/mL$ GO konsantrasyonuna sahip katkılı yağın hidrodinamik yağlama bölgesinde sürtünme etkisine maruz bırakılan bilyelerin aşınma yüzeylerinden alınmış 100 kat büyütmede görüntüleri ve aşınma çapları gösterilmiştir. Bu yağlama rejimi etkisinde çalışan bilyelerin aşınma çapları diğer yağlama rejimlerine göre genellikle daha düşüktür. Bunun nedeni bu bölgedeki aşınma yüzeylerinin yüksek hızlarıyla birlikte azalan temas yükünden dolayı temas yüzeylerinin birbirinden uzaklaştırılarak aşınmanın azaltılmasına bağlanmıştır (Ali ve diğ. 2017). Ayrıca baz yağ ve $1,5 mg/mL$ GO konsantrasyonuna sahip katkılı yağdaki aşınmış bilye çapları incelendiğinde GO nano katkılı motor yağında çalışmış bilyelerin aşınma çapları baz yağda çalışmış bilyelere göre daha düşüktür. Bunun nedeni temas yüzeylerindeki yüksek kayma hızından dolayı nanopartiküllerin termal aktivasyonuna neden olup yüzeyde toplanmış nanopartiküllerin yağlama tabakası oluşturmaya yardımcı olmasıdır (Ali ve diğ. 2017). Oluşan yağ tabakası ile yüzeylerin teması önlenmiş, yüzeydeki düzensizliklerin deforme olması engellenip, aşınma azaltılmıştır.

Tablo 7.6: Hidrodinamik Yağlama Bölgesinde Çalışmış Bilyelerin Aşınma Çapları

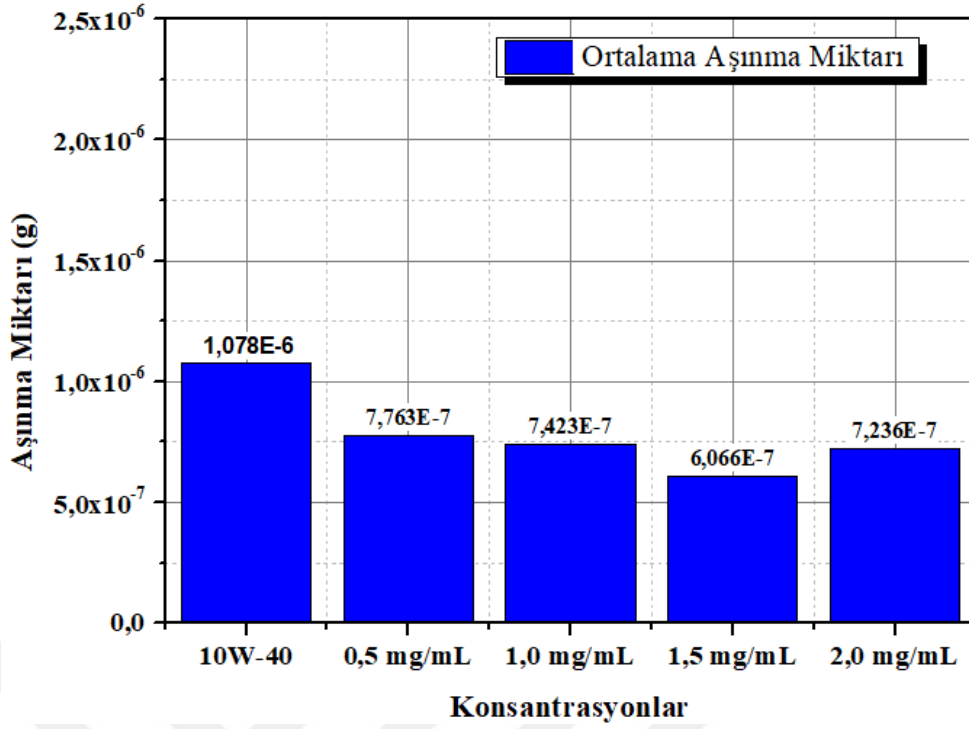
	Hidrodinamik Yağlama Bölgesi	
	10W-40	10W-40 + 1,5 mg/mL GO
20 N-97,5 d/dk $\lambda = 3,5$		
20 N-112 d/dk $\lambda = 4,0$		
20 N-125 d/dk $\lambda = 4,5$		
20 N-140 d/dk $\lambda = 5,0$		
20N-150d/dk $\lambda = 5,5$		

Şekil 7.23'te baz yağ ve GO katkılı yağların hidrodinamik yağlama rejimi etkisinde çalışan bilyelerin ortalama aşınma miktarları gösterilmiştir. GO katkılı yağlarla çalışan tüm bilyelerdeki aşınmalar baz yağa göre düşüktür. Bu bölgedeki en düşük aşınma miktarı 2.64×10^{-7} g aşınma ile 1,5 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip katkılı yağda sağlanmıştır.



Şekil 7.23: Hidrodinamik Yağlama Bölgesinde Çalışan Bilyelerdeki Aşınma Miktarları

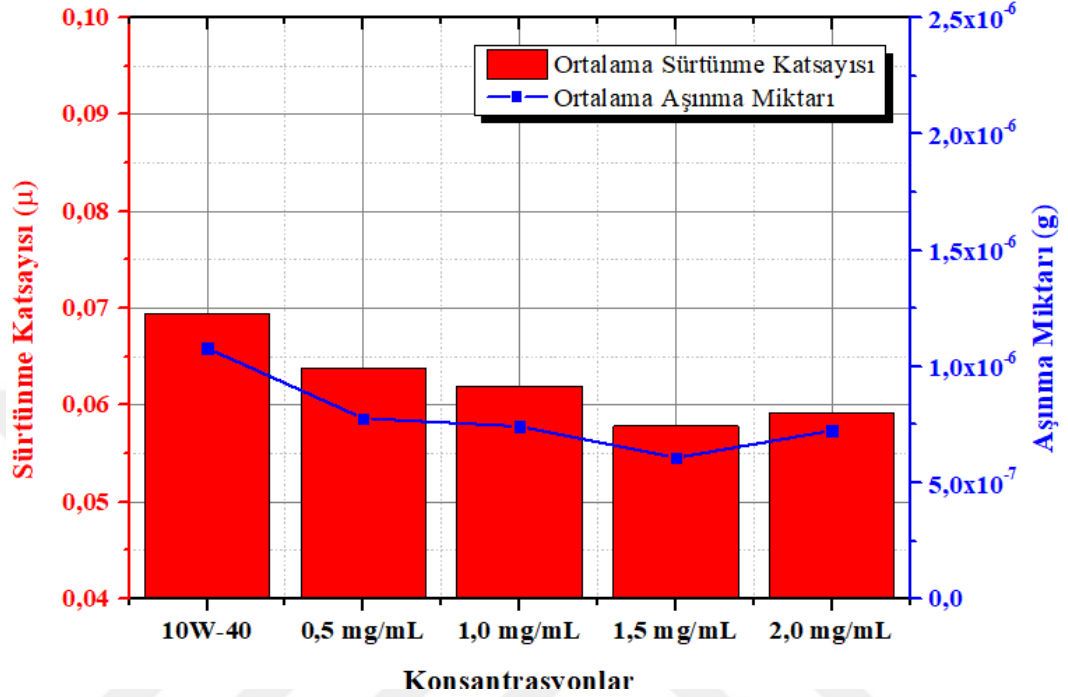
Şekil 7.24'te yer alan grafikte sınır, karma ve hidrodinamik yağlama rejimlerinde tüm yağlayıcıların ortalama aşınma miktarına etkisi gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde GO katkılı yağlara göre baz yağda çalışan bilyelerin aşınma miktarının daha fazla olduğu yani baz yağın aşındırıcı etkisinin GO katkılı yağlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Tüm yağlama rejimleri incelendiğinde aşınmanın azaltılmasında temel etkinin GO yapısının tribolojik açıdan yüksek performansa sahip olmasına dayandırılmıştır (Senatore ve diğ. 2013). Bununla birlikte bir nanopartikül olarak GO'nun kayan yüzeyler arasına girebilmesi, bir tribofilm oluşturabilmesi, temas yüzeylerindeki çukurları ve boşlukları doldurabilmesi de aşınma performansını daha yüksek seviyelere çıkarmıştır (Xiao and Liu 2017). Ayrıca GO'nun yüzeyi kaplayarak temas yüzeyinin diğer aktif elementlerle kimyasal tepkime oluşturmamasını engelleyip, korozyon ve oksidasyon olaylarını da yavaşlatarak aşınmayı azaltmaktadır (Berman ve diğ. 2014; Xiao ve Liu 2017).



Şekil 7.24: Tüm Yağlama Rejimlerindeki Ortalama Aşınma Miktarı

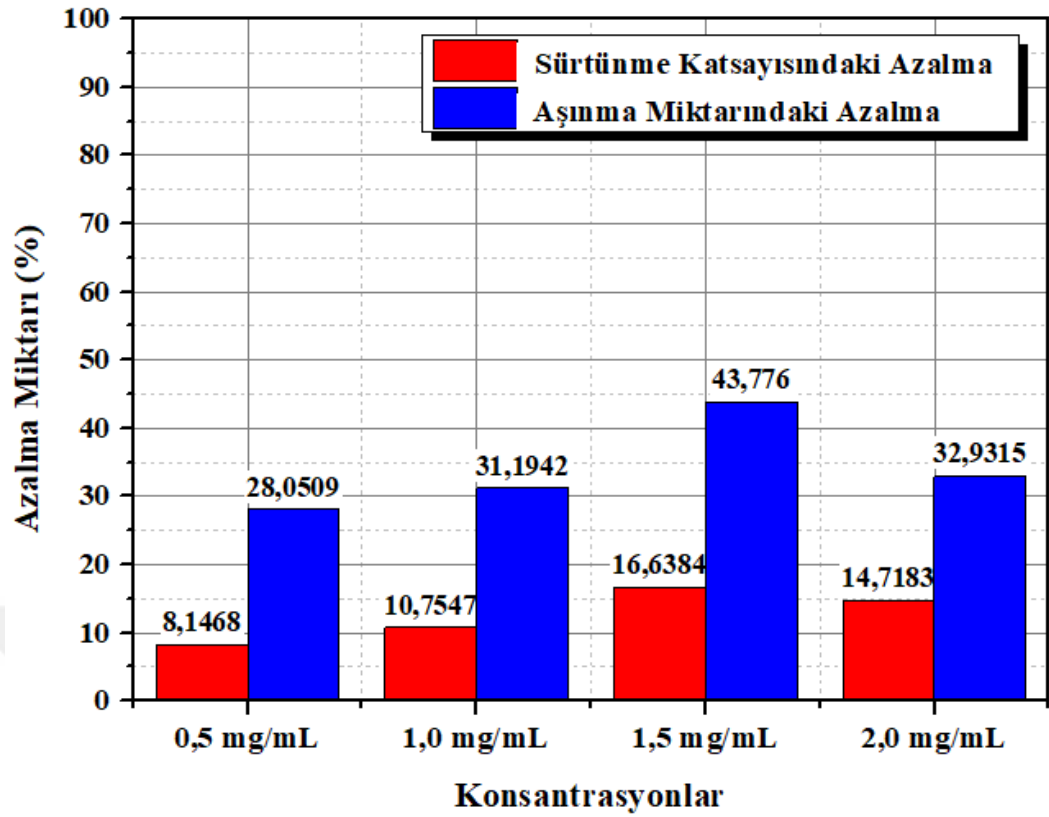
Şekil 7.24'te baz yağ ve farklı GO konsantrasyonlarına sahip katkılı yağların tüm yağlama rejimlerindeki ortalama sürtünme katsayıları ve aşınma miktarları konsantrasyonlara göre yağlayıcı performansını karşılaştırmak için gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde artan konsantrasyon ile birlikte ortalama sürtünme katsayısının ve ortalama aşınma miktarının 1,5 mg/mL oranına kadar azaldığı ve bu noktadan sonra artışa geçtiği görülmüştür. Bu durum sürtünme ve aşınma üzerinde baz motor yağı içerisindeki GO'nun konsantrasyonunun önemli bir etken olduğunu göstermektedir. Başlangıçta düşük konsantrasyonda yağlayıcı temas yüzeyi üzerinde koruyucu bir tabaka oluşturan nano GO katkısı, aşınma ve sürtünme önleyici performansını öne çıkarır. Bununla birlikte, belli bir noktaya kadar artan konsantrasyon ile sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı azalır. Fakat, baz motor yağı içerisindeki GO katkısının artması ile optimum konsantrasyon aşıldıktan sonra nanopartiküller birikinti oluşturur ve bir katı gibi davranarak yağ filminin kesintili olmasına ve katkı maddesinin temas yüzeyleri arasında bir katı gibi davranmasına neden olur. Böylece katkılı yağın aşınma önleyici özelliği hızla bozularak sürtünme sıvı sürtünme durumundan kuru sürtünme durumuna geçer (Guo ve Zhang 2016; Zhang ve diğ. 2011). Ayrıca grafik incelendiğinde, sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı, 'U' şeklinde başlangıçta azalan, optimum konsantrasyondan sonra artan bir sürtünme ve aşınma grafiği oluşturduğu görülmektedir (Zhang ve diğ. 2011). Böylece, sürtünme ve aşınmanın birbiri ile ilişkili

olduğu deneylerle tekrar gösterilmiştir (Bermúdez ve Jimies 2011). En etkili aşınma önleyici performansı 1,5 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip katkılı motor yağının sağlandığı Şekil 7.25'te görülmektedir.



Şekil 7.25: Baz Yağ ve farklı GO Konsantrasyonlarına Sahip Katkılı Yağların Ortalama Sürtünme Katsayıları ve Aşınma Miktarları

Şekil 7.26'da baz yağa göre GO katkılı yağlardaki sürtünme katsayısındaki ve aşınma miktarındaki ortalama azalmalar yüzdesel olarak gösterilmiştir. Motor yağı katkısı olarak 1,5 mg/mL GO konsantrasyonunun baz yağa göre sürtünme katsayısını ortalama %17 seviyelerinde ve aşınma miktarını da ortalama %44 seviyelerinde azaltarak yüksek bir tribolojik performans sağladığı görülmektedir. Ayrıca çalışma boyunca 1,5 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip katkılı motor yağında görülen en düşük aşınma çapı 196,88 μm ve en düşük sürtünme katsayısı da 0,0427 μ olmuştur.



Şekil 7.26: Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Miktarındaki Yüzdesel Azalmalar

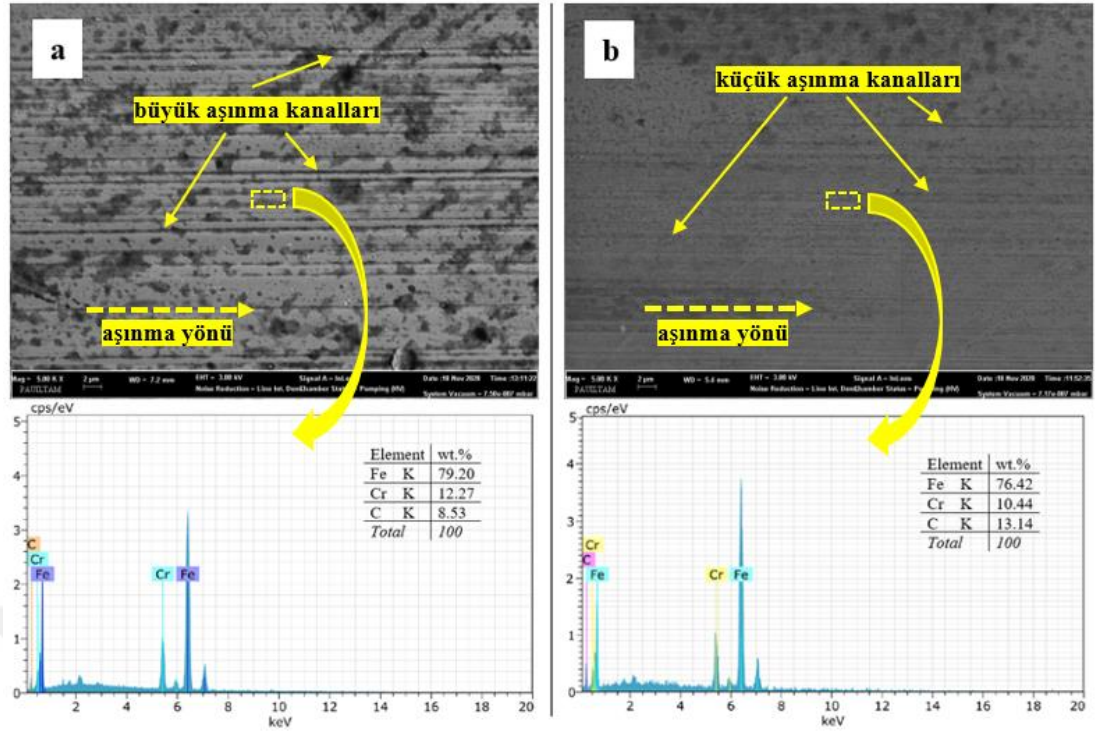
Aşınma grafikleri incelendiğinde aşınma miktarındaki ve sürtünme katsayısındaki azalma GO'nun bir motor yağı katkısı olarak performansını oldukça umut verici olduğunu göstermiştir. Bu iyileşmelerin temeli, GO yapısının mükemmel tribolojik özellikleri ve nano boyutuyla ilişkilendirilmiştir.

7.7 Yüzey Analiz Sonuçları

Nanopartiküllerin aşınma yüzeyindeki tribolojik performanslarını değerlendirmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektrometreleri (EDS) yaygın olarak kullanılmaktadır (Paul ve diğ. 2019). Şekil 7.27'de baz motor yağında ve 1,5 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip katkılı motor yağında sınır yağlama rejimindeki aşınma testlerinde kullanılan bilyelere ait detaylı yüzey görüntüleri yer almaktadır. Şekil 7.27 a'da gösterilen baz motor yağı etkisinde çalışan bilyenin aşınma görüntüsü incelendiğinde, yüzeyde kayma yönünde birçok geniş ve derin aşınma kanallarının varlığı net bir şekilde görülmektedir. Şekil 7.27 b'de gösterilen 1,5 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip katkılı motor yağı etkisinde

alışan bilyenin aşınma görüntüsü incelendiğinde, yüzeyde neredeyse çiziklerin ve deformasyon izlerinin olmadığı, aşınma kanallarının büyük ölçüde ortadan kalkarak baz yağ etkisinde çalışan bilyeye göre daha pürüzsüz bir yüzeye sahip olduğu görülebilmektedir. Bunun nedeni, GO katkılı motor yağında yer alan GO nanopartikülünün kesintisiz bir koruyucu ve yağlayıcı film oluşturmasına müsaade eden ince lamine ve nano boyutlu yapısıdır (Lin ve diğ. 2011). Küçük boyutu ve lamine yapısı sayesinde GO nanopartikülleri metal sürtünme yüzeylerine kolayca girebilmesiyle sürtünme yüzeylerini birbirinden ayırır ve sürtünme yüzeylerini üçüncü bir ara yağlayıcı tabaka ile etkileşime geçirerek yüzeylerin birbirine doğrudan temasını engelleyip, aşınma önleyici özellik gösterirler (Yang ve diğ. 2017). Ayrıca GO nanopartiküllü yüzey düzensizlikleri arasındaki boşluklara dolarak daha pürüzsüz bir yüzey sağlamaıyla metal yüzeyler arasında doğrudan teması önleyen ve meydana getirdiği yağlayıcı film tabakası ile yüzeyi koruyan yapısı sayesinde tribolojik olarak üstün performans göstermektedir (Omrani ve diğ. 2019).

Yağlayıcı film tabakaları yalnızca metal temas yüzeylerini birbirinden ayırmakla kalmaz aynı zamanda yüzeye gelen yükleri de taşırlar (Guo and Zhang 2016). Burada GO katkılı motor yağı oluşturduğu film tabakası ile yüzey temas alanını arttırarak metal temas yüzeylerinde yer alan zayıf çıkıntıların aşınmasını engeller ve bilyeli yatağa benzer çalışma mekanizması ile yüzeydeki temas basınıını düşürerek yüzeyin baz motor yağının etkisinde çalışan yüzeye göre yük taşıma kapasitesini artırıp, aşınmayı azaltır (Yang ve diğ. 2017; Patel ve diğ. 2019^b). Ayrıca baz yağa ilave edilen GO nanopartikülünün aşınma yüzeyinde aşınma ile oluşan izlere dolarak hem yüzeyde oluşan aşınma izlerin kapatarak yüzeyin tamir edilmesine hem de daha parlak bir yüzeyin oluşmasına neden olmaktadır (Ali ve Xianjun 2015; Senatore et al. 2013). SEM çalışmasında sınır yağlama rejiminde yani düşük hız ve yüksek yük koşullarında (60 N-42 d/dk) alışan bilyelerin seçilmesinin nedeni yüksek sürtünme ve aşınmaların görüldüğu sınır yağlama rejimlerinde GO katkılı motor yağının sürtünme ve aşınma azaltma mekanizmasını kanıtlamaktır (Patel ve diğ. 2019^b). şekil 7.27’de verilen grafikte kanıtlanan GO nanopartikülünün üstün tribolojik özellikleri aynı zamanda şekil 7.21’de verilen sınır yağlama bölgesindeki aşınma miktarı sonuçlarıyla da desteklenmektedir.



Şekil 7.27: Aşınma Çapında Yüzey Morfoloji Analizi (SEM) ve Yüzey Element Analizi (EDS).
a: Baz Yağda Çalışmış Bilye. b: 1,5 mg/mL GO katkılı Yağda Çalışmış Bilye

Ayrıca Şekil 7.27’de yer alan EDS analizi incelendiğinde baz motor yağı etkisinde çalışan numunenin aşınma yüzeyindeki karbon elementi hacimce %8,53 iken GO katkılı motor yağında çalışmış numunenin aşınma yüzeyinde karbon elementi hacimce %13,14 seviyelerindedir. GO katkılı motor yağında çalışan bilyenin aşınma yüzeyinde karbon miktarının artmasının nedeni grafenin yapısında yer alan karbon elementidir (Guo and Zhang 2016). Grafen nanopartiküllerinin aşınma yüzeyinde birikimi GO’nun yüzeyde bir tribo film oluşturduğunu kanıtlar ve böylece metallerin doğrudan birbirine teması önleneyen grafenin, üstün tribolojik özellikleriyle aşınma azalttığı doğrulanmış olur (Patel ve diğ. 2019^b). Bu sonuç grafen nanopartikülünün tribolojik temaslara etki etmede önemli bir rol oynadığını göstermiştir. (Omrani, Menezes, and Rohatgi 2019). Böylece yüzeyde grafen maddesinin varlığı ile grafenin daha önce bahsedilen tamir mekanizması, bilyeli yatak mekanizması, yağlayıcı film oluşturma mekanizması, yüzey parlatma ve pürüzsüzleştirme mekanizmalarını sağladığı ve böylece yağlama sistemlerinde tribolojik performansı arttırmaya katkıda bulunduğu kanıtlanmıştır (Paul ve diğ. 2019).

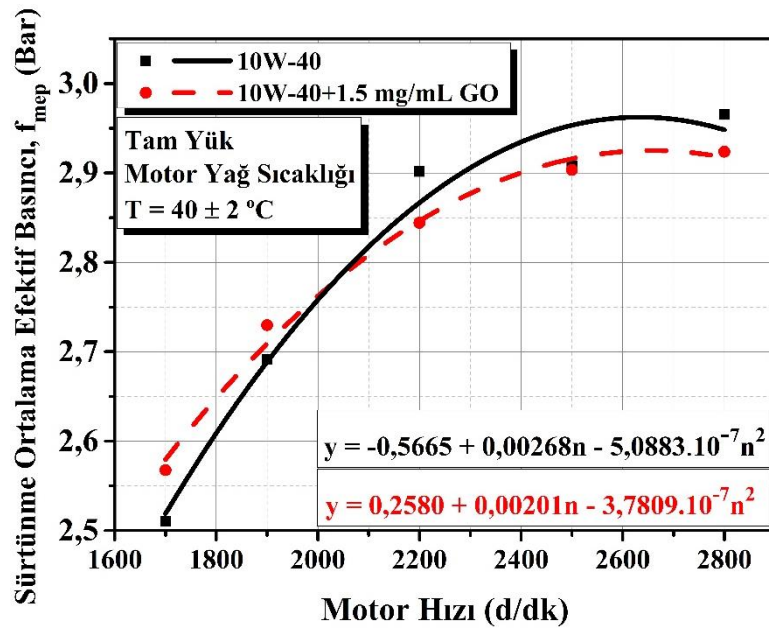
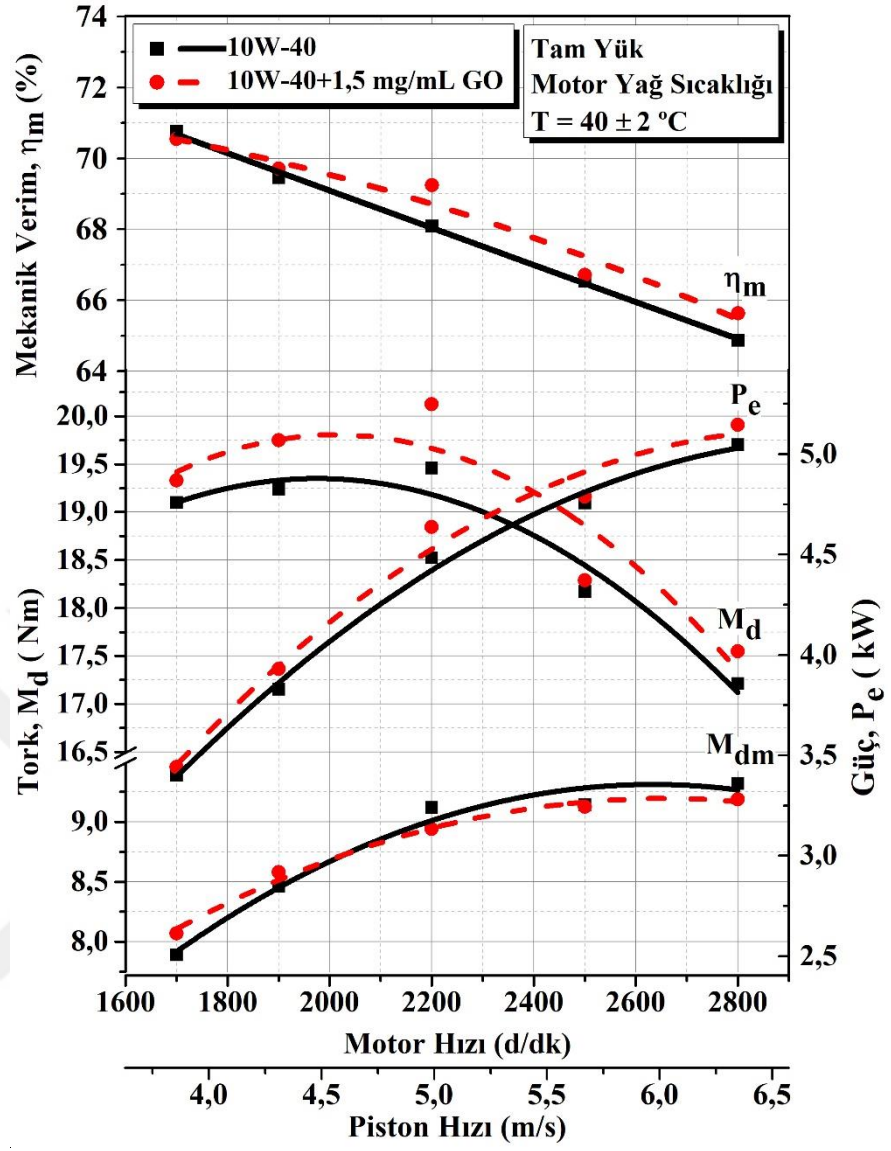
7.8 Motor Test Sonuçları

Antor 6 LD 400 marka, tek silindirli ve 7,5 BG güce sahip dizel motorda 10W-40 tam sentetik baz motor yağı ile yağlayıcı içerisinde optimum konsantrasyon olarak belirlenen katkı oranıyla hazırlanan 10W-40 + 1,5 mg/mL GO katkılı motor yağı farklı motor devirlerinde (1700-1900-2200-2500-2800 d/dk) ve farklı karter yağ sıcaklıklarında (40-50-60-70-80-90-100 °C) test edilmiştir. Yanmalı motorda farklı devir ve karter yağ sıcaklıklarında yapılan testler ile motor torku elde edilmiş ardından motor stop edilerek dinamometre tarafından (yanmasız motor-motored test) tahrik edilmiştir. Bu şekilde tahrik edilerek yanmalı motorla aynı çalışma şartlarında testler tekrarlanmış ve motor parçaları arasında sürtünmeye harcanan tork değerleri bulunmuştur. Bu değerler ile gerekli hesaplamalar yapılarak elde edilen veriler aşağıdaki grafiklerde karşılaştırılarak gösterilmiştir.

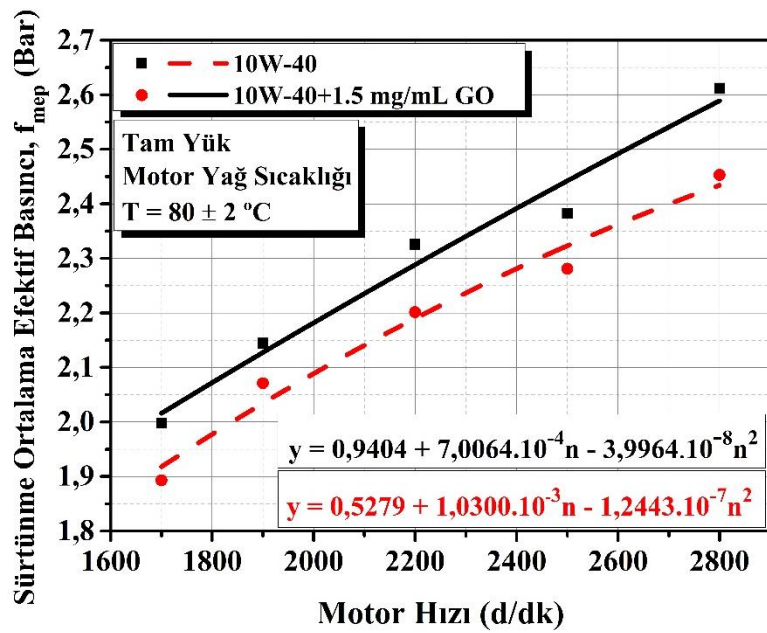
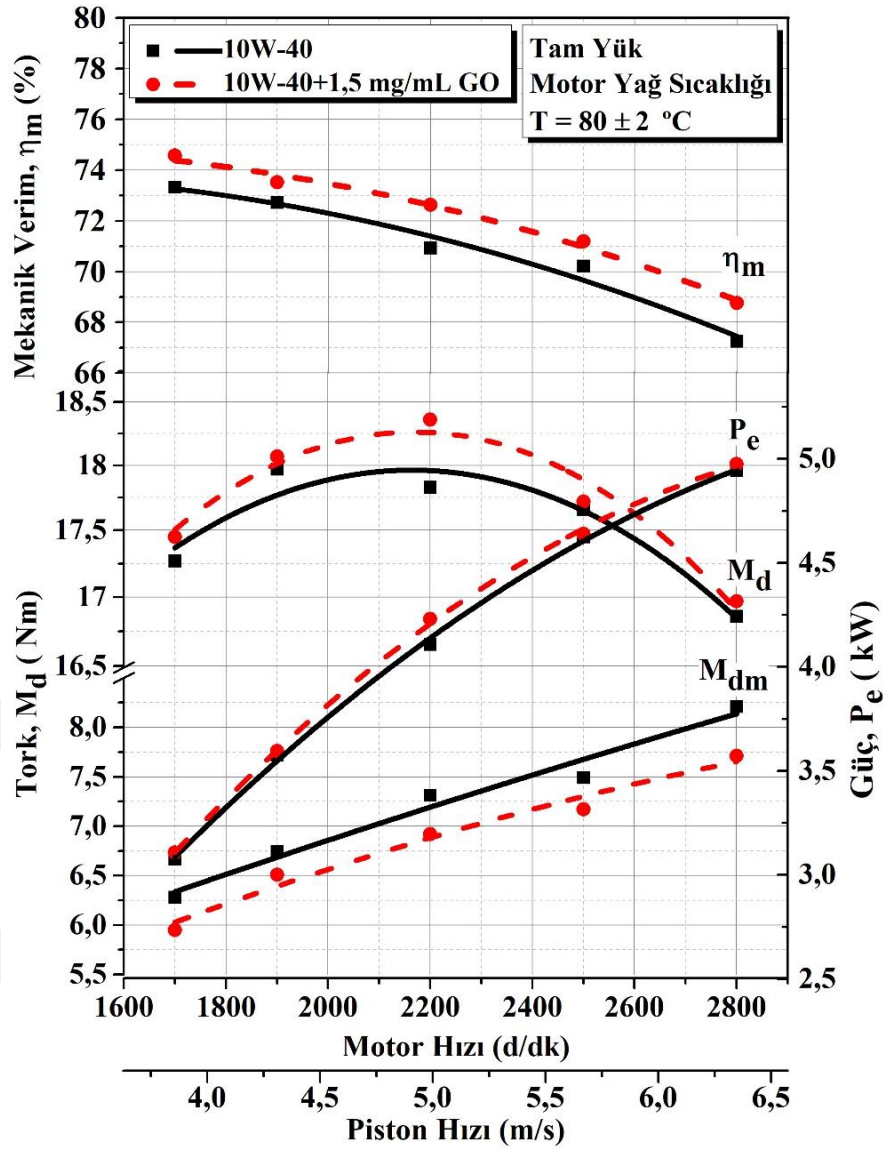
Şekil 7.28-29 ve 30'da sabit karter yağ sıcaklıklarında (40-80-100 °C) ve farklı motor devirlerinde motor torku (M_d), motor gücü (P_e), motored tork (M_{dm}) ve mekanik verim (η_e) eğrileri baz yağ ve GO katkılı yağ için karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Ayrıca her sıcaklık için şekillerin sağ tarafında, motored testleriyle motorun farklı devirlerdeki sürtünme ortalama etkili basınçları (f_{mep}) ve Denklem 6.18'de gösterilen eşitlikteki sürtünme ortalama efektif basınç ile devir arasındaki bağıntıyı gösteren ampirik ifade grafiklerde yer almaktadır.

Motor torku; volümetrik verim, yakıtın ısı değeri ve yakıt-hava oranının bir fonksiyonudur. Devirdeki artışla beraber tork başlangıçta artar iken devrin artmaya devam etmesiyle emme zamanı için gerekli sürenin kısılması ve silindir hacminin tam olarak doldurulmamasından dolayı motorun volümetrik veriminin azalmasıyla motor torku düşme eğilimi gösterir. Burada motor torkunun düşme eğilimi göstermesindeki bir diğer etken ise artan devirle birlikte gerekli dolgunun tam olarak alınamamasıyla birlikte sürtünme kayıplarının yani negatif torkun (M_{dm}) motor hızının bir fonksiyonu olarak artmasıdır (Ali ve diğ. 2018^a). Şekil 7.28-29 ve 30 incelendiğinde baz motor yağı ve GO katkılı motor yağının etkisi altında çalışan motorun devrinin artmasıyla M_{dm} değerinin de artış eğilimi olduğu görülmektedir. Devrin artmasıyla birlikte M_{dm} 'nin artmasının nedeni yüksek hızda motor parçaları arasında hidrodinamik yağlamanın etkin olmasından dolayıdır. Hidrodinamik yağlamada temel etken viskozitedir (Ali ve diğ. 2019). Hidrodinamik yağlama bölgesinde yağ filminin

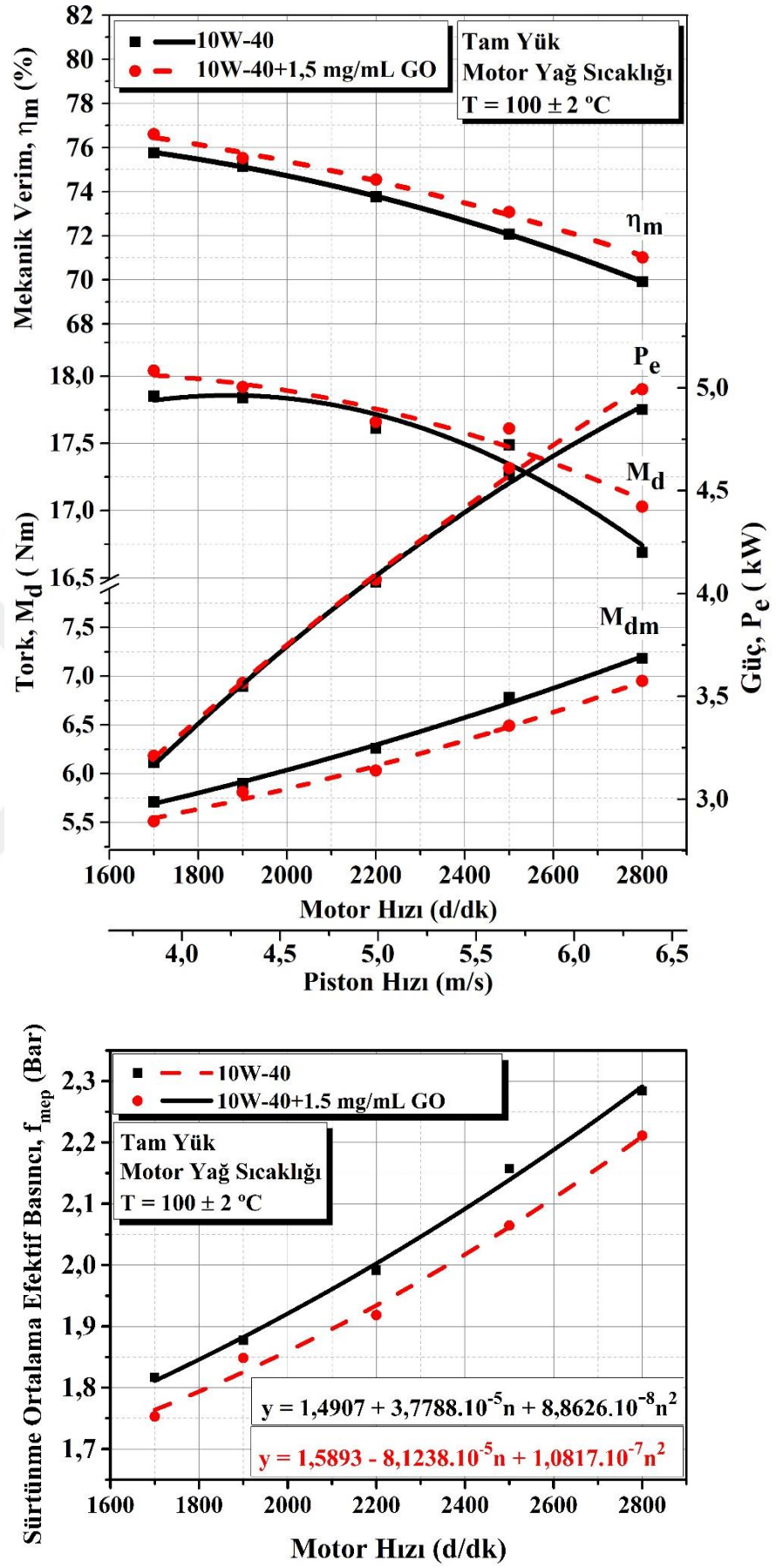
kayma direncine bağı olarak akışkanın sahip olduğu viskoz kuvvetler nedeniyle sürtünme de artacaktır (Ali ve diğ. 2018^a). Meydana gelen sürtünmeler artan devirle birlikte yükselerek M_{dm} 'nin de artmasına neden olacaktır. Bundan dolayı M_{dm} 'nin kontrol edilmesinde motor devri kritik bir öneme sahiptir. Burada baz motor yağı ve GO katkılı motor yağı ile çalışan motorun M_{dm} değerlerinin sabit sıcaklıklarda karşılaştırıldığında, GO katkılı motor yağı etkisindeki motorun daha düşük bir (M_{dm})'ye sahip olduğu yani negatif torkunun baz yağa göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun birinci nedeni bölüm 7.2'de açıklandığı gibi tüm sıcaklıklarda daha düşük viskoziteye sahip olan GO katkılı motor yağının daha az viskoz sürtünme kuvvetleri meydana getirerek, motor parçaları arasındaki artan kayma oranları ile yağlamayı iyileştirmesi ve böylece motordan sürtünmeye harcanan torkun azalmasını sağlamasıdır (Guo ve Zhang 2016). İkinci ve temel etken ise bölüm 7.4'te açıklandığı gibi GO'nun farklı yağlama mekanizmaları (yuvarlama-yağlama, koruyucu, tamir ve parlatma) ve sahip olduğu mükemmel tribolojik özellikleri ile sürtünmeyi azaltması, motor güç ve torkunu artırmasıdır. Bununla birlikte, Şekil 7.28-29 ve 30'da yer alan grafiklerde f_{mep} değerinin de sabit motor sıcaklıklarında değerlendirildiğinde, artan motor devriyle birlikte doğrusala yakın bir şekilde hızla arttığı görülmektedir (Çerkezoğlu 2015). Devirde meydana gelen artışla birlikte f_{mep} değerindeki artış artan sürtünme kuvvetlerinin de bir göstergesidir.



Şekil 7.28: 40 °C Karter Yağ Sıcaklığında Yağların Motor Performansına Etkisinin Karşılaştırılması

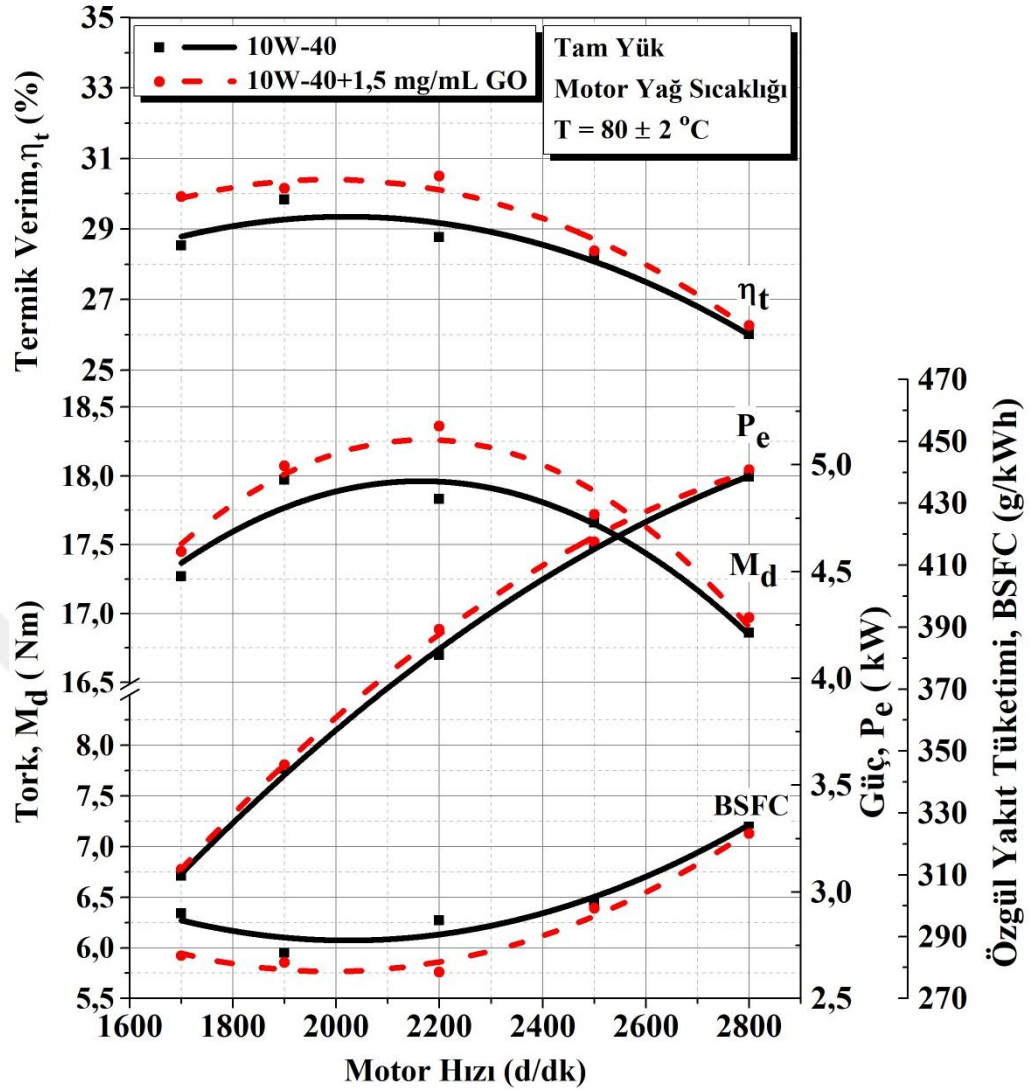


Şekil 7.29: 80 °C Karter Yağ Sıcaklığında Yağların Motor Performansına Etkisinin Karşılaştırılması



Şekil 7.30: 100 °C Karter Yağ Sıcaklığında Yağların Motor Performansına Etkisinin Karşılaştırılması

Şekil 7.31’de yer alan grafikte 80 °C sabit motor yağ sıcaklığına sahip motora ait tork, güç, özgül yakıt tüketimi (*BSFC*) ve termik verimi (η_t) gösterilmektedir. Özgül yakıt tüketimi ekonomik çalışma bölgesine kadar motor devrinin artmasıyla azalma eğilimi gösterir. Bunun nedeni yanma odası içerisinde yakıtın yanması ile oluşan ısının silindir duvarlarında atılması için düşük motor devirlerde daha çok zamanın var olmasıdır. Böylece daha çok ısı kaybı meydana geleceğinden daha az yanma verimi meydana gelecektir. Özgül yakıt tüketimi yüksek motor devirlerine doğru tekrar artış eğilimine geçer. Bunun ise iki nedeni vardır; ilk neden üretilen birim güç başına daha yüksek miktarda yakıtın tüketilmesi, ikinci neden ise yüksek motor devirleriyle birlikte sürtünme basıncının (f_{mep}) yani negatif etkinin ve pompalama basıncının (p_{mep}) artmasıdır (Ali ve diğ. 2018^a). Şekil 7.29’da yer alan grafik incelendiğinde GO katkılı motor yağının baz motor yağına göre 80°C motor yağ sıcaklığında M_{dm} değerini ortalama %5 daha düşürdüğü, bundan dolayı birim güç başına harcanan yakıt miktarının baz yağa göre azaldığı ve Şekil 7.31’e bakıldığında özgül yakıt tüketiminin ortalama %2,6 düştüğü görülmüştür. Burada GO katkılı motor yağının baz motor yağına göre daha düşük yakıt tüketimi sağlamasının nedeni, nanopartikül katkılı motor yağının diğer bölümlerde anlatıldığı gibi daha düşük viskozite ve daha yüksek viskozite indeksine sahip olması ve tribolojik özelliklerinin yani sürtünme ve aşınmada meydana getirdiği düşüş ile güç kayıplarının azalması ve motor performansını arttırmasından dolayıdır (Ali ve diğ. 2018^b). Bununla birlikte f_{mep} değerinde meydana gelen düşüşün motorun yakıt tüketimini düşürdüğü yaygın bilinen bir gerçektir (Çerkezoğlu 2015). Şekil 7.29’da yer alan grafikte GO katkılı motor yağının f_{mep} değerini baz motor yağına göre düşürdüğü açık bir şekilde görülmekte ve böylece yakıt tüketiminde de bir düşüş öngörülebilmektedir.



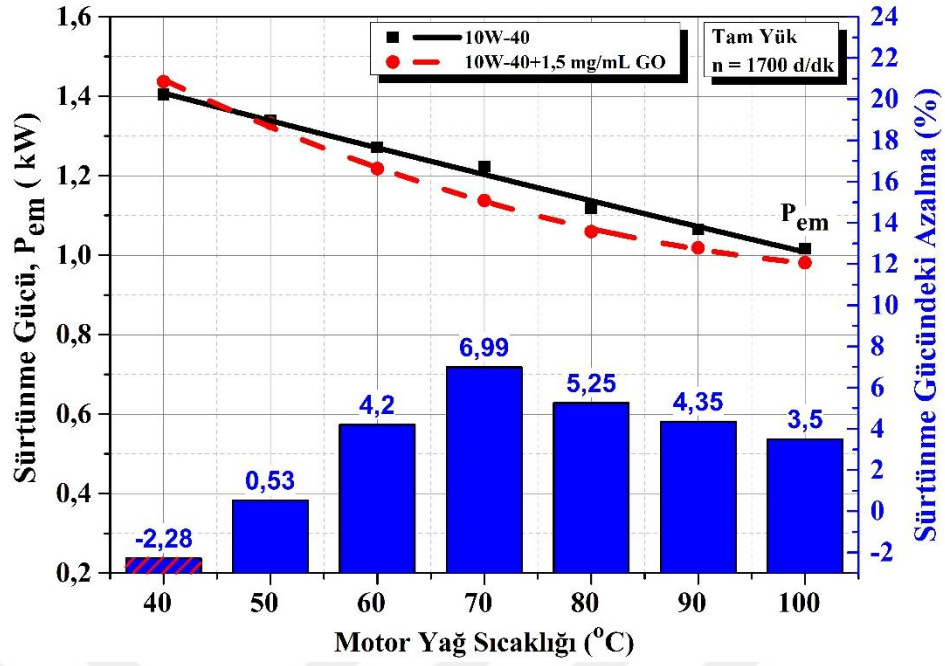
Şekil 7.31: 80 °C Motor Yağ Sıcaklığında Baz Motor Yağı ve Katkılı Motor Yağının Motor Torku, Gücü, Termik Verimi ve Özgül Yakıt Tüketimine Etkisinin Karşılaştırılması

Motor termik verimi; güç, yakıt debisi ($\dot{m}_f$) ve yakıtın alt ısı değeri (Q_{HV}) bir fonksiyonudur. Şekil 7.31’de yer alan grafikte 80 °C sabit motor yağ sıcaklığında farklı motor devirleri için motorun sahip olduğu termik verim verilmiştir. Grafik incelendiğinde GO katkılı motor yağının baz motor yağına göre motor termik verimini ortalama %3 oranında artırdığı görülmektedir. Bunun nedeni GO katkılı motor yağının tribolojik özellikleri ile yağlamayı iyileştirip motorda sürtünmeye harcanan gücü azaltarak, motorun güç performansını artırmasıdır.

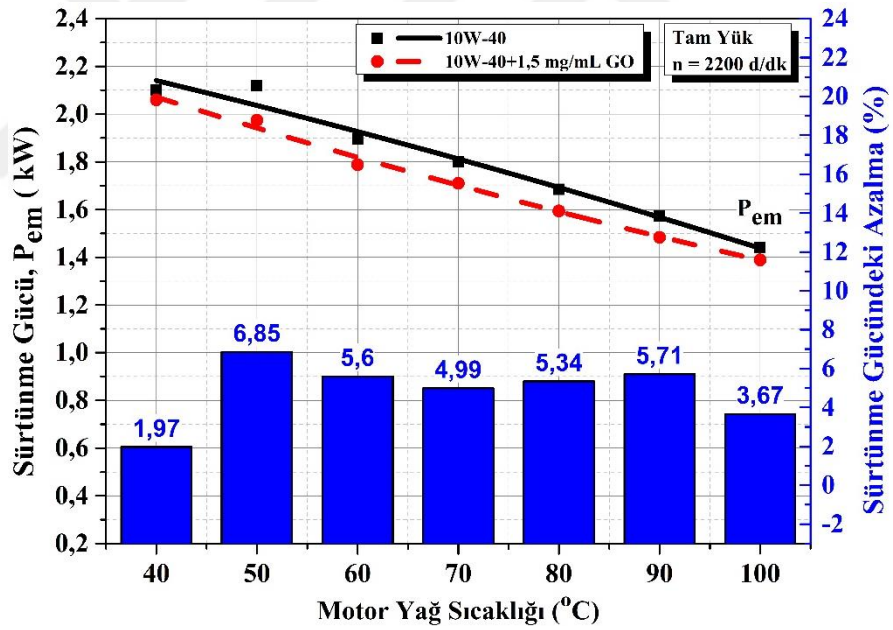
Sürtünme harekete karşı olan direnç kuvveti olarak tanımlanır (Timur 2017). Temas eden cisimler arasında meydana gelen sürtünme, hareketi başlatmak veya sürdürmek için aşılması gereken kuvvet ve göreceli hareket sırasında harcanan enerji olarak kendini gösterir (Bermúdez ve Jimies 2011). Genel olarak sürtünme; hız,

kinematik viskozite ve kuvvetin bir fonksiyonudur (Lee ve diğ. 2007). Burada motor üzerinde meydana gelen sürtünme baz alınır ve bölüm 7.4'te anlatıldığı gibi motor parçaları arasında meydana gelen sürtünmeler için Stribeck eğrisi göz önünde bulundurulur ise; aynı hız ve aynı kuvvet şartlarında motor parçaları arasındaki sürtünmeyi azaltmada en kritik öneme sahip bileşenin yağlama maddesinin viskozitesi olduğu görülür. Ayrıca motor yağ sıcaklığı, yağın viskozitesini etkilemekte ve düşük ya da yüksek viskozitede motorun çalışma durumuna göre motorda meydana gelen sürtünme kuvvetlerini ve bundan kaynaklı yakıt tüketimini etkilemektedir (Çerkezoğlu 2015). Şekil 7.32-33 ve 34'te yer alan sabit motor devirlerindeki (1700-2200-2800 d/dk) grafikler incelendiğinde motor yağ sıcaklığının artması ile hem baz motor yağı hem de GO katkılı motor yağı etkisinde çalışan motor için sürtünme gücü P_{em} yani negatif güç azalmaktadır. Bunun nedeni Şekil 7.3'te gösterilen grafikte olduğu gibi artan sıcaklıkla birlikte yağlayıcıların viskozitelerinin hızlı bir şekilde düşmesidir. Yağlayıcı maddenin viskozitesinin düşmesiyle sistemde etkiyen viskoz kuvvetler azalacak ve yağ filminin sahip olduğu kayma direnci düşerek motorda oluşan sürtünme gücünü azalacaktır (Ali ve diğ. 2018^a).

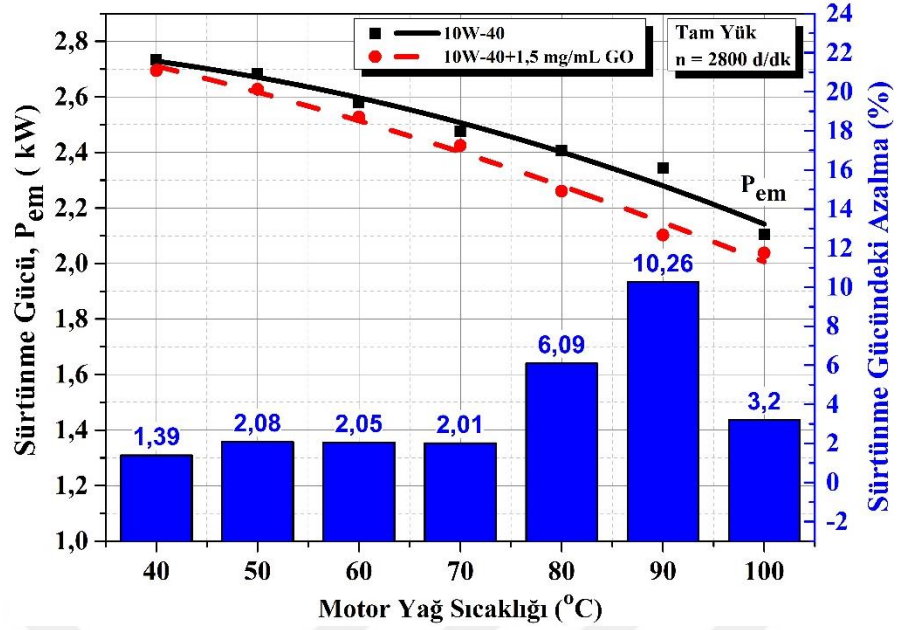
Şekil 7.32-33 ve 34'te yer alan grafikler incelendiğinde GO katkılı motor yağının baz motor yağına göre artan yağ sıcaklığıyla motorda meydana gelen P_{em} 'yi azalttığı görülmektedir. Bunun nedeni GO katkılı motor yağının baz motor yağına göre daha düşük viskoziteye sahip olmasıdır. Düşük viskozite sayesinde GO katkılı motor yağı baz motor yağına göre daha kolay bir şekilde yağ filmi oluşturarak yağlama performansını artırmakta böylece parçalar arasında meydana gelen sürtünme ve aşınmayı azaltabilmektedir. Bununla birlikte GO katkılı motor yağının baz motor yağına göre viskozite indeksinin (VI) yüksektir ve bu durum otomotiv motorları için yağın viskozitesinde sıcaklıkla daha az değişiklik olmasından dolayı için tercih edilir (Genesan 2012; Gupta 2006). Viskozite indeksinin 80 ile 120 arasında olması da GO katkı maddesinin motor yağı içerisinde daha kolay bir şekilde dağılmasını ve böylece GO katkılı motor yağının daha etkin tribolojik performans gösterebilmesini sağlar (Patel ve diğ. 2019^b).



Şekil 7.32: 1700 d/dk Motor Devirlerinde ve Farklı Sıcaklıklarda Baz Motor Yağının ve GO Katkılı Motor Yağının Motored Sürtünme Gücüne ve Sürtünme Gücündeki Azalmaya Etkisinin Karşılaştırılması

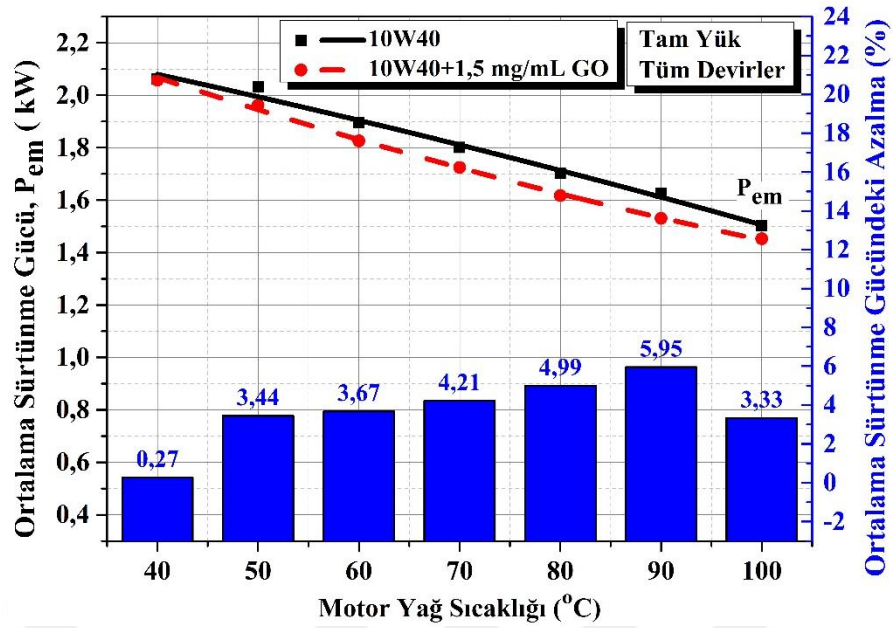


Şekil 7.33: 2200 d/dk Motor Devirlerinde ve Farklı Sıcaklıklarda Baz Motor Yağının ve GO Katkılı Motor Yağının Motored Sürtünme Gücüne ve Sürtünme Gücündeki Azalmaya Etkisinin Karşılaştırılması



Şekil 7.34: 2800 d/dk Motor Devirlerinde ve Farklı Sıcaklıklarda Baz Motor Yağının ve GO Katkılı Motor Yağının Motored Sürtünme Gücüne ve Sürtünme Gücündeki Azalmaya Etkisinin Karşılaştırılması

Şekil 7.35'te tüm devir şartlarında farklı sıcaklıklardaki motor yağlarının P_{em} 'yi nasıl etkilediği ve GO katkılı motor yağının farklı sıcaklıklarda baz motor yağına göre sürtünmeyi yüzdesel oranda ne kadar azalttığı gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde tüm motor yağı sıcaklıklarında GO katkılı motor yağının sürtünmeye harcama gücü baz motor yağına göre azalttığı ve bunun ortalama %3,7 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, GO katkılı motor yağının baz motor yağına göre en etkili sürtünme azaltma performansını motor yağ sıcaklığı 80-90 °C civarlarındayken sağladığı görülmektedir.



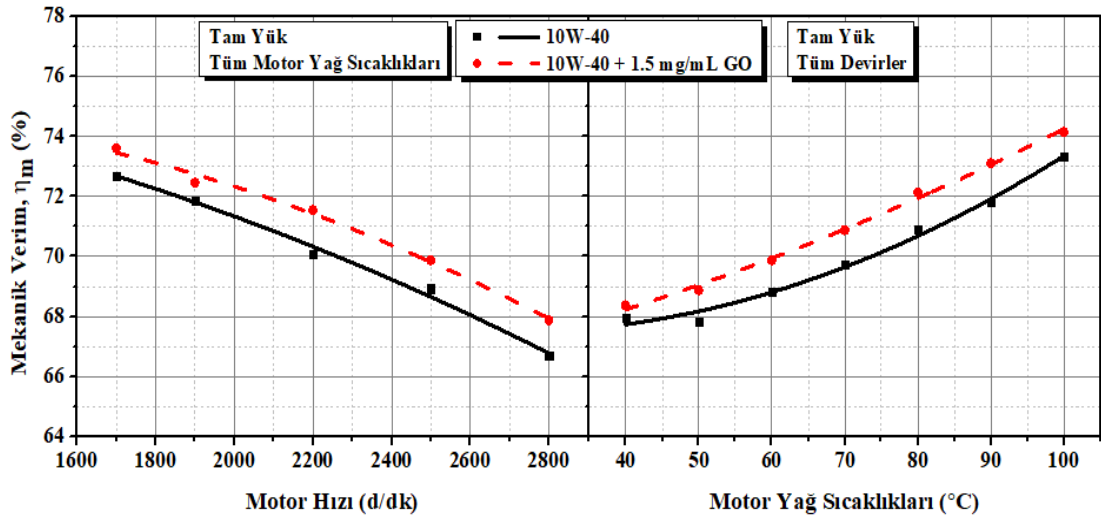
Şekil 7.35: Tüm Motor Devirlerinde ve Farklı Motor Yağ Sıcaklıklarında Baz Motor Yağı ve GO Katkılı Motor Yağının Ortalama Motored Sürtünme Gücüne ve Sürtünme Gücündeki Azalmaya Etkisinin Karşılaştırılması

Şekil 7.35'te yer alan grafikler incelendiğinde hem GO katkılı motor yağının hem de baz motor yağının artan yağ sıcaklığı ile sürtünmeye harcanan gücü azalttığı görülmektedir. Bu durum artan yağ sıcaklığı ile motor yağlarının viskozitelerinin hızlı bir şekilde düşmesiyle, yağlayıcı akışkana etki eden viskoz kuvvetlerin azalmasına ve yağ filminin sahip olduğu kayma direncinin düşerek motorda oluşan sürtünme gücünün azalmasına bağlanmıştır. (Ali ve diğ. 2018^a). Fakat yağlayıcı maddelerin yüksek sıcaklıklara çıkması sonucunda viskozite aşırı derece düşecektir. Viskozitede meydana gelen bu aşırı düşüş sonucunda yağlayıcı film tabakası zarar görecektir, yağ filmleri kopacak ve yağlayıcı maddenin taşıma kapasitesi azalarak sürtünme, aşınma gibi olumsuz etkiler artacaktır (Raygoza ve diğ. 2016; Senatore ve diğ. 2013). Bundan dolayı motor yağlarının çok yüksek sıcaklık değerlerine çıkması istenilmeyen bir durumdur. Ayrıca motor yağının sürtünme ve aşınmayı azalmanın yanında yaptığı bir diğer görevde temas ettiği motor parçalarının soğumasını sağlamaktır. Bundan dolayı içten yanmalı motorlarda kullanılan motor yağlarının ısı iletim katsayılarının yüksek olması istenmektedir.

Motor yağı içerisine eklenen GO nanopartikülünün ısı iletim katsayısının yüksek olması, spesifik yüzey alanının oldukça büyük olması ve iyi bir yağlama filmi sunmasıyla motor yağının aşırı derecede ısınmasını engellemesine ve yağlayıcının ısı iletkenliğini yani ısı iletim katsayısının artmasına yardımcı olmuştur (Karabulut ve

diğ. 2018). Ayrıca yüksek sıcaklıklarda ısı iletkenliğinin geliştirilmesine önemli bir katkı sağlayan Brownian hareketinin artmasıyla GO katkılı motor yağının baz motor yağına göre daha yüksek ısı transfer performansına sahip olduğu düşünülmektedir (Takur ve diğ. 2018; Rasheed ve diğ. 2016). Bölüm 7.3'te yer alan ısı iletkenlik katsayısının grafiğinde farklı GO konsantrasyonuna sahip tüm katkılı motor yağlarının baz motor yağına göre ısı iletim katsayısını ortalama %6-9 oranında arttırması ise bu düşünceyi desteklemektedir. Bununla birlikte GO katkılı motor yağı ile oluşturulan yüksek ısı iletkenlik sayesinde ısının verimli bir şekilde dağıtılması sağlanacak, motor yağında ve motor parçalarında sıcaklık artışının sınırlandırılacaktır. (Ota ve diğ. 2015). Böylece motor parçalarının yüksek sıcaklıklara çıkması engellenecek, motor parçalarının ömrü uzatılacak ve motor yağı tribolojik performansını maksimum seviyede gösterecektir.

Mekanik verim, içten yanmalı motorlarda toplam sürtünme gücü kayıplarının bir göstergesi olup, büyüklüğü dinamometre fren tahrik torkuna, motor devrine ve motor yağının özelliklerine bağlıdır (Ali ve diğ. 2018^b). Şekil 7.36'da yer alan grafikte hem tüm sıcaklıklarda ve farklı devirlerde hem de tüm devirlerde ve farklı sıcaklıklarda mekanik verim grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde mekanik verimin (η_e) artan motor devriyle birlikte azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Denklem 6.31'de yer alan eşitlikte gösterildiği gibi mekanik verim fren ortalama efektif basıncı (b_{mep}) ve sürtünme ortalama etkili basıncının (f_{mep}) bir fonksiyonudur. Bundan dolayı f_{mep} değerinin devirle birlikte artmasıyla hem baz motor yağının hem de GO katkılı motor yağının etkisinde çalışan motorun mekanik verimi düşmektedir. GO katkılı motor yağının etkisinde çalışan motorun baz motor yağının etkisinde çalışan motora göre mekanik veriminin yüksek olmasının nedeni, GO katkısının motor yağının özelliklerini geliştirmesi, yağlamayı daha iyi hale getirmesi ve sürtünmeye harcanan torkun azaltarak motor performansını arttırmasından dolayıdır.



Şekil 7.36: Motor Hızı ve Motor Yağ Sıcaklığına Göre Mekanik Verimin Değişimi

Bununla birlikte Şekil 7.36'daki grafikte mekanik verimin artan yağ sıcaklığı ile yaklaşık olarak %1,47 oranında arttığı görülmektedir. Bunun nedeni Şekil 7.32-33 ve 34'te gösterildiği gibi motor yağ sıcaklığının artmasıyla viskozite ve yağlayıcı maddenin sahip olduğu kayma direnci düşmekte, böylece hem baz motor yağı hem de GO katkılı motor yağı etkisinde çalışan motor için sürtünme gücü P_{em} yani negatif güç azalmaktadır (Ali ve diğ. 2018^a). Sürtünmeye harcama gücün azalmasıyla da motorda yanma ile elde edilen gücün daha büyük bir kısmı etkin bir şekilde kullanılmakta ve bu da mekanik verimi artırmaktadır. Ayrıca GO katkılı motor yağının etkisinde çalışan motorun baz motor yağının etkisinde çalışan motora göre mekanik veriminin yüksek olmasının nedeni GO katkılı motor yağının Şekil 7.3'te yer alan viskozite-sıcaklık grafiğinde gösterildiği gibi tüm sıcaklıklar için daha düşük viskoziteye sahip olması ve bundan dolayı motor yağının tribolojik özelliklerini geliştirip, sürtünmeye harcanan gücün azalmasını sağlamasından dolayıdır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında farklı miktarlarda GO nanopartikülleri, 10W40 tam sentetik motor yağının tipolojik özelliklerini geliştirmek amacıyla katkı maddesi olarak kullanılmıştır. GO katkı maddesinin baz motor yağı içerisine homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak ve çökelti oluşturup bir araya gelmesini engellemek için katkılı motor yağları ultrasonik karıştırma cihazı yardımıyla karıştırılmıştır. Karıştırılan GO katkılı motor yağlarının ve baz motor yağının sırasıyla; dağılım kararlılığı ve homojenliği kontrol edilmiş, viskoziteleri ve ısı iletim katsayıları ölçülmüş, sürtünme testleri sonucunda aşınan bilyelerde meydana gelen aşınma miktarları belirlenerek bu aşınma yüzeylerinden detaylı SEM görüntüleri alınıp, EDS analizleri yapılmıştır. Yapılan bu gözlem, test, analiz ve hesaplamalar ile GO katkılı motor yağının baz motor yağına göre tribolojik özellikleri hangi oranda ve nasıl etkilendiği incelenmiştir. İnceleme sonucunda tribolojik olarak en yüksek performansı veren optimum konsantrasyonun 1,5 mg/mL GO içeren motor yağı olduğu tespit edilmiştir. Ardından bu konsantrasyona sahip katkılı motor yağı ve baz motor yağının motor üzerindeki tork, güç ve özgül yakıt tüketimi üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi için motor dinamometresinde deneyler yapılmıştır. Yapılan farklı parametrelerdeki triboloji testleri ve farklı çalışma koşullarındaki motor deneyleri ayrı ayrı değerlendirilerek aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir.

Oleik asitle modifiye edilen grafen oksit baz motor yağı içerisine ultrasonik karıştırıcı ile dağıtılmıştır. GO nanopartiküllerinin baz motor yağı içerisine homojen olarak karıştırılmasının ardından yaklaşık bir ay boyunca gözlemlenerek takip edilmiş ve katkılı motor yağı içerisindeki katkıların herhangi bir çökelti ya da birikme göstermediği tespit edilmiştir. GO katkısının baz yağ içerisinde uzun bir süre homojen olarak dağılmış halde kalabilmesi GO'nun yüzeyi aktif maddelerle modifiye edilmesine ve ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılmasına bağlanmıştır. Ayrıca mekanik karıştırma ve ultrasonik karıştırma işlemlerine tabi tutulmuş olan motor yağları optik mikroskop altında incelenmiş ve ultrasonik karıştırma işlemine tabi tutulan yağın içerisindeki GO yapılarının homojen bir şekilde dağıtıldığı fakat mekanik karıştırmaya tabi tutulan yağlayıcının içerisindeki GO'ların birikinti oluşturduğu ve yağlayıcı

içerisinde homojen dağılım gösterememesinden dolayı çok kısa bir süre sonra neredeyse tamamının çökeldiği görülmüştür.

Farklı konsantrasyonlara sahip GO katkılı motor yağlarının baz motor yağına göre tüm sıcaklıklarda viskoziteyi bir miktar düşürdüğü görülmüştür. Burada viskozitedeki düşme GO nanopartikülünün yüksek tribolojik özellikleriyle kaymayı kolaylaştırmasına bağlanmıştır. Düşük sıcaklıklarda viskozitenin düşük olmasıyla yağlayıcıların düşük sıcaklıklarda daha kolay bir şekilde yağlama filmi oluşturarak sürtünme ve aşınmayı azaltabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte yüksek sıcaklıklarda baz motor yağına göre GO katkılı motor yağının viskozitesinin düşük olması yağlayıcının taşıma kapasitesinde bir azalma olacağının göstermekte fakat yüksek sıcaklıklardaki viskozitedeki düşüşün az olması bu durumu önemsiz kılmaktadır. Ayrıca bu çalışmada hesaplanan viskozite indeksi değerleri ile GO katkılı motor yağlarının baz motor yağına göre viskozite indeksini arttırdığı ve bu durumda GO katkılı motor yağlarının baz motor yağına göre daha geniş bir sıcaklık aralığında viskozitelerinin değişmeden başarılı bir şekilde çalışabileceğini göstermektedir.

Tüm farklı konsantrasyonlara sahip GO katkılı motor yağlarının, 10W-40 motor yağına göre yoğunluklarının bir miktar arttığı görülmüştür. Bunun nedeninin de GO yapısında bulunan ve GO'nun dolayısıyla GO katkılı motor yağının yoğunluğunu arttıran karbon (C) maddesidir. Ayrıca motor yapındaki GO konsantrasyonu arttıkça yağlayıcı içerisinde artan karbon nedeniyle yağın yoğunluğu daha da arttığı görülmektedir.

GO nanopartikülünün sahip olduğu yüksek ısı iletkenlik özelliği ve yüksek yüzey alanı ile katkı maddesi olarak eklendiği baz yağın ısı iletim katsayısını artırdığı tespit edilmiştir. Böylece GO katkılı motor yağlarının baz motor yağına göre ısı transfer verimini artıracak ve motor parçalarını daha etkili soğutarak, motor performansına olumlu etki yapacağı öngörülmektedir.

Farklı devir ve yük koşullarında yapılan sürtünme testleri neticesinde motor yağının performansının belirlenmesinde önemli bir grafik olan Stribeck eğrisi oluşturulmuş ve farklı yağlama bölgelerinde, farklı GO konsantrasyonuna sahip motor yağı ile baz motor yağının sürtünme katsayıları karşılaştırılmıştır. Tüm

yağlama bölgelerinde GO katkılı motor yağlarının baz motor yağına göre sürtünme katsayısını önemli derecede düşürebildiği tespit edilmiştir. Motor parçalarının ağırlıklı olarak çalışmış oldukları yağlama rejimleri tespit edilerek tribolojik performansın en çok gelişmesini sağlayan optimum GO konsantrasyonunun 1,5 mg/mL olduğu sonucuna ulaşılmıştır. 1,5 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip yağlayıcının en düşük sürtünme katsayısını karma yağlama bölgesinden hidrodinamik yağlama bölgesine geçişte sağladığı ve sürtünme katsayısının 0,043 μ olduğu bu koşullarda baz motor yağına göre sürtünme katsayısını yaklaşık %26 oranında geliştirdiği görülmüştür. Tüm yağlama rejimlerindeki sürtünme katsayıları baz alınarak hesaplanan ortalama sürtünme katsayısının baz motor yağı için yaklaşık 0,069 μ iken GO katkılı motor yağı için bu oran 0,058 μ olarak bulunmuş ve sürtünme katsayısındaki bu azalma ile yaklaşık olarak sürtünmenin baz yağa göre %17 düşürüldüğü görülmüştür.

Sürtünme testlerine tabi tutulan aşınmış bilyeleri aşınma çapları optik mikroskop ile bulunmuştur. Bulunan bu çap değerleriyle uygun geometrik hesaplamalar yapılarak bilye üzerinde meydana gelen aşınma miktarları hesaplanmıştır. Bilye çapları ve bilyelerdeki ağırlık kayıpları incelendiğinde GO katkılı tüm yağlayıcılar baz motor yağına göre aşınmayı azaltmıştır. Tüm yağlama bölgelerindeki aşınma performansları değerlendirildiğinde 1,5 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip yağlayıcının etkili olduğu ortamda aşınma miktarının $6,066 \times 10^{-7} g$ ile diğer yağlayıcılarla karşılaştırıldığında en düşük değerde olduğu görülmüştür. Ayrıca bu GO konsantrasyonuna sahip motor yağının baz motor yağına göre aşınmayı yaklaşık %44 oranında azalttığı görülmüştür.

Aşınma yüzeylerinde yapılan taramalı elektron mikroskobu (SEM) ölçümü ile yüksek büyütmeye sahip görüntüler alınarak baz motor yağında çalışan bilye ile GO katkılı motor yağında çalışan bilyelerin aşınma yüzeyleri karşılaştırılabilmiştir. Karşılaştırma sonucunda baz motor yağının etkisi altında çalışan bilyenin aşınma yüzeyi, 1,5 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip yağlayıcı etkisinde çalışan bilyenin aşınma yüzeyine göre hem aşınma çapının daha büyük olduğu hem de yüzeyde aşınma yönündeki çiziklerin daha geniş ve derin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum GO katkılı motor yağının aşınma

önleme kabiliyetinin bir göstergesidir. Ayrıca aşınma yüzeyine yapılan EDS analizi sonucuna göre baz motor yağı etkisinde çalışan bilyenin aşınma yüzeyinde karbon (C) oranının hacimce %8,53 iken GO katkılı motor yağı etkisinde çalışan bilyenin aşınma yüzeyindeki karbon oranı %13,14 olarak bulunmuştur. Grafenin yapısını karbon elementinin oluşturması ve GO katkılı motor yağı etkisinde çalışan bilyenin aşınma yüzeyinde karbon elementinin daha yüksek oranda çıkması grafen nanopartiküllerinin aşınma yüzeyinde biriktiğini, sürtünme ve aşınma önleyici bir tribofilm oluşturduğunu kanıtlamaktadır. Bununla birlikte, yüzeyde biriken grafen nanopartikülleri aşınma yüzeyindeki çatlakları doldurarak tamir etmekte, yüzeyi parlatmakta, aşınma ve sürtünmeyi azaltarak motor yağının tribolojik performansının artmasını sağlamaktadır.

Yapılan triboloji deneyleri sonucunda en etkili yağlama performansını sağladığı kanıtlanan 1,5 mg/mL GO konsantrasyonuna sahip katkılı motor yağı ve baz motor yağının motor içerisinde gerçek performansının belirlenmesi için bu yağlayıcılar kullanılarak motor deneyleri yapılmıştır. Farklı motor devirlerinde (1700-1900-2200-2500-2800 d/dk) ve farklı motor yağı sıcaklıklarında (40-50-60-70-80-90-100 °C) yapılan yanmalı motor deneyleri yapılmıştır. Ardından motorda doğrudan sürtünmeye harcanan torkun bulunabilmesi için aynı test koşullarında motor, dinamometre tarafından tahrik edilmiş (yanmasız motor) ve yanmalı motorda yapılan testler bu şekilde tekrar yapılmıştır. Yapılan testler ile motordan elde edilen tork ve sürtünmeye harcanan tork belirlenerek, gerekli hesaplamalar ile sürtünmeye harcanan güç belirlenmiştir. Yapılan testler ve hesaplamalar sonucunda GO katkılı motor yağının baz motor yağına göre tüm yağ sıcaklıklarında sürtünmeye harcanan gücü ortalama %3,7 azalttığı, böylece motor tork ve gücünü artırarak motorun mekanik verimini ortalama %1,47 oranında geliştirdiği belirlenmiştir. Bunlara ilave olarak motorda sürtünmeye harcanan gücün azaltması ve mekanik verimin arttırmasından dolayı GO katkılı motor yağıyla çalışan içten yanmalı motorun baz motor yağı ile çalışan motora göre 80 °C motor yağ sıcaklığında özgül yakıt tüketimini (BSFC) ortalama %2.6 oranında azalttığı deneylerle kanıtlanmıştır. Motorda meydana gelen sürtünme azalması ve mekanik verim artışı GO katkılı motor yağının motor parçaları arasındaki sürtünmeyi azaltmasına ve motor yağının tribolojik performansını geliştirmesine atfedilmiştir.

Tüm bu çalışmalar sonucunda GO nano katkı maddesinin 10W-40 tam sentetik motor yağı için yüksek performansa sahip bir katkı maddesi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. GO katkılı motor yağının sürtünmeye harcanan enerjiyi azaltmasında dolayı yakıt enerjisinin daha verimli kullanılmasına olanak sağladığı görülmüştür. Sürtünmenin azaltılmasıyla birlikte yüksek ekonomik verimliliğe sahip, daha dayanıklı, daha uzun ömürlü ve çevre için daha az zararlı içten yanmalı motorlar meydana gelebilecektir. Ayrıca yakıtın daha etkin kullanılması sayesinde enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği artabilecektir.

Yukarıda bahsedilen etkiler incelendiğinde, GO nanopartikülünün aşınma ve sürtünme yönünden üstün performans göstererek güç kaybını azalttığı ve motor ömrünü arttırdığı, ısı iletimi artırarak motor performansını geliştirdiği, viskoziteyi düşürerek düşük sıcaklıklarda yağlamayı kolaylaştırıp sürtünme ve aşınmayı azalttığı, aşınma yüzeyindeki kılcal boşluklara dolarak tribo filmi oluşturup hem yüzey için koruyucu etki oluşturduğu hem de sürtünmeyi azalttığı sonuçlarına ulaşılmıştır. Bu sonuçlar ile GO yapısının tribolojik performansı deneysel olarak kanıtlanmış, motor yağı katkı maddesi olarak yüksek performans göstermiş ve gelecekteki çalışmalar için umut vadeden üstün tribolojik özelliklere sahip malzeme olduğu tespit edilmiştir.

Bu tez çalışması ile yapılan deneysel çalışmalarda görülen durumlar, yapılan teorik analiz ve hesaplamalar neticesinde elde edilen bilgiler doğrultusunda GO veya diğer nanopartikül katkılı motor yağları konusunda daha sonraki yapılacak çalışmalara katkıda bulunabilecek öneriler şunlardır;

Farklı çalışma koşulları (devir, yük, sıcaklık) altında ball on disk test cihazı üzerinde çalışmalar yapılarak ve GO katkılı motor yağlarının uzun süreli dinamometre üzerinde sürtünme testleri yapılarak daha kapsamlı ve daha etkin sonuçlara ulaşılabilir.

Çalışmada kullanılan GO konsantrasyonunu daha geniş bir aralıkta kullanılarak, aşınma ve sürtünme yönünden yapılan çalışmalarda daha iyi performans sağlayan optimum konsantrasyon hassas bir şekilde belirlenebilir.

Ayrıca günümüzde grafen veya diğer nanopartiküllerin tribolojik performansı ile ilgili birçok çalışma yapılmakta ve bu çalışmaların birçoğunda sürtünme ve

aşınma testleri ile çalışılan nanopartikül maddelerin yüksek tribolojik performansa sahip olduğu keşfedilmektedir. Fakat çalışmalar sadece sürtünme ve aşınma testleriyle sonuçlandırılıp bu testlerin gerçek çalışma koşullarında veya motor içerisinde test edilmediği görülmektedir. Bundan dolayı nanopartikül ve tribolojiyi kapsayan çalışmalarda deneylerin doğrudan çalışılan sistem üzerinde yapılmasıyla daha gerçekçi sonuçlara ulaşılabileceği düşünülmektedir.



9. KAYNAKLAR

Akyazı, H., “Ham petrol kökenli parafinik esaslı mineral baz yağların (SN-80, SN-150, SN-350, SN-500) farklı karışımlarının karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kimya Mühendisliği Anabilim dalı, Çorum, (2015).

Ali, M. K. A., Abdelkareem, M. A. A., Elagouz, A., Essa, F. A. And Xianjun, H., “Mini review on the significance nano-lubricants in boundary lubrication regime”, *International Journal of Biosensors & Bioelectronics*, 2(2), 42–43, doi: 10.15406/ijbsbe.2017.02.00014, (2017).

Ali, M. K. A., Xianjun, H., Abdelkareem, M. A. A., Gulzar, M. and Elsheikh, A. H., “Novel approach of the graphene nanolubricant for energy saving via anti friction/wear in automobile engines.” *Tribology International*, 124, 209–29, doi:10.1016/j.triboint.2018.04.004, (2018^a).

Ali, M.K.A., Fuming, P., Younus, H.A., Abdelkareem, M.A.A., Essa, F.A., Elagouz, A. and Xianjun, H, “Fuel Economy in Gasoline Engines Using Al₂O₃/TiO₂ Nanomaterials as Nanolubricant Additives”, *Applied Energy*, 211: 461–78, doi:10.1016/j.apenergy.2017.11.013, (2018^b).

Ali, M. K. A. and Xianjun, H., “Improving the Tribological Behavior of Internal Combustion Engines via the Addition of Nanoparticles to Engine Oils.” *Nanotechnology Reviews*, 4(4), 347–58, doi:10.1515/ntrev-2015-0031, (2015).

Ali, M. K. A., Xianjun, H. And Abdelkareem, M. A. A., “Recent Advances in Nanolubricant Additives for Fuel Economy in Automotive”, 2(1), 3–6, (2019).

Alyakut, T., 2007. “Alternatives For Four Stroke Motorcycle Engine Oils”, Ms.C. Thesis, İstanbul Technical University, *Institute Of Science And Technology*, Programme Chemical Engineering, İstanbul, 5-10, (2007).

Anghel, V., “A study of engine fuel efficiency and oiliness additives.” PhD Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, Mechanical Engineering, London, (1998).

Ari, S., and Parlar, Z., “Measurement methods of wear between piston ring and cylinder liner”, *Journal of Engineering and Natural Sciences*, (212), 319–34, (2013).

Arnell, D., *Tribology and dynamics of engine and powertrain: fundamentals, applications and future*, 9781845693619, India, New Delhi, Woodhead Publishing Limited, 60-71, (2010).

Arslan, F. M. ve Günerhan, H., “Enerji uygulamalarında kullanılan nanoakışkanların ısı özellikleri”, 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 168-175, (2017),

ASTM, G99-95a, “Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus”, *Wear*, (Reapproved 2010), 1–5, (2011).

ASTM, D2270-04, “Standard Practice for Calculating Viscosity Index from Kinematic Viscosity at 40 and 100 ° C 1 Liquid Petroleum Products and Opaque Liquids (and the Calculation of Dynamic Viscosity) ”, 1-6, (2007).

Aydın, Z., “Deniz taşıtlarında kullanılan farklı yağların segman-silindir çifti yüzeylerindeki tribolojik özelliklerine etki eden parametrelerin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, *Fen Bilimler Enstitüsü*, İnşaatı Ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2015).

Ayrancı, Y. E., “Lazer uyarmalı floresan tekniği ile silindir ve segman arası yağ film kalınlığının ölçülmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 1-5, (2016).

Aytaş, Ş., “Manyetik nano grafen kompozitlerin hazırlanması, karakterizasyonu, stronsiyum ve sezyumun sulu çözeltilerden gideriminde kullanılması”, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir. (2016)

Basshuysen, R, and Schäfer, R., “Internal Combustion Engine Handbook.”, Panama, SAE International, 279-297, (2004).

Berglund, K., “Lubricant ageing effects on wet clutch friction characteristics”, Master’s Thesis, Luleå University of Technology, Mechanical Engineering, Lulea, 5–9, (2008).

Berman, D., Erdemir, A. and Sumant, A. V., “Graphene: A New Emerging Lubricant.” *Materials Today* 17(1): 31–42, doi:10.1016/j.mattod.2013.12.003, (2014).

Bermúdez, M. D. and Jimies, A. E., *Tribology for Engineers*, 978-9-85709-114-7, USA:Woodhead, 33-60, (2011).

Blau, P. J. *Friction Science and Technology*, New York: Taylor and Francis Group (2009)

Caines, A. J. and Haycock. R. F., *Automotive Lubricants Reference Book*, 0-7680-125 1-1, USA:SAE International, 1-25, (1996).

Cakir,M. and Akcay, İ.H, “Effects of Borided Cylinder Liner on Engine Performance in a Firing Diesel Engine.” *Arabian Journal for Science and Engineering* 40(11): 3329–35, (2015).

Çerkezoğlu, Ş.C. “Dizel Motorun Soğuk İlk Çalışma Durumunda Motor Yağ Miktarının, Yağ Isınma Performansına Ve Yakıt Tüketimi Üzerine Olan Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2015).

Cesur, İ., “Farklı Yakıt Karışımlarının Segman- Silindirçifti Arasındaki Sürtünme ve Aşınma Özelliklerine Etkisininİncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi,Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, (2008).

Çetinkaya, S, *Motor Dinamiği*, Ankara, Nobel Yayınları, 8-10,(2014).

Challen, B. and Rodica, B., *Diesel Engine Reference Book*, 0-7506-2176-1, India:Butterworth Heinmann, (1999)

Chen, Z., Yuhong L. and Jianbin L., “Tribological properties of few-layer graphene oxide sheets as oil-based lubricant additives”, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 29(2), doi: 10.3901/CJME.2015.1028.129, (2016)

Dörtoğul, C., “Grafen oksitin sentezlenmesi ve karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, (2018).

Eklund, S., “Roughness Effect on Friction and Wear of Lubricated Plain Bearings”, Master’s Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, (2013).

Eswaraiah, V., Venkataraman, S. and Sundara, R., “Graphene-based engine oil nanofluids for tribological applications graphene-based engine oil nanofluids for tribological applications”, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 4221–27, doi:10.1021/am200851z, (2011).

Eyre, T. S., “The Mechanisms of Wear”, *Tribology International*, 11(2): 91–96, (1978).

Geim, A. K. and Novoselov, K.S., “The Rise of Graphene”, *Nature Materials*, 6(3), 183–191, doi: 10.1038/nmat1849, (2007).

Genesan, V., *Internal Combustion Engines*, New Delhi: McGraw-Hill Offices, 411-441, (2012).

Gulzar, M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Varman, M., Zulkifli, N. W. M., Mufti, R. A. and Zahid, R., “Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives”, *Journal of Nanoparticle Research*, 18(8), doi: 10.1007/s11051-016-3537-4, (2016).

Guo, Y. B. and Si-Wei Z., “The tribological properties of multi-layered graphene as additives of pao2 oil in steel-steel contacts.” *Lubricants*, 4(3), 10.3390/lubricants4030030, (2016).

Gupta, B., Kumar, N., Panda, K., Dash, S. and Tyagi, A. K., “Energy Efficient Reduced Graphene Oxide Additives: Mechanism of Effective Lubrication and Antiwear Properties”, *Scientific Reports*, 6, 1–10, doi:10.1038/srep18372, (2016)

Gupta, H. N., *Fundamental of Internal Combustion Engines*, 413-420, (2006).

Heywood, J.B, *Internal Combustion Engines*, Tata McGraw-Hill, 50-51, (1988).

Thakur, H., Tonk, R. and Singh, G., “Study of Important Performance Characteristics of Commercially Available Two and Four Stroke Engine Lubricants”, *Indian Journal of Science and Technology*, 11(28), doi: 10.17485/ijst/2018/v11i28/130787, 1–10.

Holmberg, K., Andersson, P. and Erdemir, A., “Global Energy Consumption Due to Friction in Passenger Cars.” *Tribology International*, 47, 221–34, doi:10.1016/j.triboint.2011.11.022, (2012).

Ismail, N. A., “Graphene Oxide Functionalization As Friction Modifier Additives for Lube Oil Nurul Athirah Binti Ismail Institute of Graduate Studies”, Master’s Thesis, University of Malaya Kuala Lumpur, Philosophy, Lumpur, 26-34, (2017)

Kaleli, H., İçten Yanmalı Motorlarda Aşınma, Yağlama ve Soğutma, 2-15, (2004).

Karabacak, Y.E., “Bor Katkılı Yağların Motor Performansına Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon, (2013).

Karabaşoğlu, M., “Aşınma Deney Cihazı Tasarımı ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Sakarya, (2008).

Karabulut, K., Buyruk, E. ve Kılınç, F., “Grafen Oksit Nanoparçacıkları İçeren Nanoakışkanın Taşınım Isı Transferi ve Basınç Düşüşü Artışı Üzerindeki Etkisinin Düz Bir Boruda Deneysel Olarak Araştırılması Experimental Investigation of the Effect of Nanofluid Including Graphene-Oxide Nanoparticles” *Mühendis ve Makina* 59(690), 45–67, (2018).

Kardos, S. And Pietrikova, A., “Evaluation of Motor Oil Characteristics and Degradation Factors for Possibilities of Continuous Diagnostics”, *Acta Electrotechnica et Informatica*, 16:2, 20-24, 10.15546/aei-2016-0010, (2016).

Kato, K. And Adachi, K., “Wear Mechanisms”, *Springer Tracts in Mechanical Engineering*, 11, 85–113, doi:10.1007/978-3-319-05894-8_4, (2015).

Kılıç, İ., “İçten yanmalı motorlarda sürtünme kayıpları”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2007).

Kumar, P. and Wani, M.F., “Tribological characterisation of graphene oxide as lubricant additive on hypereutectic al-25si/steel tribopair”, *Tribology Transactions*, 61(2), 335–346, doi:10.1080/10402004.2017.1322735, (2018).

Lakshminarayanan, P.A. and Nayak, N.S., Critical Component Wear in Heavy Duty Engines, 9781118082966, India, Noida, John Wiley and Sons, 218-234, (2011).

Lee, J. , Cho, S., Hwanh, Y., Lee, C. and Kim, S.H., “Enhancement of Lubrication Properties of Nano-Oil by Controlling the Amount of Fullerene Nanoparticle Additives”, *Tribology Letters* 28(2), 203–8, doi: 10.1007/s11249-007-9265-2, (2017).

Lin, J., Wang, L. and Chen, G., “Modification of Graphene Platelets and Their Tribological Properties as a Lubricant Additive”, *Tribology Letters* 41(1), 209–15, doi: 10.1007/s11249-010-9702-5, (2011).

Mang, T. and Braun, J., Angewandte Chemie International Edition, 9783527314973, *Lubricants and Lubrication*, Weinheim, KGaA, Wiley-VHC, 7-22, (2001).

Mann, D., Motor Oils and Engine Lubrication, 17-22, 2013

Mao, J., Zhao, J., Wang, W., Yongyong. H. and Luo, J., “Influence of the Micromorphology of Reduced Graphene Oxide Sheets on Lubrication Properties as a Lubrication Additive”, *Tribology International* 119, 614–21, doi: 10.1016/j.triboint.2017.11.031, (2018).

Müjdeci, S., “İçten yanmalı motorda 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, 15-29, (2009).

Mungse, H. P. and Khatri, O.P., “Chemically functionalized reduced graphene oxide as a novel material for reduction of friction and wear”, *Journal of Physical Chemistry*, 118(26), 1-37, doi:10.1021/jp5033614, (2014).

Nuraliza, N. and Syahrullail. S. “Tribological Effects of Vegetable Oil as Alternative Lubricant: A Pin-on-Disk Tribometer and Wear Study”, *Tribology Transactions* 59(5): 831–37, doi: 10.1080/10402004.2015.1108477, (2016)

Olomolehin, Y., “The influence of zinc dialkyldithiophosphate and other lubricant additives on soot-induced wear.”, PhD Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, Mechanical Engineering, London, 34-63, (2009).

Omrani, E., Menezes, P.L. and Rohatgi, P.K., “Effect of Micro- and Nano-Sized Carbonous Solid Lubricants as Oil Additives in Nanofluid On Tribological Properties”, *Lubricants*, doi: 10.3390/lubricants7030025, (2019).

Jyotiranjan, O., Hait, S.K., Sastry M.I.K and Ramakumar. S.S.V, “Graphene Dispersion in Hydrocarbon Medium and Its Application in Lubricant Technology.” *RSC Advances*, 5(66): 53326–32, doi:10.1039/C5RA06596H, (2015).

Özkal, S. G. and Tülek, Y. “Değişik süt ve bitkisel yağ örneklerinin ısı iletkenlik değerlerinin deneysel olarak belirlenmesi” 25, 51–60, (2001).

Jackson, P. R., “Engineering Tribology”, *Engineering Tribology*, 427(6), 17-22, (2006).

Patel, J. And Kiani, A., “Effects of reduced graphene oxide (rgo) at different concentrations on tribological properties of liquid base lubricants” *Lubricants*, 7(2), 1-2, doi: 10.3390/lubricants7020011, (2019^a).

Patel, J., Pereira, G., Irvine, D. and Kiani, A., “Friction and wear properties of base oil enhanced by different forms of reduced graphene friction and wear properties of base oil enhanced by different forms of reduced graphene”, *AIP Advances*, 9(045011), 1-2, doi: 10.1063/1.5089107, (2019^b).

Paul, G., Hirani, H., Kuila, T. and Murmu, N. C., “Nanolubricants dispersed with graphene and its derivatives: an assessment and review of the tribological performance” *Nanoscale*, 11(8), 1-3, doi: 10.1039/c8nr08240e, (2019).

Polat, Ö., “Bir dizel motorunda supap tahrik zinciri aşınması üzerinde yağlama etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 5-13, (2008).

Pulkrabek, W. W., “Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, 2nd Ed.”, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 126(1), 349–60, (2004).

Ramón-Raygoza, E. D., Rivera-Solorio, C. I., Giménez-Torres, E., Maldonado-Cortés, D., Cardenas-Alemán, E., Cué-Sampedro, R., “Development of Nanolubricant Based on Impregnated Multilayer Graphene for Automotive Applications: Analysis of Tribological Properties”, *Powder Technology* 302, 363–71, doi: 10.1016/j.powtec.2016.08.072, (2016).

Rasheed, A. K., Khalid, M., Rashmi, W., Gupta, T. C. S. M., Chan, A., “Graphene Based Nanofluids and Nanolubricants - Review of Recent Developments.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 63, 346–62, doi: 10.1016/j.rser.2016.04.072, (2016).

Rasheed, A. K., “Heat Transfer , Tribology and Performance of Graphene Nanolubricants in an IC Engine”, Ph.D Thesis, University of Nottingham, Nottingham, (2017).

Rebai, H., “Tribology and machine elements”, Master’s Thesis, HAMK University of Applied Sciences Technical Engineering and Production Technology, Riihimäki 6-10, (2014).

Richardson, D. E., “Review of power cylinder friction for diesel engines”, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 122, 505-519, (1999).

Senatore, A., D’Agostino, V., Petrone, V., Ciambelli, P. and Sarno, M., “Graphene oxide nanosheets as effective friction modifier for oil lubricant: materials, methods, and tribological results”, *ISRN Tribology*, 2013, 1-9, doi:10.5402/2013/425809 (2013).

Serin, F., “Sıvılaştırılmış bor katkılı yağların aşınma karakteristiklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Konya, (2015).

Shenker, J. A., “The compatibility of semi-synthetic engine oil with conventional diesel and biodiesel fuels”, PhD Thesis, The University of Birmingham, School of Mechanical Engineering, Birmingham, 1-55, (2014).

Singh, A., “A friction prediction model for small si engines”, Master’s Thesis, Missouri University Of Science And Technology, Master Of Science In Mechanical Engineering, Missouri, 6-13, (2013).

Srivyas, P. D., and Charoo, M. S., “A review on tribological characterization of lubricants with nano additives for automotive applications” *Tribology in Industry* 40(4), 594–623, doi: 10.24874/ti.2018.40.04.08, (2018).

Thapliyal, T. and Thakre, G.D., “Correlation Study of Physicochemical, Rheological, and Tribological Parameters of Engine Oils”, *Advances in Tribology*, 2017, 1-2, 10.1155/2017/1257607, (2017).

Takadom, J., *Materials and Surface Engineering in Tribology*, 9781848210677, John Wiley & Sons, London, 49-106, (2008).

Timur, A., “Reclamation of used lubricating oils using magnetic nanoparticles and caustic soda”, Master’s Thesis, Submitted To The Department Of Materials Science And Engineering And The Graduate School Of Engineering And Science Of Bilkent University, Ankara, 1-10, (2017).

Tung, S. C., McMillan, M. L., Becker, E. P. and Schwartz, E. S., *Handbook of lubrication and tribology*, Boca Raton, Taylor & Francis Group, 1-24, (2006).

Ünlüoğlu, O., “The effect of graphite particles as lubricant additive on the friction and wear behaviour of aisi h11 steel”, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, (2012).

Upadhyay, R. K. and Kumaraswamidhas, L.A., *Handbook of Materials Failure Analysis*, 9780081019283, Elsevier Ltd., 209-233, (2018).

Ussa, P., “Tungsten disulfide nanoparticles as lubricant additives for the automotive industry”, PhD Thesis, University of Lyon, Lyon, (2016).

Xiao, H. and Liu. S., “2D Nanomaterials as Lubricant Additive: A Review.” *Materials and Design* 135, 319–32, doi: 0.1016/j.matdes.2017.09.029, (2017).

Yang, J., Xia, Y., Song, H., Chen, B. And Zhang, Z. “Synthesis of the Liquid-like Graphene with Excellent Tribological Properties”, *Tribology International* 105, 118–24, doi: 10.1016/j.triboint.2016.09.040, (2017).

Yardımlı, M.H., Motor Teknolojisi, Ankara: Nobel Yayınları (2017).

Yazıcı, M., Tiyeke, İ., Ersoy, M.S., Alma, M.H., Dönmez, U., Yıldırım, B., Salan, T., Karataş, Ş., Uruş, S., Karteri, İ., Yıldız, K., “Modifiye Hummers Yöntemiyle Grafen Oksit (GO) Sentezi Ve Karakterizasyonu”, *Gazi University Journal of Science*, 4:2, 41-48, (2016).

Young, H. D., Freedman, R. A. and Ford, A. L., University Physics with Modern Physics Technology Update: Pearson International Edition, (2013).

Zhang, W., Zhou, M., Zhu, H., Tian, Y., Wang, K., Wei, J., Ji, F., Li, X., Li, Z., Zhang, P. and Wu, D., “Tribological properties of oleic acid-modified graphene as lubricant oil additives” *Journal of Physics*, 44(20), doi: 10.1088/0022-3727/44/20/205303, (2011).

Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J. W., Potts, J. R. and Ruoff, R. S., “Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications.” *Advanced Materials*, 22(35), 3906–3924, (2010).

Ziyadanoğulları, N. B. and Yücel, H.L., “Al₂O₃-Su Nanoakışkanı İle Isı Transferinin İyileştirilmesi Enhancement of Heat Transfer with Al₂O₃-Water Nanofluid.” *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi* 7(2), 253–60, doi: dergipark.org.tr/download/article-file/392801, (2017).

Zulkipli, N. W. M., Masjuki, H. H. And Harith, M. H., “Feasibility of Bio-Based Lubricant as an Engine Oil with Graphene as an Additive”, 2, 1–2, (2017).